escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

# máster universitario
## en hidrología y gestión de recursos hídricos

# proyectos 2014

Estudios Universitarios de Posgrado de las Universidades de Alcalá y Rey Juan Carlos (coordina Universidad de Alcalá)

Universidad de Alcalá

Universidad Rey Juan Carlos

instituto IMdea agua

Consolider tragua

proyectos 2014

# introducción

Esta cuarta publicación de los mejores proyectos presentados en el Máster en Hidrología y Gestión de recursos hídricos corresponde a la octava promoción de egresados.

Queremos felicitar a los autores de los proyectos por el interesante trabajo realizado.

**La Comisión Docente**

proyectos 2014

# índice


**Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza (Segovia) a partir de la aplicación de diferentes modelos hidráulicos (Uni- y Bi-dimensionales). Comparación de resultados y análisis de calidad | 3 |**
autor: **Francisco Miguel Alvarenga Ochoa**
directores: **Dr. Julio Garrote Revilla (IGME)**
**Dra. Irene de Bustamante (UAH-IMDEA)**
Alcalá de Henares, 16 de junio de 2014

**Adsorción y toxicidad de contaminantes emergentes en fangos activos | 263 |**
autora: **Georgiana Amariei**
directores: **Dr. Pedro León (UAH)**
**Dra. Ana Karina Boltes Espínola (UAH)**
Alcalá de Henares, 16 de junio de 2014

**Caracterización medioambiental del patrimonio cultural del agua | 287 |**
autor: **Raúl Gómez Llano**
directoras: **Juan Antonio Pascual Aguilar**
**Alberto Blanco González**
Alcalá de Henares, 14 de junio de 2014

**Aplicación de tecnologías electroquímicas para el tratamiento de suelos contaminados | 329 |**
autora: **Marta Paloma Guerrero Moreno**
director: **Dr. Tristano Bacchetti de Gregoris (IMDEA Agua)**
Alcalá de Henares, 10 de junio de 2014

**Caracterización de las propiedades hidráulicas de la zona no saturada en una parcela experimental para el uso de agua regenerada en riego | 345 |**
autor: **Raúl Ortego Martínez**
directores: **Dra. Raffaella Meffe (Imdea Agua)**
**Dr. Ángel de Miguel (Imdea Agua)**
Alcalá de Henares, 10 de junio de 2014

**Infraestructuras y gestiones sostenibles para potabilización y distribución de agua potable | 380 |**
autora: **Sandra Susana Torres Vásquez**
director: **Dr. Eloy García Calvo (UAH)**
Alcalá de Henares, 10 de junio de 2014

escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

**máster universitario**

en hidrología y gestión de recursos hídricos

p r o y e c t o s

2014

# Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza (Segovia) a partir de la aplicación de diferentes modelos hidráulicos (Uni- y Bi-dimensionales). Comparación de resultados y análisis de calidad

autor

**Francisco Miguel Alvarenga Ochoa**

directores

**Dr. Julio Garrote Revilla (IGME)**

**Dra. Irene de Bustamante (UAH-IMDEA)**

Alcalá de Henares, 16 de junio de 2014

## AGRADECIMIENTOS

Padre celestial, gracias por tener preparado este proyecto para mí, he disfrutado mucho desarrollándolo y espero tener la oportunidad de devolver algo de lo aprendido, enseñando o aplicándolo en casa. Te agradezco por las personas que pusiste en mi camino para guiar este trabajo: Irene de Bustamante, que siempre tuvo el tiempo y apertura para resolver mis dudas; Andrés Díez, que sin conocerme me brindó su voto de confianza para desarrollarle y siempre aportó su experiencia, conocimientos y facilitó los recursos que tenía a su disposición para mejorar la investigación; Julio Garrote que representó la vía a través de la cual se abrió la posibilidad de desarrollar este proyecto, y que siempre tuvo paciencia, dedicación, profesionalismo y brindó un apoyo indiscutible, en muchas ocasiones sacrificando tiempo libre para atender mis inquietudes. Te ruego que bendigas la vida y el desarrollo profesional de cada uno de ellos, y que cada una de sus acciones en favor mío les sea recompensada en la medida de tu misericordia.

Te agradezco también por mis padres, hermanos, familiares y amigos, que estuvieron siempre para darme su apoyo y alejarme de las preocupaciones, para tomar nuevas energías e inspirarme cuando más lo necesitaba.

Finalmente, te agradezco por la vida de mi abuelita, mi mayor fuente de inspiración y orgullo, por ponerla como ejemplo de vida y por quien siempre voy a dar el esfuerzo extra que sea necesario para que se sienta orgullosa de mí.

Gracias por tus bondades y bendiciones.

Amén.

## ÍNDICE

1. Resumen ..... 10
2. Introducción ..... 10
3. Justificación de la investigación ..... 10
3.1. Descripción de la zona de estudio ..... 10
3.1.1. Geología y Geomorfología fluvial en el entorno de Pajares de Pedraza. ..... 11
3.2. Problemática de inundaciones en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia) ..... 12
3.3. Antecedentes ..... 13
3.4. Descripción de relación de la investigación con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), departamento y organigrama. ..... 13
4. Objetivo ..... 14
5. Descripción de la metodología empleada ..... 14
5.1. Factor peligrosidad ..... 14
5.1.1. Escenarios para la evaluación del peligro ..... 15
5.2. Factor exposición ..... 16
5.3. Factor vulnerabilidad ..... 16
5.4. Integración del riesgo ..... 17
5.4.1. Metodología de comparación de los resultados de integración del riesgo a partir de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales ..... 17
6. Resultados ..... 17
6.1. Resultados del estudio de peligrosidad ..... 17
6.1.1. Resultados del estudio de sensibilidad del modelo hidráulico ..... 20
6.2. Resultados del análisis de la exposición ..... 24
6.3. Resultados del análisis de la vulnerabilidad ..... 26
6.4. Resultados de la integración de los factores de riesgo ..... 27
6.4.1. Valoración del riesgo económico asociado al riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas. ..... 28
6.4.2. Valoración del riesgo económico por unidad de vivienda en las zonas de ocupación urbana ..... 32
6.4.3. Mapas de riesgo de arrastre para personas, para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas ..... 33
6.4.4. Mapas de peligrosidad de arrastre de vehículos y daño estructural en edificaciones para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas ..... 34
6.5. Comparación de resultados de la integración del riesgo a partir de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 36
6.5.1. Comparación de la valoración del riesgo económico, obtenido a partir de los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 36
6.5.2. Comparación de los resultados de la distribución espacial de la lámina de inundación y calado máximo, obtenidos a partir de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 37
6.5.3. Análisis comparativo del calado máximo, obtenido a partir de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 38
6.5.4. Análisis comparativo de la velocidad máxima media en el cauce del río, obtenida a partir de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 38
7. Discusión ..... 39
7.1. Limitaciones de la investigación ..... 39
7.2. Análisis de los resultados del factor peligrosidad ..... 39
7.3. Análisis general de los resultados de riesgo económico de inundaciones para diferentes períodos de retorno ..... 39
7.4. Análisis de los resultados de peligrosidad de arrastre de personas, vehículos y peligro de daño estructural en edificios ..... 40
7.5. Análisis de la comparación de los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 40
8. Conclusiones ..... 41
9. Bibliografía ..... 43
10. Anexos ..... 45
10.1. Axexo 1. Galería fotográfica de condiciones observadas en la localidad de Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia) ..... 45
10.2. Anexo 2. Proceso detallado de desarrollo del modelo hidráulico bidimensional Iber en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia). ..... 48
10.3. Anexo 3. Mapas de distribución espacial de calado máximo, velocidad máxima y producto calado máximo-velocidad máxima, correspondiente al peligro de inundación en la zona de estudio para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas ..... 67
10.4. Anexo 4. Mapas de distribución espacial de calado máximo, velocidad máxima y producto calado máximo-velocidad máxima, correspondiente al peligro de inundación en la zona de estudio para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas ..... 112

10.5. Anexo 5. Tablas inventario y funciones de vulnerabilidad característica (calado-daño) utilizadas en la determinación del factor vulnerabilidad de los elementos expuestos en la zona de estudio. . . . . .136

10.6. Anexo 6. Tablas y gráficos de resultados de cálculo de estimación económica del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas. . . . . .163

10.7. Anexo 7. Mapas de zonas de riesgo de arrastre de personas en la zona de estudio para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas. . 188

10.8. Anexo 8. Mapas de zonas de riesgo de arrastre de vehículos, daño estructural en edificios y daño en estructuras ligeras dentro de la zona de estudio para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas. . . . . 203

10.9. Anexo 9. Mapas de catastro urbano expuesto a riesgo de daños dentro de la zona de estudio para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas. . . . . 248

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Escenarios de simulación en Pajares de Pedraza . . . 15

**Tabla 2.** Caudales y períodos de retorno de simulación (Reverte, 2013). . . . . .18

**Tabla 3.** Coeficiente de variación global CVG de calado máximo para los diferentes escenarios de análisis . 24

**Tabla 4.** Coeficiente de variación global $CV_G$ de velocidad máxima para los diferentes escenarios de análisis . . . . . 24

**Tabla 5.** Clasificación por categorías de los elementos expuestos en Pajares de Pedraza. . . . . 25

**Tabla 6.** Elementos expuestos según el registro de catastro urbano . . . . . 25

**Tabla 7.** Elementos expuestos según el registro de catastro rústico . . . . . 25

**Tabla 8.** Inventario de bienes establecido en viviendas de una planta de ocupación permanente (V1P) . . . . . 26

**Tabla 9.** Datos desglosados de la valoración del riesgo de inundaciones en los diferentes elementos expuestos en Pajares de Pedraza, para diferentes períodos de retorno. . . . . 28

**Tabla 10.** Valoración total del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza (considerando máximo daño posible a ocupación rústica en período agrícola activo) . . . 28

**Tabla 11.** Valoración total del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza (considerando daño nulo en ocupación rústica en período agrícola inactivo) . . . . . 28

**Tabla 12.** Porcentaje de incremento en el riesgo económico si la ocurrencia de la avenida de inundación se da en período agrícola activo, con respecto al riesgo económico calculado considerando la ocurrencia de la inundación en período agrícola inactivo 29

**Tabla 13.** Variación del calado máximo en estructuras fijas para las diferentes condiciones topográficas y períodos de retorno. . . . . .31

**Tabla 14.** Estimación del riesgo económico por unidad de vivienda en las zonas de ocupación urbana, para diferentes condiciones topográficas y períodos de retorno 32

**Tabla 15.** Información de indemnizaciones por daños debido a inundaciones en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), según el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS,_2014) . . . . . .33

**Tabla 16.** Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T5}$ = 59m³/s . . . . . .35

**Tabla 17.** Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T25}$ = 104m³/s. . . . . 36

**Tabla 18.** Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T50}$ = 126m³/s. . . . . 36

**Tabla 19.** Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T100}$ = 151m³/s . . . . . 36

**Tabla 20.** Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T500}$ = 218m³/s. . . . . 36

**Tabla 21.** Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza, a partir de los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional, considerando el escenario de inundación durante el período agrícola inactivo . . . . . .37

**Tabla 22.** Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza, a partir de los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional, considerando el escenario de inundación durante el período agrícola activo. . . . . .37

**Tabla 23.** Coeficiente de variación global $CV_G$ de calado máximo para los diferentes escenarios de análisis . 38

**Tabla 24.** Resultado obtenido de velocidad máxima promedio en el cauce (m/s) para los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional . . . . . 38

# ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Contexto geográfico de Pajares de Pedraza, Segovia. (Modificado de visor de imágenes IBERPIX, IGN 2014) ..... 10

**Figura 2.** Ubicación del núcleo poblacional en Pajares de Pedraza ..... 11

**Figura 3.** Puentes que atraviesan el río Cega en la zona de estudio ..... 11

**Figura 4.** Geología y geomorfología de Pajares de Pedraza. (Fuente: Servicio de cartografía digital continua del IGME) ..... 11

**Figura 5.** Obra de mitigación (dique) construido al margen derecho del río Cega ..... 12

**Figura 6.** Ubicación y etapas de desarrollo de la obra de mitigación (dique) construido al margen derecho del río Cega ..... 12

**Figura 7.** Organigrama del Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica del IGME ..... 13

**Figura 8.** Esquema general de la metodología empleada (Modificado de Ayala, 1993) ..... 14

**Figura 9.** Ejemplo de función de vulnerabilidad elemental 16

**Figura 10.** Esquema de integración de los factores de riesgo de inundación ..... 17

**Figura 11.** Cuantiles de la función GEV (ML) para la serie muestral Qci (Reverte, 2013) ..... 18

**Figura 12.** Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 5 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 18

**Figura 13.** Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 25 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 18

**Figura 14.** Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 50 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 18

**Figura 15.** Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 100 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 19

**Figura 16.** Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 500 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 19

**Figura 17.** Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 5 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 19

**Figura 18.** Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 25 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 19

**Figura 19.** Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 50 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 19

**Figura 20.** Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 100 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 20

**Figura 21.** Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 500 años en los tres escenarios topográficos evaluados ..... 20

**Figura 22.** Zonas identificadas de ingreso de agua hacia el núcleo poblacional ..... 20

**Figura 23.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 1: Sin dique) ..... 20

**Figura 24.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 1: Sin dique) ..... 21

**Figura 25.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 1: Sin dique) ..... 21

**Figura 26.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 1: Sin dique) ..... 21

**Figura 27.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1) ..... 21

**Figura 28.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1) ..... 22

**Figura 29.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1) ..... 22

**Figura 30.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1) ..... 22

**Figura 31.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2) ..... 22

**Figura 32.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2) ..... 23

**Figura 33.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2) ..... 23

**Figura 34.** Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2) ..... 23

**Figura 35.** Rangos de calado bajo la condición inicial de rugosidad, para los que se obtiene un $CV_L$ de calado > 0,5 al variar el coeficiente de rugosidad ..... 24

**Figura 36.** Rangos de calado bajo la condición inicial de rugosidad, para los que se obtiene un $CV_L$ de velocidad > 0,5 al variar el coeficiente de rugosidad ..... 24

**Figura 37.** Cartografía del catastro urbano y clasificación usada dentro de la zona de estudio ..... 25

**Figura 38.** Cartografía del catastro rústico y clasificación usada dentro de la zona de estudio ..... 25

**Figura 39.** Función de vulnerabilidad para viviendas de una planta de ocupación permanente (V1P) ..... 27

**Figura 40.** Diagramas característicos de vulnerabilidad en función de calado y velocidad en inundaciones. (Tomado de Díez-Herrero et al. 2008b; desde Martín Vide, 2002) ..... 27

**Figura 41.** Valoración del riesgo económico de inundaciones en función del caudal de entrada al inicio de la simulación ..... 29

**Figura 42.** Variación del riesgo económico en zonas de ocupación urbana, en función de las etapas de desarrollo del dique ..... 29

**Figura 43.** Extensión de la zona de inundación y regiones donde la profundidad de agua es mayor en el escenario con dique (primera etapa) con respecto al escenario sin dique, para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 30

**Figura 44.** Extensión de la zona de inundación y regiones donde la profundidad de agua es mayor en el escenario con dique (segunda etapa) con respecto al escenario sin dique, para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 30

**Figura 45.** Extensión de la zona de inundación y regiones donde la profundidad de agua es mayor en el escenario de la primera etapa del dique, con respecto a la segunda etapa para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 30

**Figura 46.** Variación del riesgo económico en zonas de ocupación rústica en periodo agrícola activo, en función de las etapas de desarrollo del dique ..... 30

**Figura 47.** Variación del riesgo económico en zonas de ocupación rústica en período agrícola inactivo, en función de las etapas de desarrollo del dique ..... 31

**Figura 48.** Variación del riesgo económico en estructuras fijas, en función de las etapas de desarrollo del dique ..... 31

**Figura 49.** Variación del riesgo económico total, en función de las etapas de desarrollo del dique (considerando período agrícola activo) ..... 32

**Figura 50.** Variación del riesgo económico total, en función de las etapas de desarrollo del dique (considerando período agrícola inactivo) ..... 32

**Figura 51.** Riesgo económico por vivienda, determinado para la condición topográfica actual y su relación con la referencia de compensación económica del CCS para la zona de estudio ..... 33

**Figura 52.** Riesgo económico por vivienda versus Período de retorno de avenidas de diseño; interpolación de referencia de compensación ..... 33

**Figura 53.** Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$ ..... 33

**Figura 54.** Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$ ..... 34

**Figura 55.** Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$ ..... 34

**Figura 56.** Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ ..... 34

**Figura 57.** Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 34

**Figura 58.** Zonas de continuidad de flujo con peligro de arrastre de personas para los diferentes escenarios de desarrollo de la obra de mitigación, para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ 34

**Figura 59.** Zonas de continuidad de flujo con peligro de arrastre de personas para los diferentes escenarios de desarrollo de la obra de mitigación, para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 34

**Figura 60.** Comportamiento de las zonas de peligro de arrastre de vehículos en función del desarrollo de la obra de mitigación para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 35

**Figura 61.** Comportamiento de las zonas de peligro de daño para edificios en función del desarrollo de la obra de mitigación para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ ..... 35

**Figura 62.** Área de inundación obtenida con los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$ ..... 37

**Figura 63.** Área de inundación obtenida con los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ ..... 37

**Figura 64.** Área de inundación obtenida con los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para $Q_{T500}$ = 126 $m^3/s$ ..... 37

**Figura 65.** Detalle comparativo de distribución espacial de ocupación de inundación en el núcleo urbano de Pajares de Pedraza ..... 37

**Figura 66.** Distribución espacial del coeficiente de variación local ($CV_L$) de los resultados de calado máximo obtenidos con el modelo hidráulico unidimensional, respecto de los obtenidos con el modelo bidimensional ..... 38

**Figura 67.** Resultado obtenido de velocidad máxima promedio en el cauce (m/s) para los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional ..... 38

**Figura 68.** Condiciones internas de separación del caudal por islas (a) y áreas de almacenamiento (b) (MAGRAMA, 2011b) ..... 40

**Figura 69.** Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal (Tomado de Chow, 2004) ..... 41

## INDICE DE ABREVIATURAS

**UV:** Ultraviolet

**CIMNE:** Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

**CCS:** Consorcio de Compensación de Seguros

**CEDEX:** Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

**CVG:** Coeficiente de variación global

**CVL:** Coeficiente de variación local

**ES_I:** Edificaciones singulares (Iglesia)

**ES_L:** Edificaciones singulares (Casetas labranza)

**ESTRUC_FIJAS:** Puentes

**GEAMA:** Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente

**GEV:** Generalized Extreme Values

**HEC-RAS:** Hydrologic Engineering Centers-River Analysis System

**IGME:** Instituto Geológico y Minero de España

**IGN:** Instituto Geográfico Nacional

**IMDEA:** Instituto Madrileño de Estudios Avanzados

**INF_CAM:** Infraestructuras (Caminos Tierra)

**INF_CAR:** Infraestructuras (Carreteras)

**LIDAR:** Light Detection And Ranging

**m.s.n.m.:** Metros sobre el nivel del mar

**M_BAJO:** Monte bajo, arbolado y terrenos improductivos

**MAGRAMA:** Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

**MAS:** Dendro-Avenidas: Metodologías Avanzadas para el Estudio Dendrogeomorfológico de las Avenidas Torrenciales y los Riesgos Asociados

**MDE:** Modelo Digital de Elevaciones

**ML:** Maximum Likelihood

**MOM:** Method of Moments

**NO_CONST:** No construido

**NO_RUSTICO:** No rústico

**OAT:** One at a time

**PASTO:** Pastos

**PATRICOVA:** Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana

**PLANINPA:** Plan Especial de Protección Civil ante Inundaciones en el Principado de Asturias

**PNOA:** Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

**PWM:** Probability Weighted Moment

**Qc:** Caudal máximo medio diario

**Qci:** Caudal máximo instantáneo

**RTIN:** Right-Triangulated Irregular Network

**SEC:** Labor agrícola de secano

**SIGPAC:** Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas

**UPC:** Universitat Politècnica de Catalunya

**UB:** Universitat de Barcelona

**V1O:** Vivienda de una planta con ocupación ocasional

**V1P:** Vivienda de una planta ocupada de forma permanente

**V2O:** Vivienda de más de una planta con ocupación ocasional

**V2P:** Vivienda de más de una planta ocupada de forma permanente

## 1. RESUMEN

En este este estudio se lleva a cabo la valoración económica del riesgo de inundaciones en la localidad de Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia). La metodología aplicada, se basa en la integración de los factores de riesgo: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Para el estudio del peligro de inundación, mediante métodos hidrológico-hidráulicos se utiliza el análisis estadístico de caudales y el modelo hidráulico bidimensional Iber, con el cual se determina la extensión, profundidad y velocidad de la lámina de agua asociada a crecidas para diferentes períodos de retorno, y bajo tres condiciones topográficas caracterizadas por el desarrollo en tres etapas de una obra de mitigación (dique). El factor exposición, se evalúa a partir del registro catastral de ocupación urbana y rústica de la zona. El factor vulnerabilidad, se obtiene de la determinación de funciones magnitud-daño características para los elementos expuestos, que relacionan el peligro (calado y velocidad de inundación) con el probable daño a las personas y bienes expuestos. La integración de los factores de riesgo, permite establecer una estimación económica del riesgo asociado a la inundación en la zona de estudio. Adicionalmente, se comparan los resultados obtenidos, con el riesgo calculado en estudios previos para el mismo sector, aplicando un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS), permitiendo establecer puntos comunes y divergentes en el análisis del riesgo de inundación en la zona.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los estudios de inundación representan una fuente de información indispensable en la planificación hidrológica, tanto para las acciones encaminadas a gestionar el riesgo, como en los planes y proyectos de ordenamiento territorial, que requieren la toma de decisiones, para autorizar actividades o emplazamiento de infraestructuras o edificaciones cerca de los ríos.

Un estudio de inundación se refiere a la determinación de las áreas inundadas, y de las variables hidráulicas de la inundación (velocidad y calado) para diferentes condiciones de tránsito de avenidas, caracterizadas por la probabilidad de ocurrencia o período de retorno.

Para la estimación de estas variables, se dispone de diferentes métodos para el análisis de peligrosidad, entre los cuales se tienen los métodos hidrológicos e hidráulicos que persiguen, respectivamente, la estimación de caudales generados en una cuenca o corriente y el cálculo de las velocidades y calados con los que circularán por un determinado tramo fluvial (Díez, 2008a).

Dentro de los métodos hidrológicos, existen multitud de aproximaciones, desde métodos directos de estudio sobre los caudales registrados, hasta técnicas estocásticas para la generación de series sintéticas de caudales. Entre ellos, los más utilizados son aquellos que buscan la determinación de los cuantiles o "avenida de diseño", bien mediante fórmulas empíricas, análisis estadístico de caudales, o cálculos hidrometeorológicos (Pedraza y Díez, 1997).

Los métodos hidráulicos, parten de diferentes hipótesis de flujo (unifásico-bifásico, uni-bi-tridimensional, uniforme-variado, permanente-variable, laminar-turbulento, lento-rápido...) que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelizan, cuya resolución permite estimar diferentes parámetros (profundidad, velocidad, energía...) (Díez, 2008a).

En los últimos años, la metodología de estudios de este fenómeno ha evolucionado, teniendo como elemento trascendental el desarrollo de modelos numéricos, aplicaciones informáticas y ordenadores con mejores rendimientos de cálculo, que permiten la simulación de eventos de inundación para favorecer la obtención de información de calidad, que sumada a los Sistemas de Información Geográfica y estudios territoriales, brindan soporte para tener un panorama más amplio del problema y mejores elementos para la toma de decisiones.

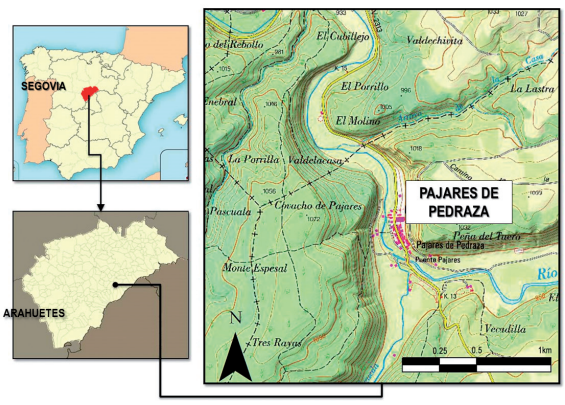
El desarrollo de este trabajo, tiene como finalidad la valoración del riesgo de inundaciones en la localidad de Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), teniendo como base fundamental, la aplicación de métodos hidrológicos e hidráulicos, cuyos resultados son clave para el análisis de factores de riesgo de inundación (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad), mediante los cuales se caracterizan las zonas inundables y elementos expuestos, en función del riesgo asociado a las avenidas de inundación para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas de la zona.

## 3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La localidad de Pajares de Pedraza pertenece al municipio de Arahuetes, en la provincia de Segovia, dentro de la comunidad autónoma de Castilla y León, España. Dicha localidad se sitúa entre las coordenadas 41° 9'52"- 41°10'7" longitud norte y 3°51'18" - 3°51'11" latitud oeste a una cota media de 940 m s.n.m., en el sector central del piedemonte septentrional de la Sierra de Guadarrama (Figura 1).

*Figura 1. Contexto geográfico de Pajares de Pedraza, Segovia. (Modificado de visor de imágenes IBERPIX, IGN 2014)*




El núcleo poblacional se ubica en una llanura limitada por dos cerros ubicados al oriente y al poniente de la misma, y se localiza

dentro de la demarcación hidrográfica del Duero. En este sector confluyen el arroyo Santa Águeda y el río Cega, siendo este último, el afluente principal que circula por el sector.

El río Cega nace en la vertiente norte de la Sierra de Guadarrama en el Puerto de Navafría de la provincia de Segovia, Posee una longitud de 149 km, el área de la cuenca hidrográfica es de 2.579 km² y la aportación media anual es de 232,1 hm³/año. A su paso por la zona de estudio, la pendiente promedio del cauce del río es de 0,06% y se encuentra entre 2 y 4 metros por debajo de la cota del núcleo poblacional, lo cual posibilita el desbordamiento del río hacia las planicies de inundación; se identifican también dos puentes que atraviesan transversalmente el río. La ubicación del núcleo poblacional de Pajares de Pedraza y las estructuras identificadas en su entorno se muestran en las figuras 2 y 3.

*Figura 2. Ubicación del núcleo poblacional en Pajares de Pedraza*

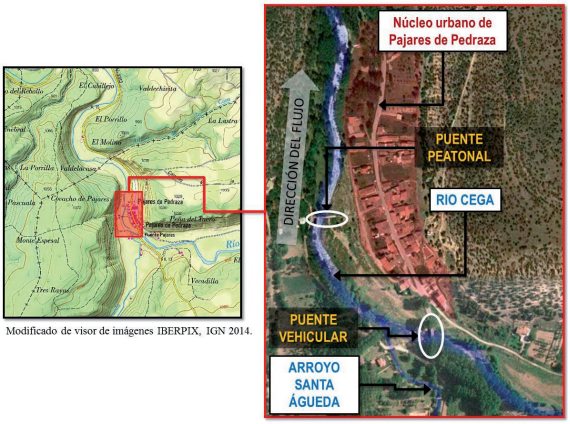
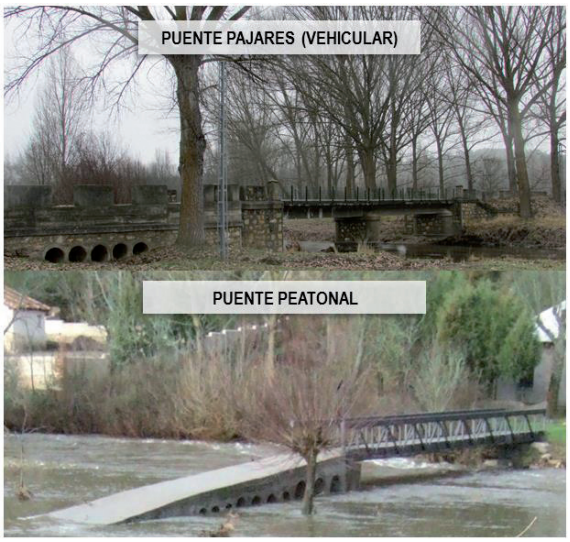



*Figura 3. Puentes que atraviesan el río Cega en la zona de estudio*



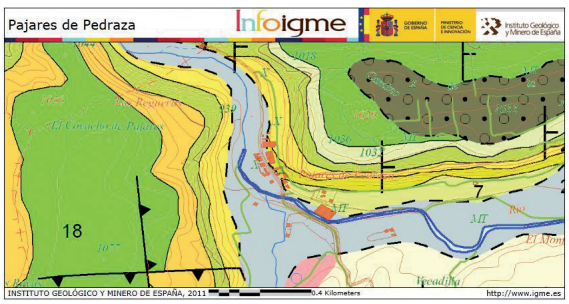

La población habitual de Pajares de Pedraza es de 17 habitantes según los datos obtenidos de la página web del Instituto Nacional de Estadística (*www.ine.es*); sin embargo, durante el verano esta cifra se incrementa hasta alcanzar los 200 habitantes aproximadamente.

### 3.1.1. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL EN EL ENTORNO DE PAJARES DE PEDRAZA

Pajares de Pedraza se asienta sobre la base de los materiales de edad cretácico (Cenomaniense – Santoniense) que orlan las rocas ígneas y metamórficas que conforman el Sistema Central. Estos materiales cretácicos pueden verse cubiertos por los depósitos cuaternarios de origen fluvial asociados a la dinámica del río Cega.

La localidad se situaría adjunta al piedemonte de la sierra, donde una de las múltiples fracturas que con orientación preferente NE-SO estructuran el Sistema Central, pone en contacto los materiales pre-hercínicos (en este caso concreto, leuconeises) con los depósitos mesozoicos, cretácico superior, que nos definen los pasos de la transgresión mesozoica, desde ambientes mareales ligados a los materiales cenomanienses (Facies de Arenas de Utrillas) hasta los ya meramente marinos (plataforma marina somera con episodios de exposición subaerea), y que con edad Santoniense están conformados por bancos de dolomías que culminan esta serie, y que presentan (en general toda la sucesión) una inclinación hacia el NO de alrededor de 15°. Ese buzamiento debe verse asociado a los esfuerzos tectónicos originados durante la orogenia alpina, los cuales aguas abajo de la localidad de Pajares de Pedraza han provocado una serie de pliegues laxos en la serie mesozoica (Figura 4) (IGME, 1972-2005).

*Figura 4. Geología y geomorfología de Pajares de Pedraza. (Fuente: Servicio de cartografía digital continua del IGME).*




Este tránsito entre los materiales pre-hercínicos y la serie cretácica, que se produce aguas arriba de la localidad de Pajares de Pedraza, a no más de 1.5 km del pueblo, provoca un claro cambio en la morfología del cauce. Un cauce que discurre fuertemente encajado en los materiales metamórficos, definiendo un pequeño cañón, para abrirse al transitar hacia los materiales cretácicos, en los cuales, sin abandonar el aspecto encañonado del valle, este se hace más amplio asociado a la menor resistencia a la erosión de los materiales que conforman la serie cretácica. Este cambio litológico tiene además otras consecuencias desde el punto de vista fluvial, produciéndose un claro cambio en la movilidad lateral del río, casi inexistente cuando el río Cega circula encajado en los leuconeises y mayor una vez que pasa a transitar sobre la serie mesozoica.

Esta capacidad de migración lateral del cauce es la que ha dado lugar a los depósitos cuaternarios que tapizan el fondo del valle, y que conforman tanto la llanura de inundación actual del río Cega como posibles retazos de antiguas terrazas fluviales del río.

La configuración actual del río Cega en el tramo de Pajares de Pedraza nos remite a una morfología de río *braided* – sinuoso. Pudiéndose apreciar claramente las características de río *braided* en la formación de barras fluviales de diversa tipología (tanto laterales como longitudinales) y conformadas por material heterométrico en el que predomina el de tamaño grava. Estas barras definen la presencia de canales múltiples en los que se puede diferenciar un canal principal y otros secundarios.

Junto a estas características de río *braided* se observa un cierto grado de sinuosidad en el canal, claramente expresado en el meandro que el río Cega desarrolla justo aguas arriba de la localidad. En el desarrollo de este meandro pueden observarse varías de las características morfológicas de los mismos, presencia de surcos y crestas asociados al crecimiento de la barra de meandro, alguno de los cuales (surcos) muestran evidencias de haber funcionado durante momentos de crecida como canales secundarios. E incluso puede observarse también la presencia de un canal secundario de amplio desarrollo, que parece asociado a un proceso de avulsión en el meandro, y que actualmente se encuentra ligeramente desconectado del canal principal, mostrando una elevación de la base del canal superior a la mostrada por el canal principal, lo cual es una clara evidencia de su funcionamiento como canal secundario en momentos de crecidas.

A su paso por Pajares de Pedraza, el cauce del río Cega muestra un tramo de menor sinuosidad, casi rectilíneo, y que se ha visto favorecido en el desarrollo de su morfología por ciertos retoques antrópicos en el cauce, encaminados a fijar la posición del canal y tratar de prevenir el desbordamiento del mismo y por tanto la peligrosidad por desbordamiento fluvial en el entorno del pueblo. En este tramo predominan las barras laterales. Cabe mencionar por último, también en el tramo de río que se localiza a la altura del pueblo, la presencia de un *levee* (de origen antrópico) que limita la extensión de la llanura de inundación en la margen derecha del río (la más próxima al pueblo) y cuyos efectos sobre la dinámica fluvial y de inundaciones sobre la localidad de Pajares de Pedraza entran dentro de los objetivos de este trabajo.

## 3.2. PROBLEMÁTICA DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (ARAHUETES, SEGOVIA)

La problemática de inundaciones en Pajares de Pedraza, se presenta como una situación con diferentes elementos que ponen de manifiesto la importancia de desarrollar un estudio de inundaciones en la zona:

- Históricamente, el río Cega a su paso por Pajares de Pedraza, ha ocasionado de forma recurrente inundaciones en el sector. Años como 1927, 1991, 1996, 2001, 2013 o 2014 son sólo algunos ejemplos de eventos extremos que supusieron inundaciones considerables en la localidad. En el 96, la lámina de agua superó el metro de altura anegando todos los bajos de las casas a su paso, causando así daños considerables desde el punto de vista económico. Además, tras un episodio de avenida el río desborda por la llanura de inundación, sobrepasa la carretera principal y se dirige hacia el pueblo, dejando inutilizable la principal vía de evacuación y socorro (Reverte, 2013).

- Para disminuir las afectaciones en el núcleo urbano, la Confederación Hidrográfica del Duero construyó un dique. Esta obra de protección comprende dos etapas de construcción longitudinal: la primera de ellas se concluyó en 2006; pero ante las inundaciones de 2013 se ejecutó una segunda etapa de prolongación del dique en el año 2013-14 (Figuras 5 y 6).

*Figura 5. Obra de mitigación (dique) construido al margen derecho del río Cega*

*Figura 6. Ubicación y etapas de desarrollo de la obra de mitigación (dique) construido al margen derecho del río Cega*

- Otro elemento que justifica la realización del estudio en esta zona, es la disponibilidad de datos sistemáticos de caudales registrados por una estación de aforos sobre el río Cega en Pajares de Pedraza, que opera desde 1912, y que representan la serie para la determinación de caudales para diferentes períodos de retorno por análisis estadístico de valores extremos.

En el Anexo 1 de este documento, se presenta una galería fotográfica que ilustra la problemática de inundaciones en Pajares de Pedraza.

## 3.3. ANTECEDENTES

Como antecedentes al presente trabajo, se tienen primeramente una serie de estudios y artículos desarrollados en los años 2012 a 2013 en el marco del proyecto "Metodologías Avanzadas para el Estudio Dendrogeomorfológico de las Avenidas Torrenciales y sus Riesgos Asociados" (MAS Dendro-Avenidas), donde se desarrolla la temática de investigación en torno a la reconstrucción de caudales de avenidas a partir de la información contenida en los árboles inclinados de las márgenes fluviales, siendo Pajares de Pedraza una de las zonas que reunía características técnicas acorde a los objetivos de dichos estudios (Ballesteros-Canovas et al., 2012a, b, 2013a, b; Díez et al., 2013a, b; González, 2013.

Otro antecedente es el trabajo fin de máster inédito titulado *Análisis del riesgo económico por avenidas e inundaciones en Pajares de Pedraza* (Reverte, 2013). En este estudio, se realizó un análisis estadístico de caudales, con ajuste paramétrico de funciones de distribución de frecuencias, a partir de la serie temporal de datos proporcionada por la Confederación Hidrográfica del Duero, consistente en Caudales Máximos Medios Diarios ($Q_c$) y Caudales Máximos Instantáneos ($Q_{ci}$) desde el año 1912 hasta 2008, con el objetivo de obtener los valores de caudales punta para diferentes períodos de retorno, correspondientes a los diferentes escenarios de análisis.

Los caudales obtenidos del análisis estadístico, fueron uno de los datos de entrada para el modelo hidráulico unidimensional que se desarrolló con el Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Centers-River Analysis System, HEC-RAS) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers), obteniendo como resultado los mapas de peligro de inundación en la zona de estudio.

A partir de la proyección del área inundada y los elementos expuestos, se cuantificó el riesgo asociado a la ocurrencia de inundaciones para los diferentes escenarios modelados.

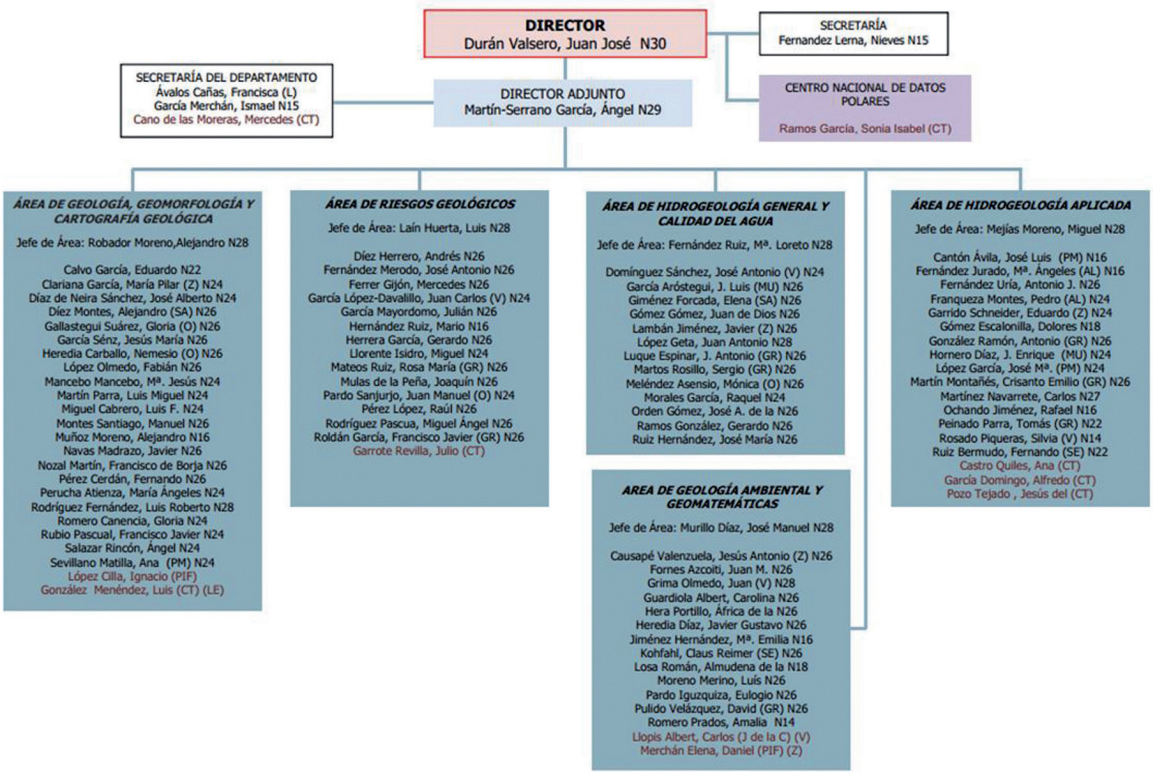
Estos antecedentes, y algunos de los productos científicos de los mismos, sirvieron de base para el desarrollo del presente trabajo.

## 3.4. DESCRIPCIÓN DE RELACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CON EL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME), DEPARTAMENTO Y ORGANIGRAMA

El proyecto de investigación "VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD", se lleva a cabo en el marco del convenio específico de colaboración entre la Fundación IMDEA Agua y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para el desarrollo de actividades de investigación sobre eventos hidrológicos extremos.

La investigación se desarrolló dentro del Área de Riesgos Geológicos del Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica (Figura 7), bajo la coordinación de los doctores Julio Garrote Revilla y Andrés Díez (IGME), entre los meses de noviembre y mayo de 2014.

*Figura 7. Organigrama del Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica del IGME.*




*Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2014.*

## 4. OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

- Cuantificar el riesgo de afectación por inundaciones en la zona poblacional de Pajares de Pedraza, mediante la aplicación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para diferentes períodos de retorno.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar las zonas inundables para diferentes periodos de retorno utilizando un modelo hidráulico bidimensional y diferentes escenarios y configuraciones topográficas.
- Calcular los parámetros de la magnitud de la inundación (calado, velocidad...) de forma distribuida en toda el área inundable.
- Analizar la sensibilidad del modelo hidráulico bidimensional ante las variaciones del parámetro rugosidad.
- Obtener un análisis comparativo entre los resultados previos de la integración del riesgo a partir del análisis hidráulico unidimensional, con los resultados obtenidos en base al análisis hidráulico bidimensional.
- Cuantificar los daños provocados por inundaciones en la localidad de Pajares de Pedraza para diferentes períodos de retorno.
- Desarrollar mapas de peligrosidad de inundación para personas, edificaciones y vehículos en la localidad de Pajares de Pedraza, para diferentes períodos de retorno, como herramienta para la gestión de usos de suelo en la zona.
- Analizar la efectividad de las medidas de mitigación (construcción de dique) para evitar inundaciones futuras.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología empleada para la valoración del riesgo en Pajares de Pedraza se basa en la integración del riesgo a partir del análisis de los factores: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad asociadas a las condiciones de susceptibilidad de inundación en la zona de estudio (Figura 8).

*Figura 8. Esquema general de la metodología empleada (Modificado de Ayala, 1993)*

### 5.1. FACTOR PELIGROSIDAD

El análisis del factor peligrosidad de inundaciones en este estudio, consiste en determinar los tiempos de retorno, severidad del peligro y la distribución geográfica asociada al mismo.

*Tiempo de retorno:* Se refiere a la periodicidad o frecuencia con que se repiten avenidas que provocan inundación en la zona. En este estudio se toman los períodos de retorno de 5, 25, 50, 100 y 500 años, que son los habituales en el diseño de infraestructuras y en planificación del agua y protección civil, con sus correspondientes caudales. Estos datos vienen dados por los resultados del análisis estadístico de caudales pico, para la determinación de caudales para diferentes períodos de retorno (Reverte, 2013), representando las condiciones de entrada al modelo hidráulico.

*Severidad del peligro y distribución geográfica:* Estas características están determinadas por el calado o profundidad de la lámina de agua de inundación, velocidad de flujo y distribución espacial en el área de estudio. Para esta investigación, estas características del peligro de inundaciones se obtienen de la modelación hidráulica usando el modelo matemático bidimensional Iber para la simulación de flujo en ríos y estuarios, promovido por Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña), el Grupo Flumen (de la *Universitat Politècnica de Catalunya* UPC y de la *Universitat de Barcelona* UB) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (vinculado a la Universidad Politécnica de Cataluña UPC).

El modelo hidráulico bidimensional Iber incorpora como esquema numérico el método de alta resolución de Volúmenes Finitos, mediante el cual se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad o ecuaciones de Saint Venant (CEDEX el al., 2012; Bladé, 2014), de tal manera que la solución considera las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal; mientras que las varia-

ciones de velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor (Elera, 2005).

Con el objetivo de desarrollar un análisis comparativo, se retoman los resultados del estudio *Análisis del riesgo económico por avenidas e inundaciones en Pajares de Pedraza* (Reverte, 2013) que utiliza para la obtención de los parámetros hidráulicos de las avenidas, el modelo unidimensional HEC-RAS que incorpora como esquema numérico el método de diferencias finitas, resolviendo las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión mediante un sistema de derivadas parciales formado por la ecuación de continuidad y la de conservación de la cantidad de movimiento (Cuervo, 2012); esta solución numérica se plantea entre las secciones transversales que conforman el modelo, asumiendo que la dimensión longitudinal a lo largo del eje del río o canal, prevalece sobre las otras dos, y los cálculos de calado y velocidad promedio en los elementos finitos en los que se divide la sección transversal representarán los valores medios para toda la sección, despreciando la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente (Elera, 2005). Para más detalle de los fundamentos de cálculo de los modelos hidráulicos mencionados, pueden consultarse los manuales de referencia hidráulica correspondientes, que se citan en la bibliografía de este documento (CEDEX el al., 2012; Bladé, 2014; Brunner, 2010).

Para la creación de la geometría utilizada en el modelo hidráulico bidimensional, se utiliza un modelo digital de elevación (MDE) con resolución de paso de malla de 1 m, proveniente del tratamiento de los datos LIDAR originales (ficheros. *las*), para la eliminación del ruido provocado por la vegetación, así como de las estructuras transversales al canal; del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del España, con una densidad media de 0.5 ptos/m$^2$.

Por otra parte, en la asignación de la distribución de rugosidad en la malla de cálculo del modelo hidráulico, se utiliza un mapa de distribución de rugosidades que procede de los estudios desarrollados en el marco del proyecto MAS Dendro-Avenidas (2013) en Pajares de Pedraza. La asignación de la rugosidad del suelo (parámetro n de Manning) se ha lleva a cabo en dos fases: en primer lugar a partir de foto-interpretación sobre la orto-imagen del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), que para la zona de estudio corresponde con el año 2005, delimitándose las principales agrupaciones del terreno en función de su cobertura vegetal y relacionándolos con las clasificaciones generales que sobre este parámetro se han propuesto (Arcement and Schneider, 1989; Brunner, 2010). Posteriormente, la delimitación obtenida en la primera fase ha sido cotejada mediante trabajo de campo en la zona de estudio, definiéndose así finalmente los distintos valores del parámetro n de Manning, siguiendo el criterio propuesto por Chow V.T (2004) para los cauces y para las llanuras de inundación, adaptándolos al contexto de la zona de estudio, para ser utilizados en la modelización hidráulica 2D.

### 5.1.1. ESCENARIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO

Dadas las condiciones de la zona de estudio y los objetivos trazados para esta investigación, se toman en consideración diferentes variables para generar los escenarios de simulación de inundación en Pajares de Pedraza con el software Iber. Las variables determinantes para establecer los escenarios son las siguientes:

- Los períodos de retorno de 5, 25, 50, 100 y 500 años.
- Las modificaciones en el terreno por el desarrollo de obras de mitigación en la zona (dique):
  - Condición 1: Sin dique.
  - Condición 2: Dique construido (Primera Etapa).
  - Condición 3: Dique construido (Segunda Etapa).
- Variación del parámetro rugosidad para evaluar la sensibilidad del modelo.

En la Tabla 1, se detallan los diferentes escenarios que toman en cuenta estas variables y que se modelan en este estudio.

*Tabla 1. Escenarios de simulación en Pajares de Pedraza*

| Condición | Periodo de retorno (años) | Rugosidad inicial | Rugosidad incrementada 25% | Rugosidad disminuida 25% |
|---|---|---|---|---|
| Sin dique | 5 | X | X | X |
| | 25 | X | | |
| | 50 | X | | |
| | 100 | X | | |
| | 500 | X | X | X |
| Dique construido (Primera Etapa) | 5 | X | X | X |
| | 25 | X | | |
| | 50 | X | | |
| | 100 | X | | |
| | 500 | X | X | X |
| Dique construido (Segunda Etapa) | 5 | X | X | X |
| | 25 | X | | |
| | 50 | X | | |
| | 100 | X | | |
| | 500 | X | X | X |

En el Anexo 2 de este estudio se presenta el proceso detallado de elaboración de los escenarios simulados en el modelo hidráulico bidimensional Iber.

#### 5.1.1.1. Metodología para el análisis de sensibilidad del modelo hidráulico

El procedimiento utilizado para el análisis de sensibilidad del modelo hidráulico, está basado en la metodología de variación de parámetros "uno a la vez" (*one-at-a-time*, OAT) (Saltelli et al., 2000, citado en Rebolledo, 2014; Escobar, 2010), mediante la determinación de los coeficientes de variación local ($CV_L$) y variación global ($CV_G$), que indican la discrepancia de la solución del modelo, incrementando y disminuyendo el parámetro rugosidad en un 25%, con respecto a la solución de referencia o solución patrón. Esta metodología se aplicará para los resultados de calado y velocidad de los períodos de retorno de 5 y 500 años.

El $CV_L$ se define de acuerdo a la siguiente relación:

$$CV_L = \frac{[V_f - V]}{V}$$

Dónde:

$CV_L$: Coeficiente de variación local

$V_f$: Valor de la variable en escenario patrón (rugosidad inicial)

$V$: Valor de la variable en escenario modificado (rugosidad incrementada o disminuida)

El $CV_L$ se calcula en cada una de las celdas que conforman la proyección espacial de los resultados de calado y velocidad para los diferentes escenarios de análisis.

El $CV_G$ se define de acuerdo a la siguiente relación:

$$CV_G = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} CV_{Li}$$

Dónde:

$CV_G$: Coeficiente de variación global

$n$: Número total de celdas de la malla de cálculo

$CV_{Li}$: Coeficiente de variación local de cada celda de la malla de cálculo

La obtención de estos parámetros y su correspondiente distribución espacial, sirven como fuente de información para el análisis de sensibilidad del modelo hidráulico.

Dentro de este análisis también se evalúa la sensibilidad del modelo hidráulico a las variaciones del parámetro rugosidad, en función del calado máximo obtenido bajo las condiciones iniciales de rugosidad. Esto se logra mediante el análisis de las zonas en las que se tienen valores de $CV_L$ mayores (tanto para el calado como para la velocidad) y el calado máximo correspondiente a la condición de rugosidad sin ser variada.

## 5.2. FACTOR EXPOSICIÓN

El factor exposición se determina utilizando Sistemas de Información Geográfica para el manejo y explotación de los datos de catastro urbano y rústico de la zona de Pajares de Pedraza, solicitados a la Dirección General de Catastro del Ministerio de Economía y Competitividad, usando la misma clasificación por categorías que se utilizó en el proyecto "Metodologías Avanzadas para el Estudio Dendrogeomorfológico de Avenidas Torrenciales y sus Riesgos Asociados" (MAS Dendro-Avenidas, 2013), y que también fue utilizada en el análisis de riesgo a partir del modelo hidráulico unidimensional (Reverte, 2013).

El proceso consiste, en utilizar los datos del catastro urbano y rústico, para determinar los elementos que se encuentran expuestos dentro de la zona de estudio. La reclasificación por categorías, utiliza el criterio de clasificación de los elementos expuestos bajo una misma tipología en función de características comunes de los bienes.

## 5.3. FACTOR VULNERABILIDAD

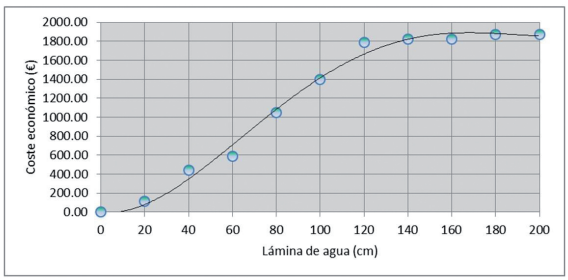
El análisis de este factor se basa en determinar una relación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos ante las variaciones de los parámetros que definen el factor peligrosidad. La metodología consiste en la aplicación de dos análisis:

**Vulnerabilidad en función del calado:**

Se fundamenta en un análisis utilizando funciones calado-daño específicas (MAS Dendro-Avenidas, 2013), que consisten en gráficos y tablas que relacionan el calado máximo de inundación con el porcentaje de daño que ocasionan en cada elemento expuesto y su correspondiente valor monetario (Figura 9). Se cuenta con funciones calado-daño para cada categoría establecida en el factor exposición del análisis de riesgo.

*Figura 9. Ejemplo de función de vulnerabilidad elemental*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| CASETAS | | | | | | | | | | | | | |
| | MAQUINARIA AGRICOLA | 1000 | 0 | 0 | 0.15 | 0.25 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| | PUERTA EXTERIOR | 250 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| | CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | 600 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | TOTALES | | 0 | 85 | 325 | 437.5 | 775 | 1037.5 | 1325 | 1350 | 1350 | 1387.5 | 1387.5 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 35% de perdidas directas | | 0 | 29.75 | 113.75 | 153.13 | 271.25 | 363.13 | 463.75 | 472.5 | 472.5 | 485.63 | 485.63 |




Cabe destacar, que en el análisis del factor vulnerabilidad para el catastro rústico, se tiene en cuenta la variación estacional del desarrollo de labor agrícola ya que según los registros históricos de inundaciones, los eventos de desbordamiento ocurren más frecuentemente en la época en la que el desarrollo de esta actividad se mantiene inactiva, lo cual se traduce en una menor valoración económica de dichos elementos. Por tanto, para la definición de este factor de riesgo se establecerán ambos escenarios, tanto la consideración de que el caudal punta ocurre en la época en que se tiene inactividad de labores agrícolas de secano (vulnerabilidad nula), como el escenario en el que las labores se encuentran en su máximo desarrollo (vulnerabilidad crítica).

Esta metodología ha sido aplicada en el análisis de vulnerabilidad en diferentes estudios, algunos de los cuales sirvieron de base para la determinación de las funciones magnitud-daño en el desarrollo del proyecto MAS Dendro-Avenidas en Pajares de Pedraza, tales como el *Plan Especial de Protección Civil ante Inundaciones en el Principado de Asturias (PLANINPA, 2010)*, *Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana* (PATRICOVA, 2003), *Economic Costs of Natural Disasters in Australia* (Australian Government, 2001), *River flood damage assessment using IKONOS imagery* (Van Der Sande, 2001), *Narrabeen Lagoon Floodplain Risk Management Plan (Smec, 2002)*, *An overview of flood actions on buildings* (Kelman y Spence, 2004), *Assessment of vulnerability to flood impacts and damages* (Nakamura, Hutton, Kunbao y Gavidia, 2001) y *Disaster Loss Assessment Guidelines* (Queensland Government, 2002).

**Vulnerabilidad en función de la combinación calado-velocidad:**

Este análisis consiste en la determinación de funciones de vulnerabilidad que toman en cuenta la resistencia y estabilidad de las personas ante el flujo de agua, en función de las condiciones hidráulicas de calado y velocidad, así como condiciones típicas de daño estructural en edificios, estructuras ligeras y peligro para vehículos (Díez, 2008b).

## 5.4. INTEGRACIÓN DEL RIESGO

Esta etapa de la metodología, se basa en usar Sistemas de Información Geográfica para recopilar los resultados de los factores analizados, con el objetivo de determinar el riesgo asociado a la vulnerabilidad de los elementos expuestos al peligro de inundación, en Pajares de Pedraza, para los diferentes escenarios de riesgo que se analizan.

El proceso de integración consiste en intersectar los datos del factor peligro (calado y velocidad) con los elementos expuestos (personas, catastro urbano y rústico) y la vulnerabilidad de los mismos ante el peligro, para obtener una valoración del riesgo de inundaciones, tanto cuantitativo (económico) como cualitativo en la zona, este proceso se esquematiza en la figura 10.

*Figura 10. Esquema de integración de los factores de riesgo de inundación*

*Modificado de Estrategia Nacional de Cambio Climático. (SEMARNAT, 2013).*

### 5.4.1. METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE INTEGRACIÓN DEL RIESGO A PARTIR DE MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONALES Y BIDIMENSIONALES

La metodología de comparación de resultados obtenidos entre modelos hidráulicos, se basa en el análisis de los siguientes parámetros:

- Valor obtenido de la integración de los factores de riesgo para la zona de estudio.
- Distribución espacial y magnitud de calado máximo de simulación, utilizando la misma metodología de determinación de coeficientes de variación que se describe en el apartado 5.1.1.1 tomando como valor patrón el resultado del modelo bidimensional.
- Promedio de velocidad máxima en el cauce del río

Para llevar a cabo el análisis comparativo, se toman en consideración únicamente los siguientes escenarios comunes en ambos modelos hidráulicos de simulación:

- Escenario topográfico con dique construido en toda su longitud (segunda etapa)
- Caudales de simulación correspondientes a los períodos de retorno de 50 años (126 $m^3/s$), 100 años (151 $m^3/s$) y 500 años (218 $m^3/s$).

En el cálculo de integración del riesgo para ambos modelos, se toman en cuenta las dos condiciones descritas en la metodología de análisis de vulnerabilidad, tanto la situación crítica de daño máximo en ocupación rústica si la avenida se tuviese en la época de mayor actividad de laboreo de secano, como en la situación menos desfavorable de ocurrencia en época de inactividad en ese uso de suelo.

# 6. RESULTADOS

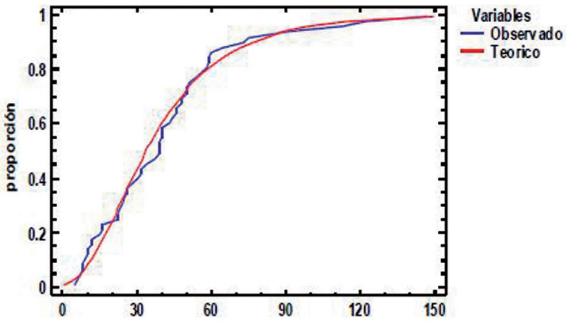
En este apartado, se exponen los resultados obtenidos de la metodología de análisis de factores de riesgo e integración de los mismos, para la determinación del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza.

## 6.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PELIGROSIDAD

Tal y como se describe en la metodología aplicada, en la etapa de determinación del factor peligrosidad de inundación se utiliza el modelo hidráulico bidimensional Iber, que requiere, entre otros datos, la determinación de las condiciones de contorno a la entrada del modelo, que para el caso de este estudio vienen dadas por los caudales de entrada asociados a los diferentes períodos de retorno. Estos datos provienen del análisis estadístico de series muestrales de caudal medio máximo ($Q_c$) y caudal máximo instantáneo ($Q_{ci}$), aplicando las funciones de distribución de frecuencias Gumbel y distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV, *Generalized Extreme Value*), con los

métodos de ajuste de parámetros de Máxima Verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), Método de los Momentos (MOM, *Method of Moments*) y Momentos Ponderados por la Probabilidad (PWM, *Probability Weighted Moment*). Los resultados obtenidos, son sometidos a un análisis de error cuadrático mínimo, de donde se obtiene que la distribución GEV con el método de Máxima Verosimilitud (ML) se ajusta mejor a la serie muestral $Q_{ci}$ (Figura 11) (Reverte, 2013).

*Figura 11. Cuantiles de la función GEV (ML) para la serie muestral Qci (Reverte, 2013)*




Los caudales punta para los diferentes períodos de retorno que serán analizados, se muestran en la tabla 2.

*Tabla 2. Caudales y períodos de retorno de simulación (Reverte, 2013)*

| Periodo de retorno | Caudal ($m^3/s$) |
|---|---|
| 5 años | 59 $m^3/s$ |
| 25 años | 104 $m^3/s$ |
| 50 años | 126 $m^3/s$ |
| 100 años | 151 $m^3/s$ |
| 500 años | 218 $m^3/s$ |

La ejecución del modelo hidráulico bidimensional, con los caudales asociados a los diferentes períodos de retorno, proporciona como resultado diferentes mapas que representan gráficamente la distribución de calado máximo, velocidad máxima y el producto de velocidad por calado para los diferentes escenarios de simulación, obteniéndose 15 mapas de cada clase. En el Anexo 3 del presente trabajo se encuentra la colección de mapas de peligro de inundación para diferentes períodos de retorno.

Dentro de los resultados obtenidos en el factor peligrosidad, se exponen también las diferencias entre cada uno de los escenarios topográficos, con el objetivo de facilitar el análisis comparativo de resultados. En las figuras 12 a 16 se presentan los mosaicos comparativos de los resultados de calado máximo y velocidad máxima obtenidos.

*Figura 12. Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 5 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

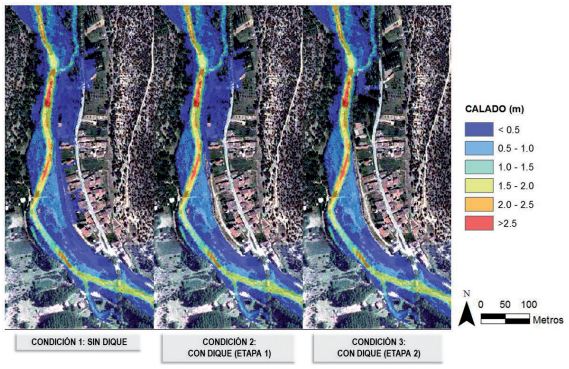



*Figura 13. Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 25 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

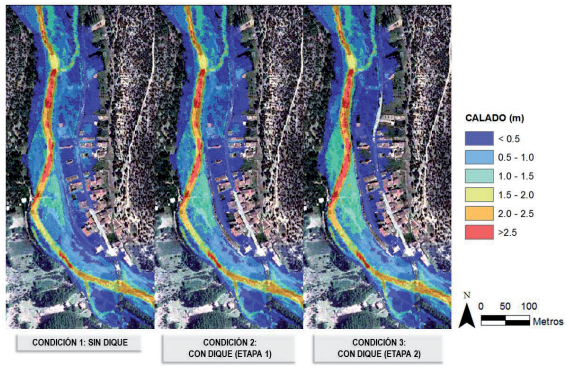



*Figura 14. Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 50 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

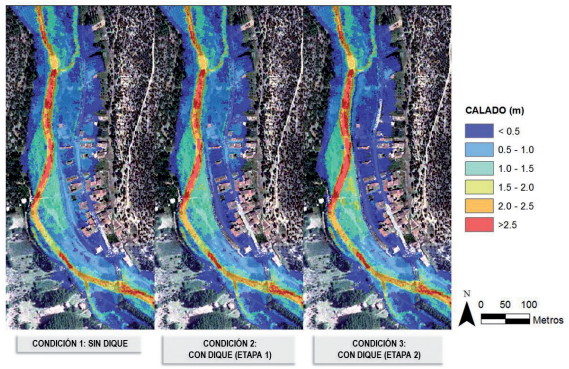


*Figura 15. Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 100 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

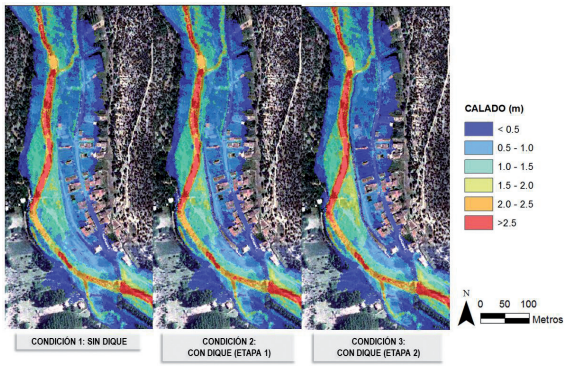
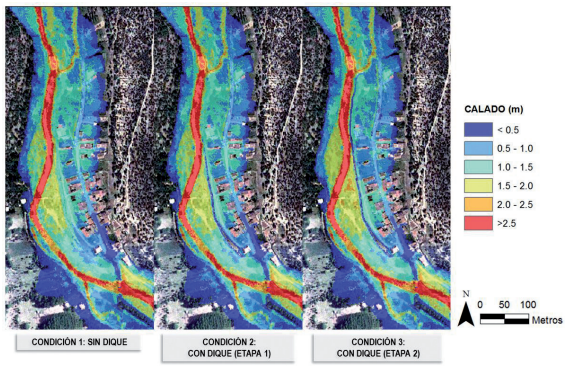



*Figura 16. Mosaico comparativo de calado máximo para el período de retorno de 500 años en los tres escenarios topográficos evaluados*




A partir de estos resultados que caracterizan el factor peligrosidad con respecto al parámetros calado, se observa que el efecto del desarrollo de las dos etapas del dique en la distribución espacial de lámina de inundación asociada al período de retorno de 5 años, posibilita la disminución de las zonas inundadas dentro del pueblo.

En los resultados de calado de la lámina de inundación correspondiente a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, a pesar de no observase una disminución en las áreas inundadas dentro del pueblo, si es apreciable que el calado de dichas zonas disminuye sensiblemente con el desarrollo de la primera y segunda etapa del dique, en contraste con el resultado que se obtiene para la lámina de inundación asociada al período de retorno de 500 años, donde no se observan variaciones en la distribución espacial de la extensión de la inundación, ni variaciones en el calado asociado a la misma.

En las figuras 17 a 21 se presentan los mosaicos comparativos de los resultados de calado máximo y velocidad máxima obtenidos.

*Figura 17. Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 5 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

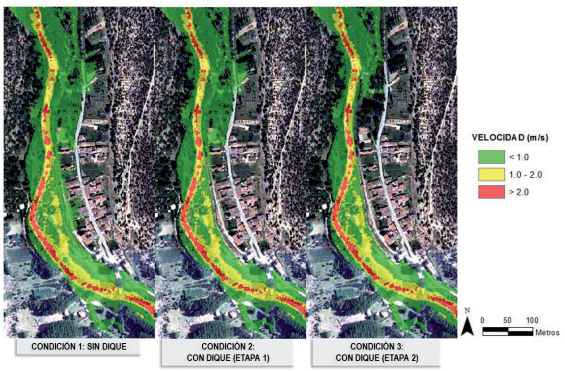



*Figura 18. Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 25 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

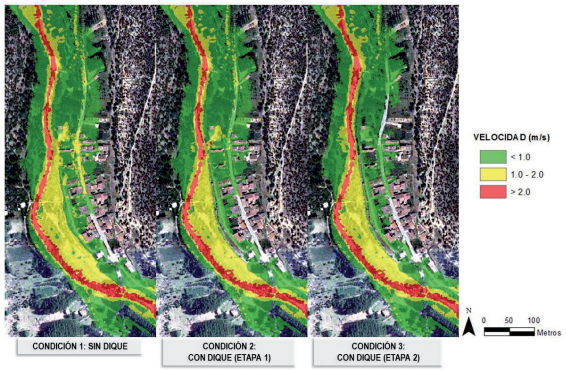



*Figura 19. Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 50 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

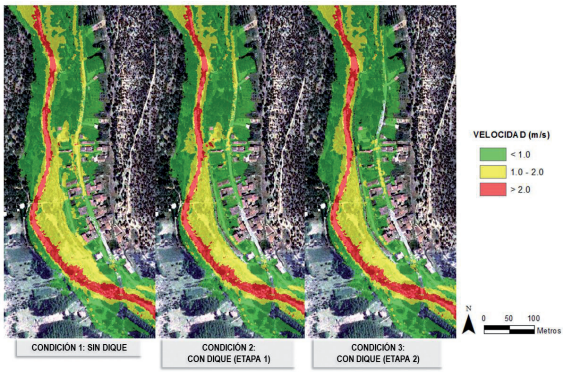


*Figura 20. Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 100 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

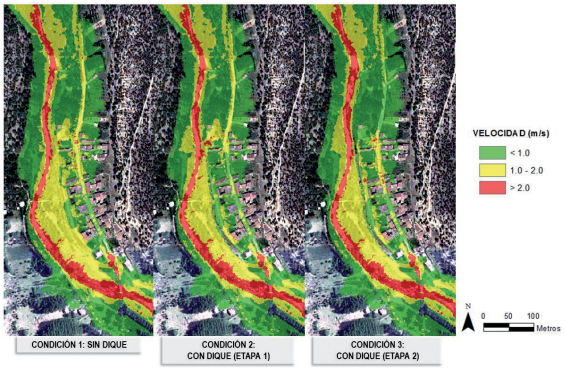
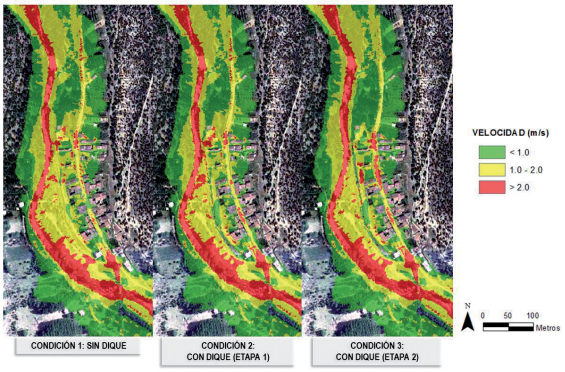



*Figura 21. Mosaico comparativo de velocidad máxima para el período de retorno de 500 años en los tres escenarios topográficos evaluados*

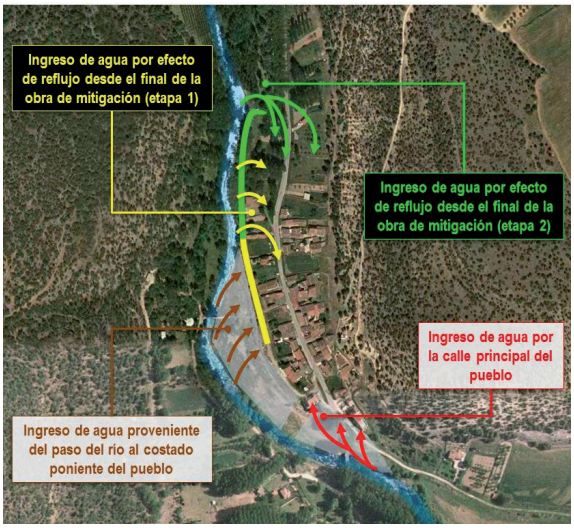



En el caso de los resultados obtenidos del parámetro velocidad, para las avenidas de inundación asociadas a los períodos de retorno de 5, 25 y 50 años, es notable el beneficio que se alcanza al disminuir la velocidad de la corriente de flujo dentro del pueblo. Sin embargo, en las avenidas de inundación que corresponden a los períodos de retorno de 100 y 500 años, se observa un incremento de la velocidad máxima registrada en la calle principal del pueblo, que representa la principal vía de escape y evacuación.

También es importante destacar, que los resultados de calado y velocidad reflejan que el desarrollo de la obra de mitigación y su función de restringir el libre tránsito de la avenida, ocasionan una concentración del flujo al costado poniente de la estructura, provocando un incremento del calado y velocidad en dicho sector, observándose mayores incrementos en el cauce del río y en las planicies de inundación en los márgenes del mismo.

La dinámica de flujo descrita a partir de los resultados del modelo hidráulico bidimensional, permiten identificar tres zonas de entrada de la lámina de agua (ingreso por la calle principal a la entrada del pueblo, ingreso desde el costado poniente del núcleo urbano y reflujo desde aguas abajo en función de la etapa de desarrollo del dique) que posibilitan la inundación en Pajares de Pedraza. Este comportamiento de la distribución del flujo de entrada en el pueblo se esquematiza en la figura 22.

*Figura 22. Zonas identificadas de ingreso de agua hacia el núcleo poblacional*




### 6.1.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL MODELO HIDRÁULICO

La ejecución del modelo hidráulico bidimensional en Iber, incrementando y disminuyendo en un 25% los valores del parámetro rugosidad (n de Manning) inicialmente asignados, para los diferentes escenarios topográficos planteados, permite obtener una serie de resultados en formato ráster que son de utilidad para determinar el grado de influencia de este factor en los resultados finales, mediante el cálculo y evaluación espacial del coeficiente de variación (CV).

Los mapas de calado máximo y velocidad máxima obtenidos en los escenarios de variación del parámetro rugosidad, se muestran en el Anexo 4 de este documento.

En las figuras 23 a 34, se presenta la distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de los resultados de calado y velocidad, dentro de la zona de estudio.

*Figura 23. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 1: Sin dique)*

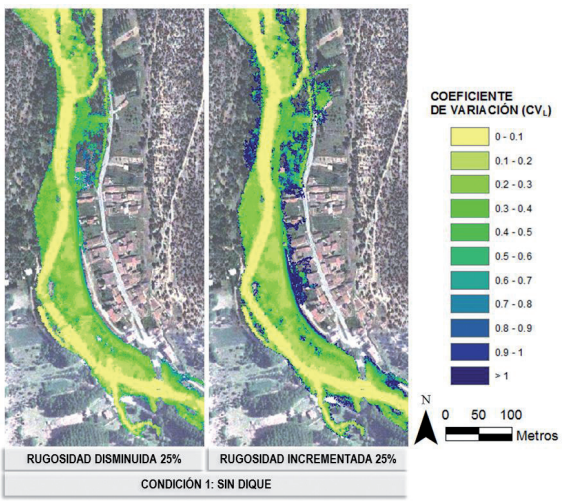


*Figura 24. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 1: Sin dique)*

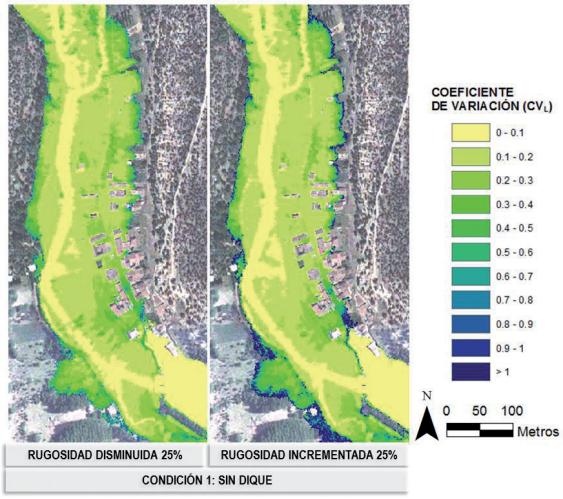



*Figura 25. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 1: Sin dique)*

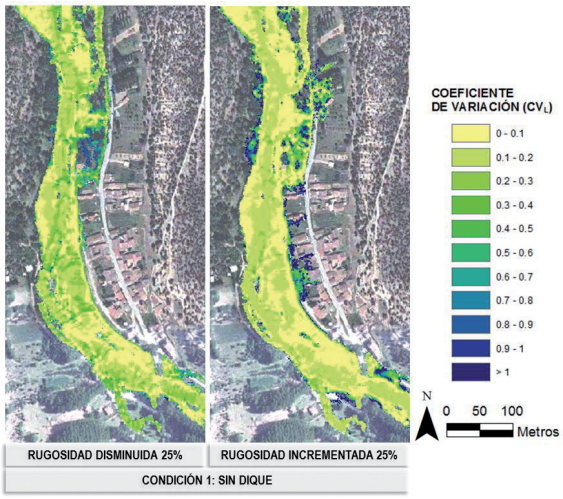



*Figura 26. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 1: Sin dique)*

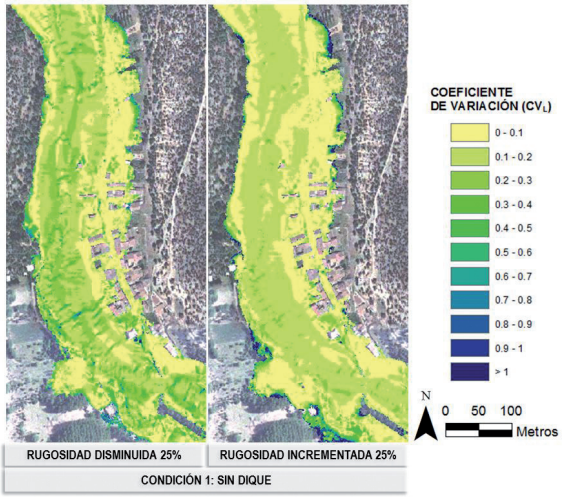



*Figura 27. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1)*

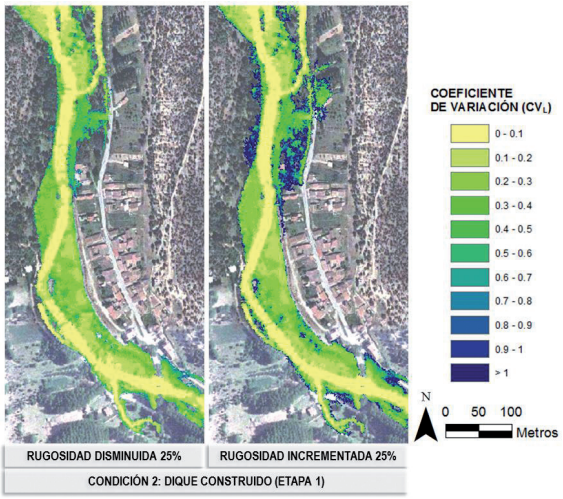


*Figura 28. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1)*

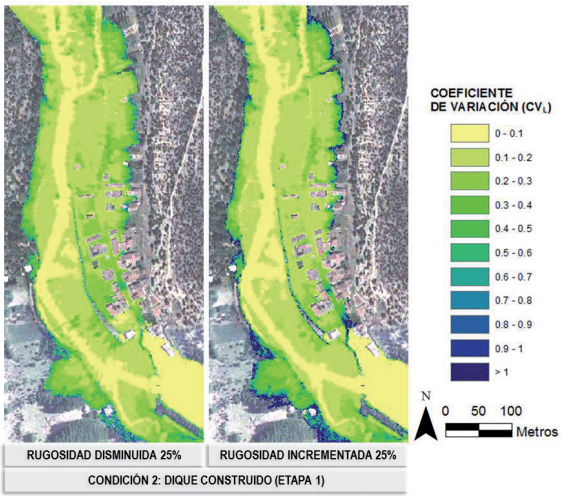



*Figura 29. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1)*

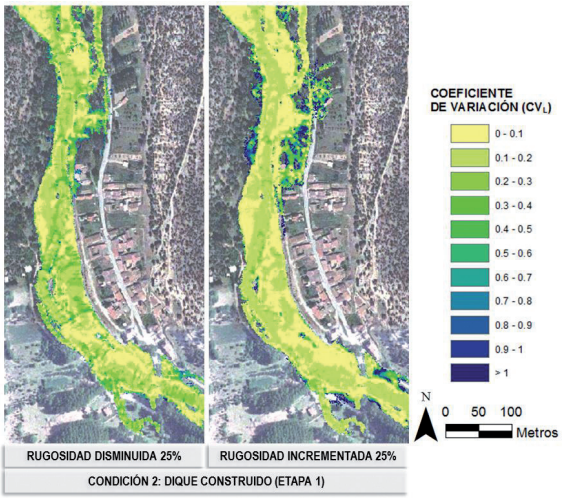



*Figura 30. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 2: Dique construido, etapa 1)*

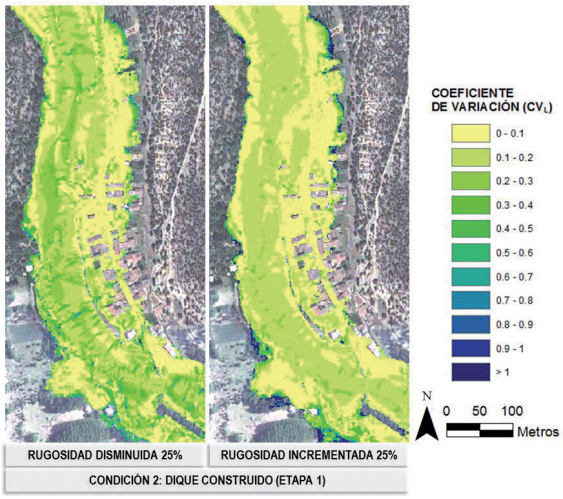



*Figura 31. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2)*

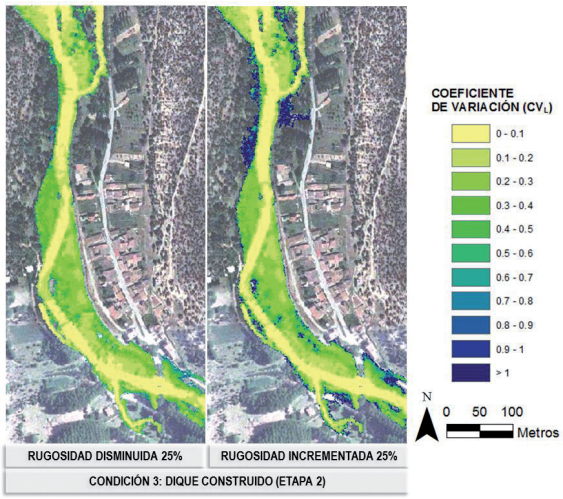


*Figura 32. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) del calado, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2)*

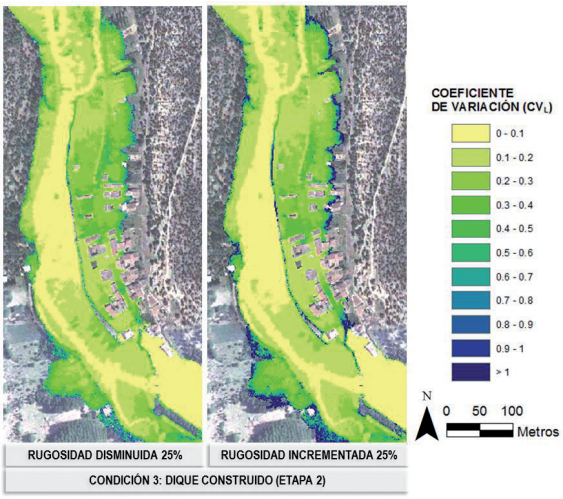



*Figura 33. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local (CVL) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 5 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2)*

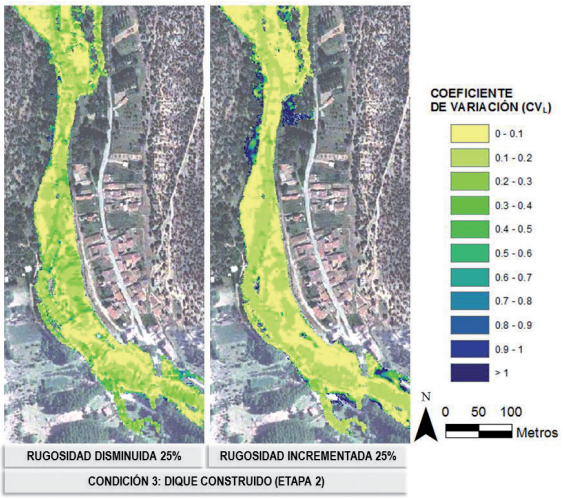
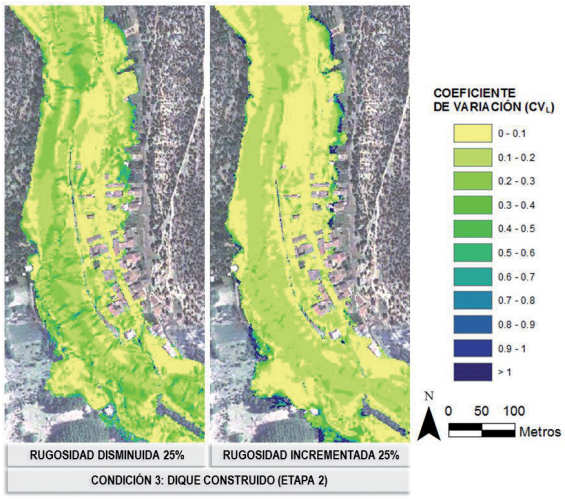



*Figura 34. Distribución espacial del Coeficiente de Variación Local ($CV_L$) de la velocidad, en función de la rugosidad, para el período de retorno de 500 años (Condición 3: Dique construido, etapa 2)*




Analizando los resultados de calado máximo para los escenarios de variación de rugosidad, se observan las siguientes condiciones:

- El efecto del incremento o disminución de la rugosidad es más notorio en las zonas de aguas someras laterales, en contraste con las zonas de mayor profundidad de agua, como en el cauce del río, donde el $CV_L$ de calado se mantiene bajo (Figuras 23, 24, 27, 28, 31 y 32).
- La distribución espacial de $CV_L$ de calado en el cauce, permanece prácticamente igual, tanto para el caudal correspondiente al período de retorno de 5 años, como para el período de retorno de 500 años (Figuras 23, 24, 27, 28, 31 y 32).
- La distribución espacial de $CV_L$ de calado en las zonas laterales de aguas someras presenta una mayor sensibilidad al aumento en la rugosidad que a la disminución.
- Analizando los resultados de velocidad máxima para los escenarios de variación de rugosidad, se observan las siguientes condiciones:
- El efecto del incremento o disminución de la rugosidad es mayor en las zonas de aguas someras laterales que corresponden a cambios bruscos de dirección de flujo, así como en las zonas de mayor pendiente, como en el cauce del río, donde el $CV_L$ es alto con respecto las zonas adyacentes (Figuras 25, 26, 28, 30, 33 y 34).
- La distribución espacial de $CV_L$ de velocidad en el cauce, presenta un ligero aumento para el período de retorno de 500 años con respecto a lo observado para el período de retorno de 5 años (Figuras 25, 26, 28, 30, 33 y 34).
- La distribución espacial de $CV_L$ de velocidad en el cauce, presenta una mayor sensibilidad a la disminución en la rugosidad que al aumento de la misma.

En las tablas 3 y 4, se resumen los resultados de determinación del Coeficiente de Variación Global ($CV_G$) de los resultados de calado y velocidad, dentro de la zona de estudio.

*Tabla 3. Coeficiente de variación global CVG de calado máximo para los diferentes escenarios de análisis*

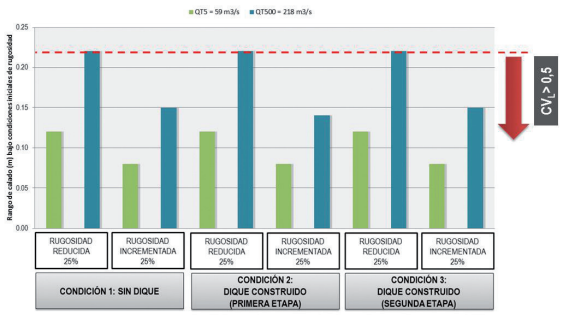
| | Rugosidad disminuida 25% | | Rugosidad incrementada 25% | |
|---|---|---|---|---|
| | $Q_{T5}$ = 59 m³/s | $Q_{T500}$ = 218 m³/s | $Q_{T5}$ = 59 m³/s | $Q_{T500}$ = 218 m³/s |
| Condición 1: Sin dique | 0,16 | 0,14 | 0,16 | 0,14 |
| Condición 2: Dique construido (Primera etapa) | 0,12 | 0,15 | 0,12 | 0,15 |
| Condición 3: Dique construido (Segunda etapa) | 0,16 | 0,15 | 0,16 | 0,15 |

*Tabla 4. Coeficiente de variación global $CV_G$ de velocidad máxima para los diferentes escenarios de análisis*

| | Rugosidad disminuida 25% | | Rugosidad incrementada 25% | |
|---|---|---|---|---|
| | $Q_{T5}$ = 59 m³/s | $Q_{T500}$ = 218 m³/s | $Q_{T5}$ = 59 m³/s | $Q_{T500}$ = 218 m³/s |
| Condición 1: Sin dique | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| Condición 2: Dique construido (Primera etapa) | 0,16 | 0,15 | 0,16 | 0,15 |
| Condición 3: Dique construido (Segunda etapa) | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |

Haciendo un análisis comparativo de mapas de los $CV_L$ definidos para el calado y estableciendo la relación que dichos coeficientes guardan con las profundidades de la lámina de agua obtenidas en la situación inicial de rugosidad, se obtiene el valor umbral de calado por debajo del cual se tiene un $CV_L$ superior a 0,5 tal y como se muestra en la figura 35.

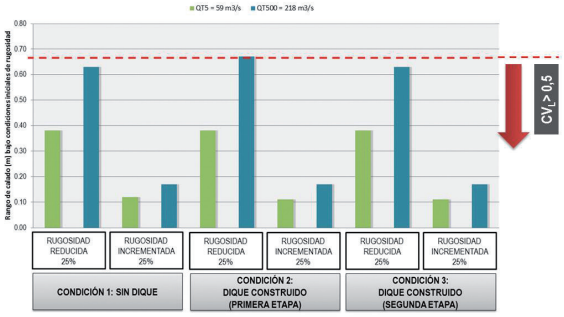
*Figura 35. Rangos de calado bajo la condición inicial de rugosidad, para los que se obtiene un $CV_L$ de calado > 0,5 al variar el coeficiente de rugosidad*




Estos resultados indican que al incrementar o disminuir el coeficiente de rugosidad en el modelo hidráulico, se tendrá una menor variabilidad de los resultados de calado en aquellas zonas que registran profundidades superiores a 0,22 m bajo las condiciones de rugosidad inicialmente definidas, es decir, que a profundidades superiores a este valor, se esperan valores de $CV_L$ de calado inferiores a 0,5

Aplicando el mismo análisis a los resultados del $CV_L$ de velocidad, se obtienen los resultados que se muestran en la figura 36.

*Figura 36. Rangos de calado bajo la condición inicial de rugosidad, para los que se obtiene un $CV_L$ de velocidad > 0,5 al variar el coeficiente de rugosidad*




Estos resultados indican que al incrementar o disminuir el coeficiente de rugosidad en el modelo hidráulico, se tendrá una menor variabilidad de los resultados de velocidad en aquellas zonas que registran profundidades superiores a 0,67 m bajo las condiciones de rugosidad inicialmente definidas, es decir, que a profundidades superiores a este valor, se esperan valores de $CV_L$ de calado inferiores a 0,5

## 6.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN

La etapa de evaluación del factor exposición, tal y como se explica en la metodología aplicada, se basa en el uso de la clasificación aplicada en el proyecto MAS Dendro-Avenidas (2013), a partir de los datos contenidos en el catastro urbano y rústico de la zona de estudio. Dicha clasificación consiste en doce tipos de elementos expuestos, que se resumen en la tabla 5.

*Tabla 5. Clasificación por categorías de los elementos expuestos en Pajares de Pedraza*

| Categoría | Tipología de elemento en riesgo |
|---|---|
| V1P | Vivienda de 1 planta ocupada de forma permanente |
| V1O | Vivienda de 1 planta con ocupación ocasional |
| V2P | Vivienda de más de 1 planta ocupada de forma permanente |
| V2O | Vivienda de más de 1 planta con ocupación ocasional |
| ES_I | Edificaciones singulares (Iglesia) |
| ES_L | Edificaciones singulares (Casetas labranza) |
| SEC | Labor agrícola de secano |
| PASTO | Pastos |
| M_BAJO | Monte bajo, arbolado y terrenos improductivos |
| INF_CAR | Infraestructuras (Carreteras) |
| INF_CAM | Infraestructuras (Caminos Tierra) |
| ESTRUC_FIJAS | Puentes |

En la figura 37 y tabla 6, se detalla la cartografía del catastro urbano que se utiliza para el análisis del factor exposición dentro de la zona de estudio.

*Figura 37. Cartografía del catastro urbano y clasificación usada dentro de la zona de estudio*

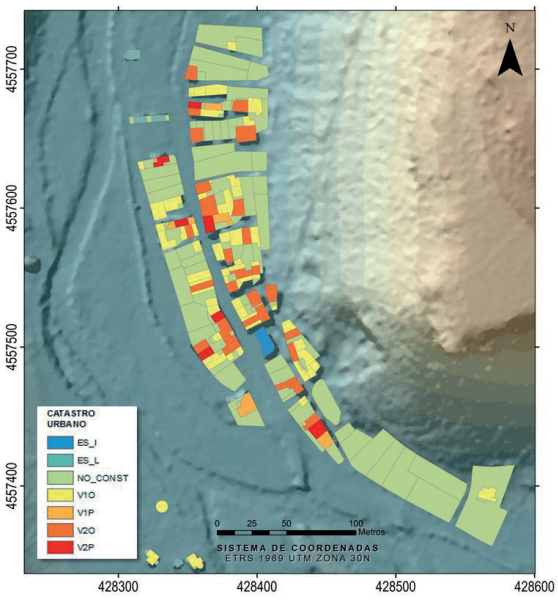



*Tabla 6. Elementos expuestos según el registro de catastro urbano*

| Tipo de ocupación urbana | Elementos expuestos |
|---|---|
| V2P | 8 |
| V1P | 7 |
| V1O | 60 |
| V2O | 41 |
| ES_L | 17 |
| ES_I | 1 |
| NO_CONST | 93 |
| TOTAL | 227 |

La cartografía del catastro rústico y el número de elementos que se utilizan para el análisis del factor exposición, dentro de la zona de estudio, se muestra en la figura 38 y tabla 7.

*Figura 38. Cartografía del catastro rústico y clasificación usada dentro de la zona de estudio*

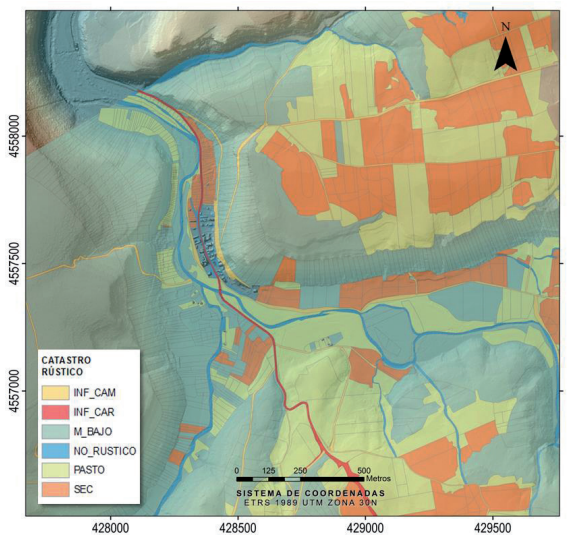



*Tabla 7. Elementos expuestos según el registro de catastro rústico*

| Tipo de ocupación rústica | Elementos expuestos |
|---|---|
| INF_CAM | 10 |
| INF_CAR | 4 |
| M_BAJO | 78 |
| NO_RUSTICO | 11 |
| PASTO | 123 |
| SEC | 86 |
| TOTAL | 312 |

## 6.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

Los resultados del análisis de vulnerabilidad de los elementos expuestos, tal y como se describe en la metodología aplicada, incluyen dos análisis:

Vulnerabilidad en función del calado:

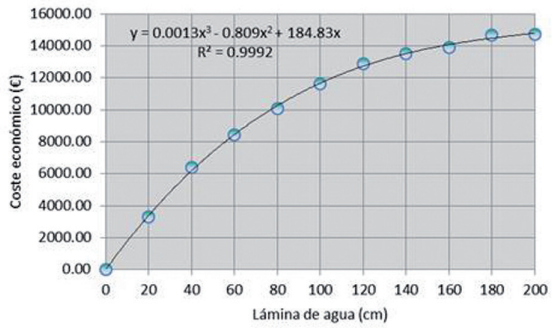
En esta etapa, se determina el inventario de bienes que se encuentran dentro de los elementos expuestos, asociando su coste y el porcentaje de daño en función de la altura de la lámina de agua. Por ejemplo, en la tabla 8, se detalla el inventario de bienes que se estableció para el elemento "Vivienda de una planta de ocupación permanente" (V1P).

*Tabla 8. Inventario de bienes establecido en viviendas de una planta de ocupación permanente (V1P)*

| | | | % Daños según altura lámina de agua (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Localización** | **Elementos** | **Coste (€)** | **0** | **20** | **40** | **60** | **80** | **100** | **120** | **140** | **160** | **180** | **200** |
| Salón | TV | 400 | 0 | 0 | 0,4 | 0,4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | DVD/Vídeo | 200 | 0 | 0,15 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Sofá | 400 | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 0,85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Mesa | 150 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Armario | 500 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 1 | 1 |
| | Sillas (5x40€) | 200 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 0,85 | 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Cocina | Frigorífico | 500 | 0 | 0,4 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Lavadora | 400 | 0 | 0,4 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Horno | 500 | 0 | 0,4 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Cocina | 400 | 0 | 0,1 | 0,5 | 0,75 | 0,9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Lavavajillas | 400 | 0 | 0,4 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Mesa | 150 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Sillas (4x40€) | 160 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 0,85 | 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pequ. Electro. | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Ultil. Menaje | 80 | 0 | 0 | 0,2 | 0,25 | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| | Armarios | 250 | 0 | 0,25 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 1 | 1 |
| Habitación | Somier (3x250€) | 750 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| | Colchón (3x200€) | 600 | 0 | 0,1 | 0,5 | 0,8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Armario (3x500€) | 1.500 | 0 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 1 | 1 |
| | Mesillas (3x2x50€) | 300 | 0 | 0,35 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 0,8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Sillas (3x2x40e) | 240 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 0,85 | 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Enseres domésticos | Comestibles | 400 | 0 | 0,4 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Enseres | 200 | 0 | 0,25 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,75 | 0,75 | 1 | 1 | 1 |
| | Documentación | 250 | 0 | 0 | 0,2 | 0,25 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 0,75 | 1 | 1 | 1 |
| Prendas vestir y ajuar | | 900 | 0 | 0,25 | 0,35 | 0,5 | 0,6 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Carpint. y albañ. Menor | | 600 | 0 | 0,5 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Instalación eléctrica | | 400 | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,75 | 0,75 |
| Pintura | | 350 | 0 | 0,5 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Puerta exterior | | 400 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,15 | 0,3 | 0,35 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 075 | 0,75 |
| Puerta int. (6x70€) | | 420 | 0 | 0,15 | 0,3 | 0,4 | 0,75 | 0,9 | 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Puerta de garaje | | 600 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,25 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,65 |
| Ventanas (6x250€) | | 1.500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| Elementos decorativos | | 100 | 0 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1 |
| Totales | | | 0 | 2.855,5 | 5.554,5 | 7.338 | 8.782 | 10.113 | 11.206 | 11.757 | 12.069 | 12.799 | |
| Daños indirentos | 15% de pérdidas directas | | 0 | 428,18 | 1.100,7 | 1.317,3 | 1.517 | 1.680,8 | 1.769,5 | 1.810,4 | 1.915,4 | 1.919,9 | |

Posteriormente, se establece la función de vulnerabilidad, utilizando como datos de entrada, el coste económico de los daños (en el eje de las abscisas) y la altura de la lámina de agua (en el eje de las ordenadas), tal y como se muestra en el figura 39.

*Figura 39. Función de vulnerabilidad para viviendas de una planta de ocupación permanente (V1P)*




| Lámina agua (cm) | Coste económico (€) |
|---|---|
| 0 | 0,00 |
| 20 | 3.283,83 |
| 40 | 6.387,68 |
| 60 | 8.438,70 |
| 80 | 10.099,30 |
| 100 | 11.629,95 |
| 120 | 12.886,33 |
| 140 | 13.519,98 |
| 160 | 13.879,35 |
| 180 | 14.684,35 |
| 200 | 14.718,85 |

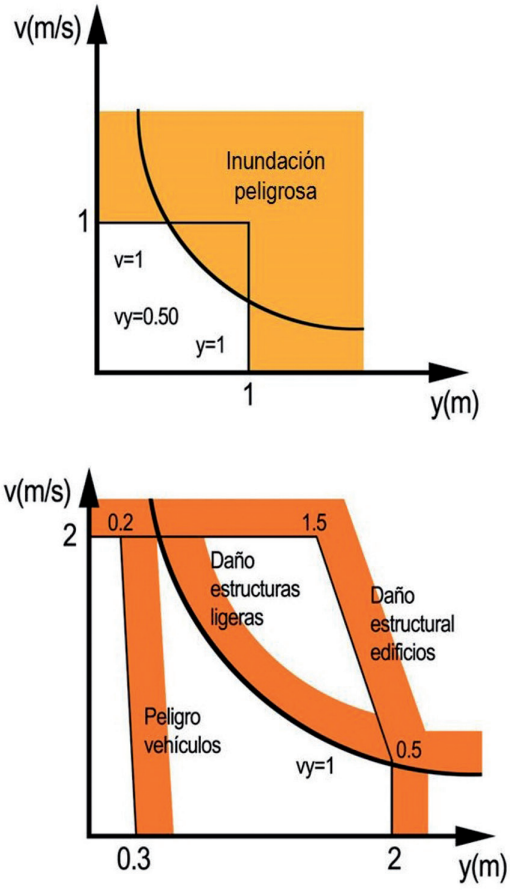
El resultado final de este análisis, permite obtener funciones magnitud-daño para cada categoría de elementos del factor exposición del análisis de riesgo. Cabe destacar, que en este estudio se desarrolla el proceso de obtención de las funciones de vulnerabilidad para los puentes que se clasifican bajo la tipología de estructuras fijas; mientras que para el resto de elementos expuestos de las zonas de ocupación urbana y rústica se retoman las funciones de vulnerabilidad definidas en el proyecto MAS Dendro-Avenidas (2013) en Pajares de Pedraza.

Las funciones calado-daño que caracterizan el factor vulnerabilidad en esta etapa se muestran detalladamente en el Anexo 5 de este documento.

**Vulnerabilidad en función de la combinación calado-velocidad:**

Los resultados de este análisis vienen dados por las funciones características que se muestran en la figura 40 (et al. Díez, 2008b), y que relacionan la vulnerabilidad de las personas, vehículos y edificaciones ante las combinaciones de calado y velocidad que caracterizan las avenidas.

*Figura 40. Diagramas característicos de vulnerabilidad en función de calado y velocidad en inundaciones. (Tomado de Díez-Herrero et al. 2008b; desde Martín Vide, 2002)*




## 6.4. RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN DE LOS FACTORES DE RIESGO

Tal y como se menciona en la metodología aplicada de este estudio, la integración del riesgo se realiza mediante la intersección de los factores de riesgo: peligro, exposición y vulnerabilidad. Este proceso, permite obtener los siguientes resultados:

- Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza para diferentes periodos de retorno y condiciones topográficas.
- Mapas de riesgo de arrastre para personas, para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas.
- Mapas de riesgo de daño para edificaciones, vehículos y estructuras ligeras para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas.

### 6.4.1. VALORACIÓN DEL RIESGO ECONÓMICO ASOCIADO AL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS.

Los resultados de la valoración financiera del daño asociado al riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza se muestran desglosados para las diferentes ocupaciones de suelos en la tabla 9.

En las tablas 10 y 11 se detalla la valoración total del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza para las diferentes condiciones topográficas, períodos de retorno y condiciones de actividad agrícola.

*Tabla 9. Datos desglosados de la valoración del riesgo de inundaciones en los diferentes elementos expuestos en Pajares de Pedraza, para diferentes períodos de retorno*

| | | Caudal ($m^3/s$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Q_{T5}$ = 59 (€) | $Q_{T25}$ = 104 (€) | $Q_{T50}$ = 126 (€) | $Q_{T100}$ = 151 (€) | $Q_{T500}$ = 218 (€) |
| **Condición 1** Sin dique | Daño en ocupación urbana | 13.477 | 291.136 | 372.838 | 502.268 | 661.511 |
| | Daño en ocupación rústica[1] | 280.815 | 340.989 | 373.996 | 377.971 | 395.734 |
| | Daño en ocupación rústica[2] | 218.275 | 240.538 | 258.732 | 258.416 | 250.216 |
| | Daño en estructuras fijas | 0 | 64.481 | 104.177 | 103.416 | 118.061 |
| **Condición 2** Dique construido (Primera etapa) | Daño en ocupación urbana | 2.233 | 141.952 | 276.191 | 468.676 | 668.750 |
| | Daño en ocupación rústica[1] | 281.991 | 339.032 | 371.366 | 377.127 | 396.853 |
| | Daño en ocupación rústica[2] | 219.381 | 238.653 | 256.051 | 257.528 | 251.013 |
| | Daño en estructuras fijas | 0 | 85.622 | 105.273 | 113.869 | 124.997 |
| **Condición 3** Dique construido (Segunda etapa) | Daño en ocupación urbana | 2.092 | 108.095 | 225.896 | 433.727 | 652.004 |
| | Daño en ocupación rústica[1] | 280.273 | 329.396 | 361.464 | 371.677 | 395.096 |
| | Daño en ocupación rústica[2] | 219.526 | 232.084 | 249.427 | 253.437 | 249.080 |
| | Daño en estructuras fijas | 0 | 89.931 | 113.612 | 121.098 | 131.870 |

*[1] Daño en ocupación rústica, considerando afectación máxima por actividad agrícola estacional activa.*

*[2] Daño en ocupación rústica, considerando afectación nula por actividad agrícola estacional inactiva.*

*Tabla 10. Valoración total del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza (considerando máximo daño posible a ocupación rústica en período agrícola activo)*

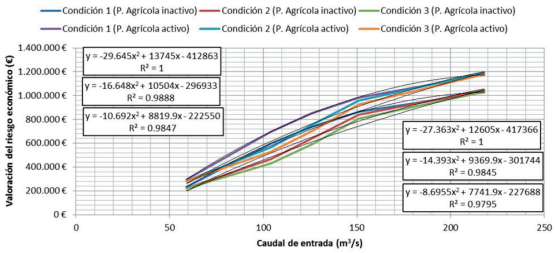
| | Caudal ($m^3/s$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $Q_{T5}$ = 59 (€) | $Q_{T25}$ = 104 (€) | $Q_{T50}$ = 126 (€) | $Q_{T100}$ = 151 (€) | $Q_{T500}$ = 218 (€) |
| **Condición 1:** Sin dique | 294.292 | 696.606 | 851.011 | 983.654 | 1.175.306 |
| **Condición 2:** Dique construido (Primera etapa) | 284.224 | 566.605 | 752.830 | 959.671 | 1.190.600 |
| **Condición 3:** Dique construido (Segunda etapa) | 282.365 | 527.422 | 700.971 | 926.502 | 1.178.970 |

*Tabla 11. Valoración total del riesgo de inundación en Pajares de Pedraza (considerando daño nulo en ocupación rústica en período agrícola inactivo)*

| | Caudal ($m^3/s$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $Q_{T5}$ = 59 (€) | $Q_{T25}$ = 104 (€) | $Q_{T50}$ = 126 (€) | $Q_{T100}$ = 151 (€) | $Q_{T500}$ = 218 (€) |
| **Condición 1:** Sin dique | 231.752 | 596.156 | 735.747 | 864.099 | 1.029.787 |
| **Condición 2:** Dique construido (Primera etapa) | 221.615 | 466.226 | 637.515 | 840.073 | 1.044.759 |
| **Condición 3:** Dique construido (Segunda etapa) | 221.618 | 430.109 | 588.934 | 808.262 | 1.032.955 |

En la figura 41, se muestra la relación del riesgo económico con el caudal de entrada asociado a diferentes períodos de retorno, permitiendo determinar que la correlación que mejor describe el aumento del riesgo económico en función del aumento del caudal de entrada asociado a diferentes períodos de retorno, corresponde a una función polinómica de orden 2.

*Figura 41. Valoración del riesgo económico de inundaciones en función del caudal de entrada al inicio de la simulación*




En la tabla 12, se muestra el resultado del cálculo de representatividad en el riesgo económico total, la consideración de que la avenida de inundación ocurra durante el período agrícola activo o inactivo.

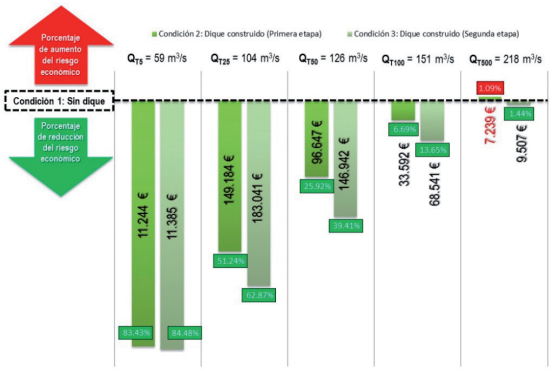
*Tabla 12. Porcentaje de incremento en el riesgo económico si la ocurrencia de la avenida de inundación se da en período agrícola activo, con respecto al riesgo económico calculado considerando la ocurrencia de la inundación en período agrícola inactivo*

| | Caudal (m³/s) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $Q_{T5}$ = 59 (%) | $Q_{T25}$ = 104 (%) | $Q_{T50}$ = 126 (%) | $Q_{T100}$ = 151 (%) | $Q_{T500}$ = 218 (%) |
| Condición 1: Sin dique | 27 | 17 | 16 | 14 | 14 |
| Condición 2: Dique construido (Primera etapa) | 28 | 22 | 18 | 14 | 14 |
| Condición 3: Dique construido (Segunda etapa) | 27 | 23 | 19 | 15 | 14 |

En estos resultados se observa que los porcentajes de incremento del riesgo económico total al considerar que el evento tenga lugar en la época agrícola activa (mayor vulnerabilidad), con respecto al riesgo total calculado en la situación de labor agrícola inactiva (menor vulnerabilidad), representan un aumento más significativo (en el rango de 17% a 27%) durante las avenidas asociadas a los períodos de retorno de 5, 25 y 50 años. En la medida que se tienen caudales mayores como los asociados a láminas de inundación que corresponden a los períodos de retorno de 100 y 500 años, la representación de la afectación es cercana al 14%, por tanto, esta diferenciación de escenarios en el cálculo del riesgo económico será más significativa para avenidas de alta frecuencia de ocurrencia, y tendrá menos repercusiones en aquellos eventos asociados a frecuencias de ocurrencia mediana y alta.

En la figura 42, se muestran los porcentajes de reducción o aumento del riesgo económico en zonas de ocupación urbana, con respecto a la condición topográfica inicial en la que no se tiene desarrollada la obra de mitigación (dique).

*Figura 42. Variación del riesgo económico en zonas de ocupación urbana, en función de las etapas de desarrollo del dique*

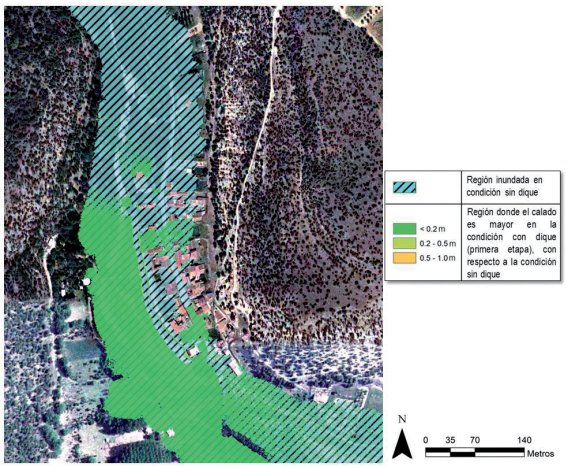



Estos resultados indican que para las avenidas de inundación asociadas a los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años, el desarrollo de la primera y segunda etapa de la obra de mitigación, logra reducir el riesgo económico en las zonas de ocupación urbana, respondiendo a la efectividad del dique para controlar el flujo de agua proveniente del desbordamiento del río al costado poniente del pueblo, reduciendo la lámina de inundación en el núcleo urbano. Por tanto, la inundación en dichas zonas se debe a las entradas de agua que proceden de la calle principal a la entrada del pueblo y el reflujo proveniente desde aguas abajo, donde finaliza la obra de mitigación.

En el caso de la avenida de inundación asociada al período de retorno de 500 años, se observa que el desarrollo de la primera etapa del dique provoca un incremento en el riesgo económico en las zonas de ocupación urbana. Esto se debe a que la lámina de agua que ingresa al pueblo por la calle principal, continua su recorrido condicionado por la pendiente de la zona hasta la salida del núcleo urbano, describiendo el mismo trayecto que sigue en la condición sin dique, mientras que la inundación proveniente del paso del río al costado poniente del pueblo se limita a circular al margen izquierdo del dique, pero al llegar a la finalización del mismo, la lámina de agua de mayor altura genera un efecto de reflujo sobre el núcleo poblacional.

Para apoyar este análisis, en la figura 43, se muestran las regiones donde la profundidad de la lámina de agua en el escenario con dique (primera etapa) es mayor, con respecto a la condición sin dique, y que se traducen en mayores daños al núcleo poblacional.

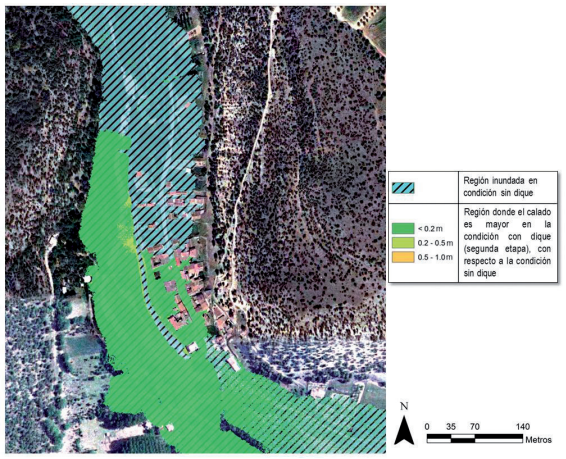
*Figura 43. Extensión de la zona de inundación y regiones donde la profundidad de agua es mayor en el escenario con dique (primera etapa) con respecto al escenario sin dique, para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*




El comportamiento de la avenida de 500 años en el caso de la segunda etapa de construcción del dique, limita el desbordamiento por encima del mismo, de tal manera que la inundación en el pueblo proviene principalmente de la zona de ingreso por la calle principal y por el efecto de reflujo al final de la obra de mitigación. La lámina de agua que ingresa al pueblo, ve restringido su flujo hacia la salida del mismo por la influencia del obstáculo que representa el dique, que se traduce en acumulación de agua y aumento del calado en el pueblo. Sin embargo, al evitar el ingreso del agua proveniente del costado poniente del pueblo, la lámina de inundación dentro del núcleo urbano tiene una profundidad más baja que con las otras condiciones de desarrollo del dique, esto se traduce en daños menores en las zonas de ocupación urbana.

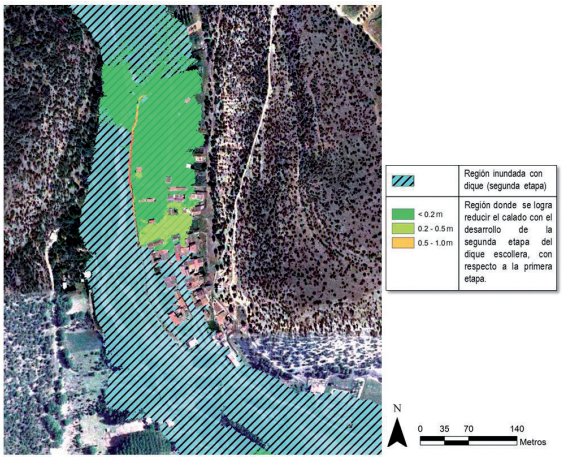
En la figura 44, se muestran las regiones donde el calado es mayor en la condición con dique (segunda etapa), con respecto a la condición sin dique.

*Figura 44. Extensión de la zona de inundación y regiones donde la profundidad de agua es mayor en el escenario con dique (segunda etapa) con respecto al escenario sin dique, para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*




En el análisis de la profundidad de la lámina de agua asociada a la avenida con período de retorno de 500 años, también es destacable el resultado comparativo entre los beneficios obtenidos del desarrollo de la segunda etapa del dique, con respecto a la primera etapa. En esta comparación es posible observar que la extensión del dique en la segunda etapa, reduce el ingreso de agua desde el costado poniente del pueblo, disminuyendo el efecto de reflujo sobre el núcleo poblacional y provocando una inundación de menor profundidad en la zona norte del pueblo, lo cual se traduce en menores daños al núcleo urbano. En la figura 45, se muestra la extensión de la zona de inundación y las regiones donde se logra disminuir el calado con el desarrollo de la segunda etapa del dique, respecto a la primera etapa.

*Figura 45. Extensión de la zona de inundación y regiones donde la profundidad de agua es mayor en el escenario de la primera etapa del dique, con respecto a la segunda etapa para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*




En las figuras 46 y 47, se muestran los porcentajes de reducción o aumento del riesgo económico en zonas de ocupación rústica (considerando periodo agrícola activo e inactivo), con respecto a la condición topográfica inicial en la que no se tiene desarrollada la obra de mitigación (dique).

*Figura 46. Variación del riesgo económico en zonas de ocupación rústica en periodo agrícola activo, en función de las etapas de desarrollo del dique*

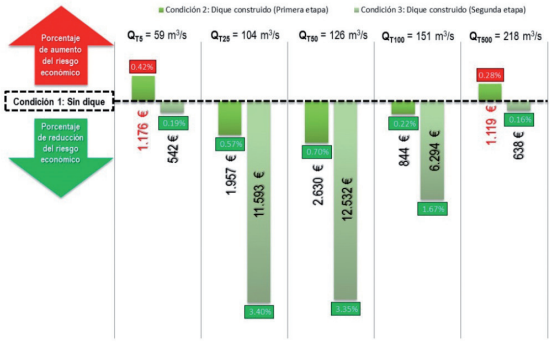
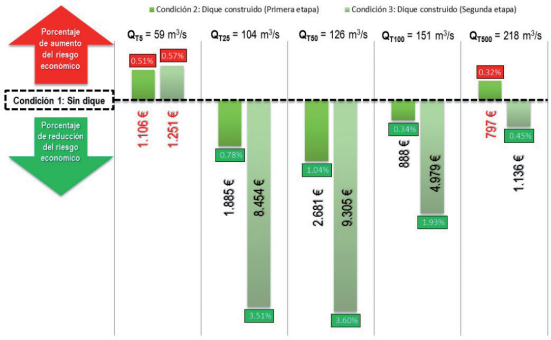


*Figura 47. Variación del riesgo económico en zonas de ocupación rústica en período agrícola inactivo, en función de las etapas de desarrollo del dique*




Estos resultados indican que para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, el desarrollo de la primera y segunda etapa del dique, favorecen la reducción del riesgo económico en las zonas de ocupación rústica, tanto en el período agrícola activo como en el inactivo, siendo notablemente mayores en la segunda etapa del dique que representa la situación actual de la zona.

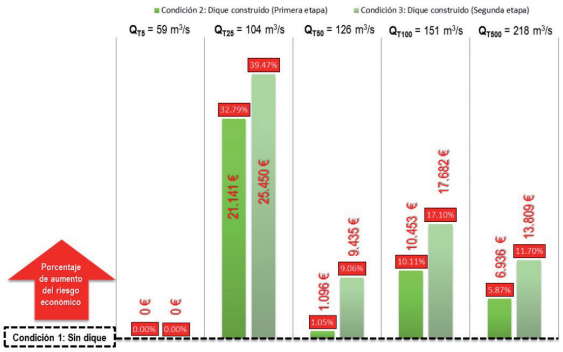
La inundación asociada al período de retorno de 5 años, indica que en el caso de la primera etapa de la obra, el riesgo económico se incrementa en los periodos activos e inactivos de labor agrícola, esto responde a que la restricción de flujo que representa el dique, evita la inundación del núcleo urbano, pero ese caudal debe ser distribuido en otras áreas expuestas.

En el caso de la segunda etapa del dique y su relación con los resultados obtenidos para la lámina de agua asociada al período de retorno de 5 años, se observa que el efecto de la obra provoca una reducción del riesgo económico, considerando que la inundación ocurra durante la época de labor agrícola activa, mientras que si se considera el escenario de labor agrícola inactiva, se tiene un aumento en el riesgo económico. Este resultado encuentra explicación en que el desarrollo de la obra, reduce el peligro hacia las zonas rusticas expuestas, pero la época activa e inactiva de labor agrícola condiciona la vulnerabilidad de dichas zonas, percibiéndose un beneficio de reducción en el cálculo del riesgo en el período agrícola activo, que no se cuantifica en el caso del período agrícola inactivo.

Los resultados de la avenida de inundación asociada al período de retorno de 500 años bajo la condición de desarrollo de la primera etapa del dique, ocasionan en las zonas de ocupación rústica, un aumento en el riesgo económico, como resultado del incremento de la lámina de agua provocado por la restricción que representa el dique al costado poniente del pueblo, y que al final de la obra permite que se distribuya sobre las zonas de ocupación rústica acumulando un mayor calado. El desarrollo de la segunda etapa del dique disminuye este efecto, y las inundaciones en las zonas de ocupación rustica se deben al ingreso de agua desde la entrada del pueblo y el reflujo proveniente desde aguas abajo.

En la figura 48, se muestran los porcentajes de aumento del riesgo económico en estructuras fijas, con respecto a la condición topográfica inicial en la que no se tiene desarrollada la obra de mitigación (dique).

*Figura 48. Variación del riesgo económico en estructuras fijas, en función de las etapas de desarrollo del dique*




En la tabla 13 se muestra la variación del calado máximo en las estructuras fijas para diferentes períodos de retorno y condiciones topográficas, pudiendo observarse claramente la variación del factor peligro en función de los diferentes escenarios evaluados.

*Tabla 13. Variación del calado máximo en estructuras fijas para las diferentes condiciones topográficas y períodos de retorno*

| | | Calado máximo (m) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | QT5 = 59 m3/s | QT25 = 104 m3/s | QT50 = 126 m3/s | QT100 = 151 m3/s | QT500 = 218 m3/s |
| Condición 1: Sin dique | Puente vehicular | 1,56 | 1,87 | 1,95 | 1,92 | 1,91 |
| | Puente peatonal | 1,37 | 1,79 | 1,94 | 2,03 | 2,34 |
| Condición 2: Con dique (Etapa 1) | Puente vehicular | 1,56 | 1,88 | 1,95 | 1,96 | 1,94 |
| | Puente peatonal | 1,40 | 1,88 | 1,96 | 2,09 | 2,36 |
| Condición 3: Con dique (Etapa 2) | Puente vehicular | 1,57 | 1,88 | 1,95 | 1,95 | 1,94 |
| | Puente peatonal | 1,42 | 1,94 | 2,10 | 2,21 | 2,50 |

El comportamiento de la variación del riesgo económico asociado a las estructuras fijas en función de la etapa de desarrollo del dique, indica que para los diferentes períodos de retorno, se tiene un aumento en el cálculo del riesgo económico, siendo principalmente afectado el puente peatonal, ya que la restricción de flujo por el dique ocasiona un aumento en el nivel de la lámina de agua, y esta estructura se encuentra en la zona donde se concentra el flujo que ya no se distribuye sobre el pueblo.

En las figuras 49 y 50, se muestran los porcentajes de aumento o reducción del riesgo económico total, con respecto a la condición topográfica inicial en la que no se tiene desarrollada la obra de mitigación (dique).

*Figura 49. Variación del riesgo económico total, en función de las etapas de desarrollo del dique (considerando período agrícola activo)*

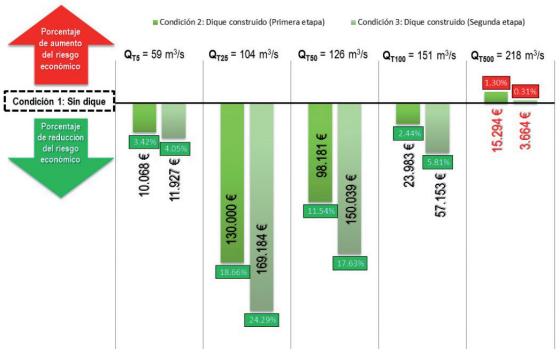
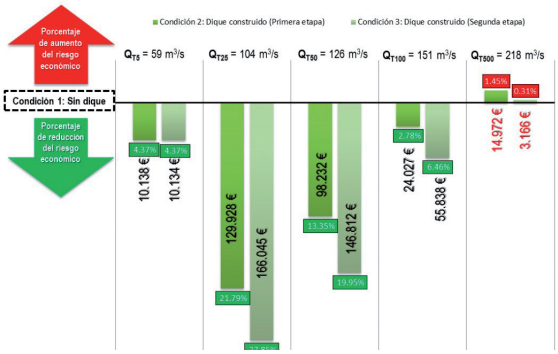



*Figura 50. Variación del riesgo económico total, en función de las etapas de desarrollo del dique (considerando período agrícola inactivo)*




En el Anexo 6 de este documento, se presentan las tablas y gráficas a detalle de la valoración del riesgo asociado a inundaciones, de los diferentes elementos expuestos en Pajares de Pedraza.

Los resultados del desarrollo de la obra de mitigación en sus dos etapas reflejan una disminución del riesgo económico total, para las avenidas de inundación asociadas a los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años, tanto en la época agrícola activa como inactiva.

En el caso de la lámina de inundación correspondiente al periodo de retorno de 500 años, el resultado de la construcción del dique ocasiona un aumento en el riesgo económico total. Este efecto es mayor en el desarrollo de la primera etapa del dique, ya que bajo esa condición se favorece el incremento del riesgo económico ante todos los elementos expuestos (ocupación urbana, rústica y estructuras fijas). Pero en la segunda etapa de construcción de la obra de mitigación, aunque en las estructuras fijas se tiene un incremento del riesgo económico, las zonas de ocupación urbana y rústica se ven favorecidas por una reducción del mismo, debido a la restricción del flujo proveniente del costado poniente del pueblo.

### 6.4.2. VALORACIÓN DEL RIESGO ECONÓMICO POR UNIDAD DE VIVIENDA EN LAS ZONAS DE OCUPACIÓN URBANA

Tomando los resultados de la valoración del riesgo en las zonas de ocupación urbana para las diferentes etapas de desarrollo del dique y diferentes períodos de retorno, junto con el número de elementos de las zonas de ocupación urbana que se ven expuestos al peligro de inundación (Tablas A6-2, A6-7, A6-12, A6-17, A6-22 del Anexo 6), es posible calcular el riesgo económico por unidad de vivienda para las diferentes condiciones evaluadas. El resultado de este análisis se resume en la tabla 14.

*Tabla 14. Estimación del riesgo económico por unidad de vivienda en las zonas de ocupación urbana, para diferentes condiciones topográficas y períodos de retorno*

| | | Caudal (m³/s) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Q_{T5}$ = 59 (€) | $Q_{T25}$ = 104 (€) | $Q_{T50}$ = 126 (€) | $Q_{T100}$ = 151 (€) | $Q_{T500}$ = 218 (€) |
| Condición 1 Sin dique | Daño en ocupación urbana | 13.477 | 291.136 | 372.838 | 502.268 | 661.511 |
| | Número de viviendas dañadas | 18 | 66 | 78 | 86 | 96 |
| | **Daños por unidad de vivienda** | **749** | **4.411** | **4.780** | **5.840** | **6.891** |
| Condición 2 Dique construido (Primera etapa) | Daño en ocupación urbana | 2.233 | 141.952 | 276.191 | 468.676 | 668.750 |
| | Número de viviendas dañadas | 9 | 54 | 59 | 86 | 96 |
| | **Daños por unidad de vivienda** | **248** | **2.629** | **4.681** | **5.450** | **6.966** |
| Condición 3 Dique construido (Segunda etapa) | Daño en ocupación urbana | 2.092 | 108.095 | 225.896 | 433.727 | 652.004 |
| | Número de viviendas dañadas | 6 | 50 | 60 | 82 | 95 |
| | **Daños por unidad de vivienda** | **349** | **2.162** | **3.765** | **5.289** | **6.863** |

Para beneficiar el análisis de los resultados de valoración del riesgo económico en las zonas de ocupación urbana, se cuenta con información del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) en materia de indemnizaciones por daños en Pajares de

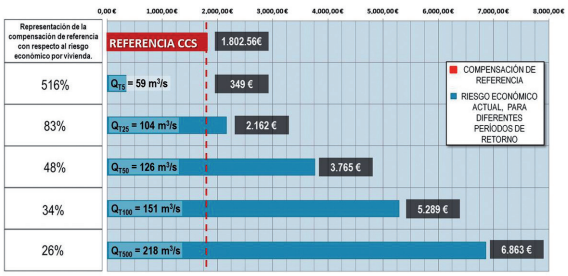
Pedraza, debido a inundaciones en la zona en los años 1996 y 2003 (Tabla 15). Esta información fue facilitada por el IGME que realizó las gestiones ante la entidad correspondiente.

*Tabla 15. Información de indemnizaciones por daños debido a inundaciones en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), según el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS,_2014)*

| Ocurrencia siniestro | Población | Número de viviendas con daños | Clase riesgo 1 | Importe tasado |
|---|---|---|---|---|
| 22/01/1996 | Pajares de Pedraza | 1 | Viviendas y comunidades de propietarios | 1.592,33 |
| 28/01/1996 | Pajares de Pedraza | 1 | Viviendas y comunidades de propietarios | 360,08 |
| 26/03/2013 | Pajares de Pedraza | 1 | Viviendas y comunidades de propietarios | 1.802,56 |

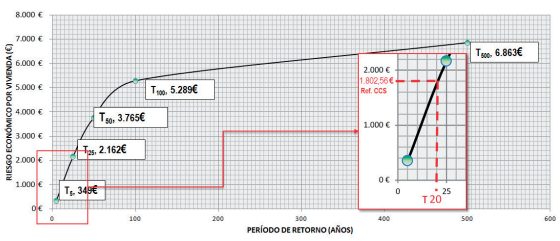
En la figura 51 se muestra el riesgo económico por vivienda determinado para la condición topográfica actual (dique construido en su segunda etapa) y su relación con la referencia de compensación económica por daños según los datos estadísticos del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS).

*Figura 51. Riesgo económico por vivienda, determinado para la condición topográfica actual y su relación con la referencia de compensación económica del CCS para la zona de estudio.*




A partir de los datos calculados de riesgo económico por unidad de vivienda en Pajares de Pedraza para diferentes períodos de retorno, se estima que el valor de compensación económica corresponde aproximadamente al riesgo asociado a una avenida con período de retorno de 20 años (Figura 52).

*Figura 52. Riesgo económico por vivienda versus Período de retorno de avenidas de diseño; interpolación de referencia de compensación*




En los resultados obtenidos de este análisis es posible observar que para los eventos de inundación asociados a las avenidas con períodos de retorno de 25, 50, 100 años el desarrollo de las dos etapas posibilita la disminución del riesgo económico por unidad de vivienda.

Para la avenida de inundación asociada al período de retorno de 5 años, se observa que el desarrollo del dique en sus dos etapas provoca una disminución del riesgo económico con respecto a la condición inicial, pero el desarrollo de la segunda etapa no favorece la disminución de la cuantía de riesgo por unidad de vivienda, ya que bajo esta condición, aunque se logra disminuir el número de elementos en riesgo, el cálculo del riesgo económico se mantiene en el mismo orden de magnitud que el obtenido bajo la condición del dique en su primera etapa. Este resultado encuentra explicación en el efecto del dique sobre la dinámica de flujo que se expone en el apartado 6.1 y figura 22.

Para la avenida de inundación asociada al período de retorno de 500 años, se observa que el desarrollo de la obra de mitigación no tiene un impacto significativo en la reducción del número de viviendas en riesgo, pero si se puede observar que el desarrollo de la segunda etapa favorece la disminución de la cuantía de riesgo por unidad de vivienda con respecto a la condición sin dique. Por otra parte, el desarrollo de la primera etapa del dique posibilita el incremento del riesgo económico por unidad de vivienda como consecuencia del efecto del dique sobre la dinámica de flujo que se expone en el apartado 6.1 y figura 22.

### 6.4.3. MAPAS DE RIESGO DE ARRASTRE PARA PERSONAS, PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS

La integración del factor peligrosidad (definido por el calado y velocidad de las avenidas de inundación) y el factor vulnerabilidad (definido por las funciones de resistencia y estabilidad de personas ante combinaciones de calado y velocidad), permiten determinar las zonas de peligro de arrastre de personas, que se exponen en las figuras 53 a 57.

*Figura 53. Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T5}$ = 59 m³/s*

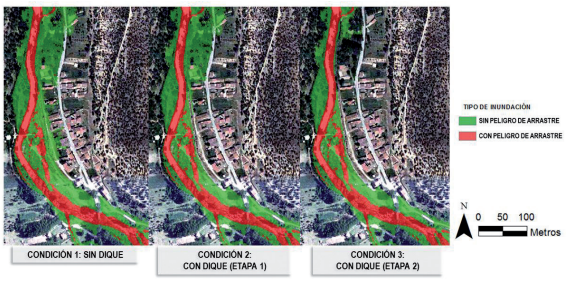


*Figura 54. Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T25}$ = 104 m³/s*

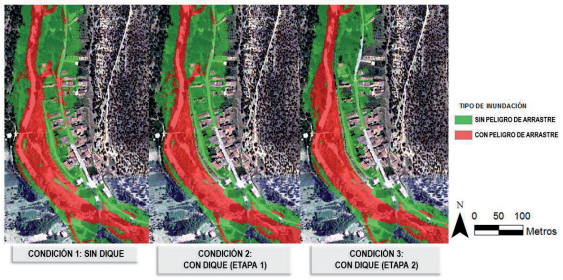



*Figura 55. Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T50}$ = 126 m³/s*

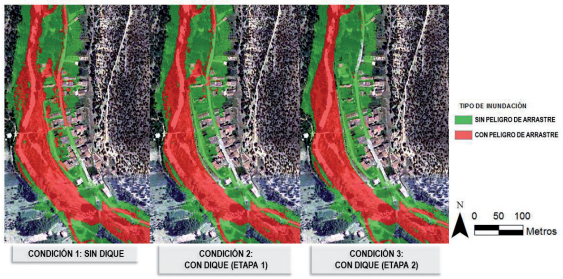



*Figura 56. Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T100}$ = 151 m³/s*

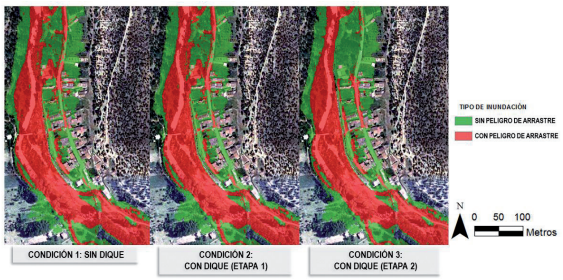
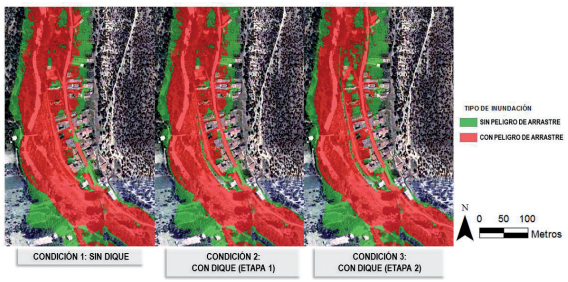



*Figura 57. Distribución espacial de zonas de inundación con peligro de arrastre de personas para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*

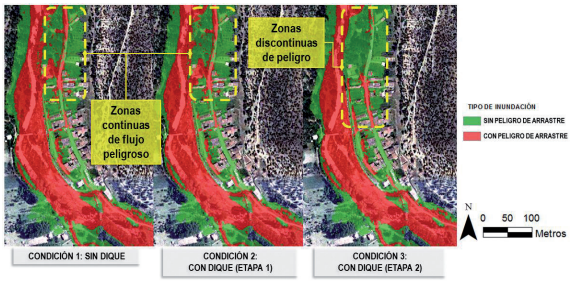



En el Anexo 7 de este documento, se presenta con mayor detalle la colección de mapas de riesgo de arrastre de personas en la zona de estudio.

A partir de estos resultados, se puede observar que para los períodos de retorno de 5, 25 y 50 años, el desarrollo de la obra de mitigación (dique) en su segunda etapa, cumple con el cometido de disminuir el riesgo social asociado a inundaciones dentro del núcleo urbano de Pajares de Pedraza, ya que se reducen las zonas de riesgo en comparación con la etapa previa de construcción del dique.

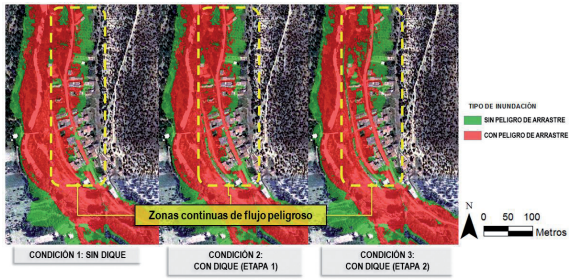
En la lámina de inundación asociada al período de retorno de 100 años, se observa que el desarrollo de la obra de mitigación provoca una ligera reducción de la extensión de la zona de peligro, pero aún más significativo es el efecto de limitar la continuidad de dichas zonas, lo cual se traduce en romper la vía de comunicación directa con el río, que representa mayor peligro de arrastre (Figura 58).

*Figura 58. Zonas de continuidad de flujo con peligro de arrastre de personas para los diferentes escenarios de desarrollo de la obra de mitigación, para $Q_{T100}$ = 151 m³/s*




Por otra parte, los resultados asociados a la avenida de inundación de 500 años y el desarrollo de la obra de mitigación, muestran una leve disminución de la zona de peligro, sin embargo, se mantiene la continuidad longitudinal de las áreas de peligro de arrastre, a lo largo de las dos calles principales que se extienden paralelas al río, llegando nuevamente a contactar el flujo con el cauce principal, manteniendo las condiciones de calado y velocidad que favorecen el arrastre de personas (Figura 59).

*Figura 59. Zonas de continuidad de flujo con peligro de arrastre de personas para los diferentes escenarios de desarrollo de la obra de mitigación, para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*



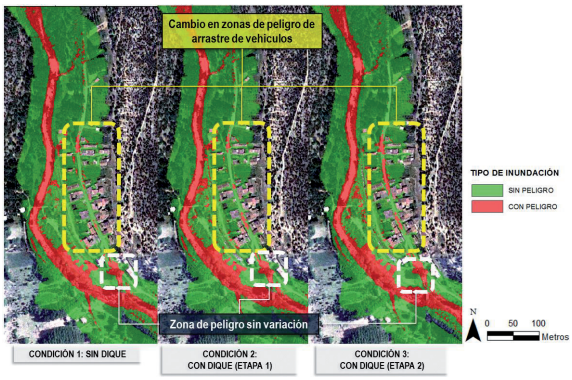

### 6.4.4. MAPAS DE PELIGROSIDAD DE ARRASTRE DE VEHÍCULOS Y DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS

Siguiendo la misma metodología que en el apartado 6.4.3, la integración del factor peligro (calado y velocidad) y el factor vulnerabilidad (curvas de daño estructural y arrastre de vehículos),

permiten determinar las zonas de riesgo para los elementos analizados, dando como resultados los mapas que se muestran en el Anexo 8.

Los resultados de peligrosidad de arrastre de vehículos indican que con el desarrollo de la obra de mitigación, para los períodos de retorno de 5, 25 y 50 años se alcanzan beneficios en la disminución de las áreas donde la inundación posee características hidráulicas que posibilitan reducir el peligro. Sin embargo, para las avenidas correspondientes a los períodos de retorno de 100 y 500 años, se observa un aumento en las áreas de peligrosidad en la calle principal del pueblo, que a su vez representa la principal vía de escape y evacuación. También es importante destacar que el desarrollo de la obra de mitigación, no ejerce influencia alguna en una zona que representa peligro de arrastre de vehículos, que se forma en el tramo que conecta el puente con la entrada del pueblo, manteniéndose invariable en las diferentes condiciones topográficas analizadas, las condiciones antes descritas se esquematizan en la figura 60.

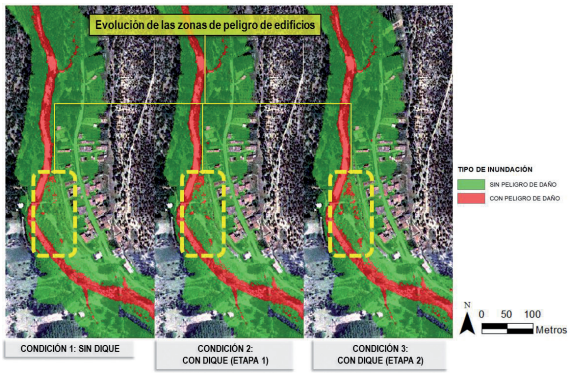
*Figura 60. Comportamiento de las zonas de peligro de arrastre de vehículos en función del desarrollo de la obra de mitigación para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*




Este resultado adverso responde a la influencia del dique escollera que condiciona el flujo dentro del pueblo, estableciendo en la calle combinaciones de calado y velocidad que suponen un mayor peligro para los vehículos de ser arrastrados por la corriente, ésta influencia en el flujo es más sensible para los períodos de retorno de 100 y 500 años, en los que se tiene un calado mayor dentro del pueblo, con características más representativas de velocidad en el sentido del flujo y que en las condiciones topográficas previas, se ven favorecidos por una dinámica de flujo menos centralizada de la corriente dentro del pueblo.

Por otra parte, al analizar los resultados de peligro para edificaciones, se observa que el desarrollo de la obra de mitigación en sus dos etapas, posibilita la formación de una zona de peligro de daño estructural para edificios en el sector que se encuentra entre el dique construido y el río, sobre el margen derecho del mismo (figura 61), donde, tal y como se ha mencionado anteriormente, el flujo se concentra por la restricción que representa el dique.

*Figura 61. Comportamiento de las zonas de peligro de daño para edificios en función del desarrollo de la obra de mitigación para $Q_{T500}$ = 218 m³/s*




En el caso de las estructuras ligeras, además de generarse los mapas de peligrosidad de daño estructural en función de las características de inundación, se hace un análisis adicional en el que se determina, a partir de los elementos actualmente expuestos en la zona urbana, el número y tipo de elementos bajo riesgo de daño estructural para los diferentes escenarios topográficos (etapas de construcción del dique) dentro de Pajares de Pedraza.

Esto se obtiene de la intersección de las zonas con peligro de daño estructural en el territorio, con la composición del catastro urbano. La proyección cartográfica de este análisis se muestra en el Anexo 9, y un resumen de la evaluación cuantitativa de elementos en riesgo se detalla en las tablas 16 a 20.

*Tabla 16. Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T5}$ = 59m³/s*

| | | Elementos en riesgo para $Q_{T5}$ = 59 m³/s | | |
|---|---|---|---|---|
| Tipo de ocupación urbana | Elementos expuestos | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 |
| V2P | 8 | 0 | 0 | 0 |
| V1P | 7 | 0 | 0 | 0 |
| V1O | 60 | 0 | 0 | 0 |
| V2O | 41 | 0 | 0 | 0 |
| ES_L | 17 | 1 | 1 | 1 |
| ES_I | 1 | 0 | 0 | 0 |
| NO_CONST | 93 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 227 | 1 | 1 | 1 |

*Tabla 17. Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T25}$ = 104m³/s*

| Tipo de ocupación urbana | Elementos expuestos | Elementos en riesgo para $Q_{T25}$ = 104 m³/s | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 |
| V2P | 8 | 2 | 0 | 0 |
| V1P | 7 | 1 | 0 | 0 |
| V1O | 60 | 1 | 0 | 0 |
| V2O | 41 | 3 | 1 | 0 |
| ES_L | 17 | 1 | 1 | 1 |
| ES_I | 1 | 0 | 0 | 0 |
| NO_CONST | 93 | 5 | 1 | 0 |
| TOTAL | 227 | 13 | 3 | 1 |

*Tabla 18. Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T50}$ = 126m³/s*

| Tipo de ocupación urbana | Elementos expuestos | Elementos en riesgo para $Q_{T50}$ = 126 m³/s | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 |
| V2P | 8 | 4 | 0 | 0 |
| V1P | 7 | 1 | 1 | 0 |
| V1O | 60 | 3 | 0 | 0 |
| V2O | 41 | 5 | 1 | 0 |
| ES_L | 17 | 1 | 1 | 1 |
| ES_I | 1 | 0 | 0 | 0 |
| NO_CONST | 93 | 13 | 2 | 0 |
| TOTAL | 227 | 27 | 5 | 1 |

*Tabla 19. Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T100}$ = 151m³/s*

| Tipo de ocupación urbana | Elementos expuestos | Elementos en riesgo para $QT_{100}$ = 151 m³/s | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 |
| V2P | 8 | 5 | 3 | 3 |
| V1P | 7 | 2 | 1 | 0 |
| V1O | 60 | 6 | 3 | 5 |
| V2O | 41 | 7 | 5 | 6 |
| ES_L | 17 | 1 | 1 | 1 |
| ES_I | 1 | 0 | 0 | 0 |
| NO_CONST | 93 | 29 | 12 | 14 |
| TOTAL | 227 | 50 | 25 | 29 |

*Tabla 20. Evaluación cuantitativa de elementos del catastro urbano con riesgo de daño estructural para $Q_{T500}$ = 218m³/s*

| Tipo de ocupación urbana | Elementos expuestos | Elementos en riesgo para $Q_{T500}$ = 218 m³/s | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 |
| V2P | 8 | 6 | 6 | 6 |
| V1P | 7 | 3 | 3 | 3 |
| V1O | 60 | 15 | 20 | 21 |
| V2O | 41 | 14 | 14 | 13 |
| ES_L | 17 | 3 | 3 | 3 |
| ES_I | 1 | 0 | 0 | 0 |
| NO_CONST | 93 | 47 | 46 | 45 |
| TOTAL | 227 | 88 | 92 | 91 |

Partiendo del análisis del número de elementos en riesgo ante los diferentes escenarios simulados, es posible observar que en los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años el desarrollo de la obra de mitigación (dique) en sus diferentes etapas, provoca una reducción del número de bienes bajo circunstancias de riesgo de daño estructural por las características de velocidad y calado de la inundación.

En el caso de la avenida de 500 años, los resultados obtenidos indican que el desarrollo de la obra de mitigación en sus dos etapas, tiene como consecuencia, un aumento en el número de los elementos afectados por inundación con características de velocidad y calado que representan peligro de daño estructural.

## 6.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN DEL RIESGO A PARTIR DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL

Dentro de las condiciones de comparación, es importante destacar, que en la definición del modelo unidimensional y bidimensional, se utilizaron mapas diferentes de distribución espacial del parámetro rugosidad (n de Manning), lo cual permite anticipar una discrepancia en los resultados, sin embargo, en el análisis de sensibilidad del modelo bidimensional con respecto al parámetro rugosidad se ha observado la poca influencia del mismo en aquellas zonas de mayor profundidad, que a su vez están asociadas a zonas de mayor peligro.

### 6.5.1. COMPARACIÓN DE LA VALORACIÓN DEL RIESGO ECONÓMICO, OBTENIDO A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL.

En las tablas 21 y 22 se muestran los resultados de la valoración del riesgo de inundaciones obtenido de la integración de factores, a partir de los datos proporcionados por los modelos hidráulicos aplicados en el análisis de peligrosidad de inundaciones en la localidad de Pajares de Pedraza.

*Tabla 21. Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza, a partir de los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional, considerando el escenario de inundación durante el período agrícola inactivo*

| | Modelo Unidimensional (Reverte, 2013) | Modelo Bidimensional | Relación modelo bidimensional/ modelo unidimensional |
|---|---|---|---|
| $Q_{T50}$ = 126 m³/s | 149.499 € | 475.322 € | 3,2 |
| $Q_{T100}$ = 151 m³/s | 298.348 € | 687.164 € | 2,3 |
| $Q_{T500}$ = 218 m³/s | 870.463 € | 901.085 € | 1,0 |

*Tabla 22. Valoración del riesgo de inundaciones en Pajares de Pedraza, a partir de los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional, considerando el escenario de inundación durante el período agrícola activo*

| | Modelo Unidimensional (Reverte, 2013) | Modelo Bidimensional | Relación modelo bidimensional/ modelo unidimensional |
|---|---|---|---|
| $Q_{T50}$ = 126 m³/s | 235.562 € | 587.359 € | 2,5 |
| $Q_{T100}$ = 151 m³/s | 410.302 € | 805.404 € | 2,0 |
| $Q_{T500}$ = 218 m³/s | 1.043.134 € | 1.047.100 € | 1,0 |

Al observar los cálculos de la valoración del riesgo para ambos modelos, destaca la diferencia entre los resultados para los caudales de periodos de retorno de 50 y 100 años, en los que el riesgo económico determinado a partir de los datos obtenidos del modelo bidimensional corresponden al doble o más del doble de los que se obtienen al usar los datos proporcionados por el modelo unidimensional. Por otra parte, los resultados de la simulación para el caudal correspondiente al periodo de retorno de 500 años responden a una razón de variación entre ambos modelos cercana a 1.

### 6.5.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LÁMINA DE INUNDACIÓN Y CALADO MÁXIMO, OBTENIDOS A PARTIR DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL

Las figuras 62 a 64 muestran la extensión en planta del área de inundación para diferentes períodos de retorno, aplicando los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional.

*Figura 62. Área de inundación obtenida con los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para $Q_{T50}$ = 126 m³/s*

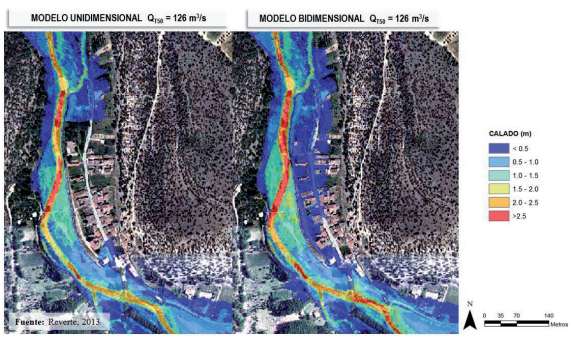



*Figura 63. Área de inundación obtenida con los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para $Q_{T100}$ = 151 m³/s*

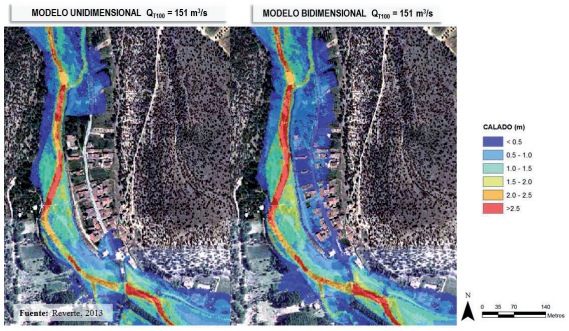
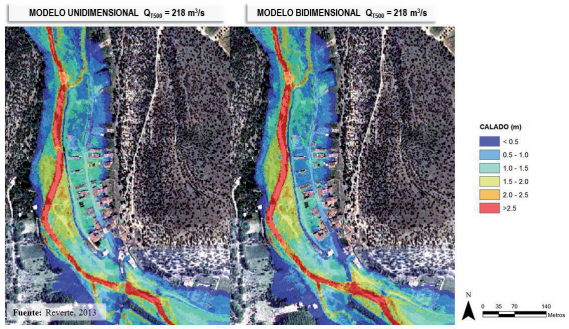
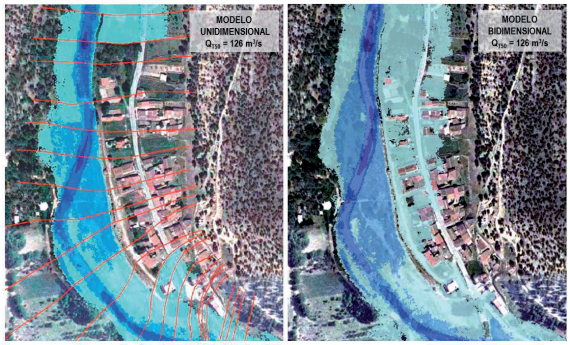



*Figura 64. Área de inundación obtenida con los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para $Q_{T500}$ = 126 m³/s*




En la distribución espacial de ocupación de agua, según los resultados de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional para diferentes períodos de retorno en Pajares de Pedraza, se observan zonas comunes afectadas por inundación en ambos modelos, sin embargo, la discrepancia principal entre ambos, se tiene en una zona que según el modelo unidimensional aparece como libre de inundación dentro del núcleo urbano para los períodos de retorno de 50 y 100 años. Para apoyar este análisis, en la figura 65 se ilustra la situación descrita.

*Figura 65. Detalle comparativo de distribución espacial de ocupación de inundación en el núcleo urbano de Pajares de Pedraza*



### 6.5.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CALADO MÁXIMO, OBTENIDO A PARTIR DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL

Al aplicar la metodología de determinación de coeficientes de variación, para caracterizar la distribución espacial que describe el comportamiento de los resultados de calado máximo obtenido en los dos modelos, se obtienen los resultados que se muestran en la figura 66 y en la tabla 23.

*Figura 66. Distribución espacial del coeficiente de variación local ($CV_L$) de los resultados de calado máximo obtenidos con el modelo hidráulico unidimensional, respecto de los obtenidos con el modelo bidimensional*

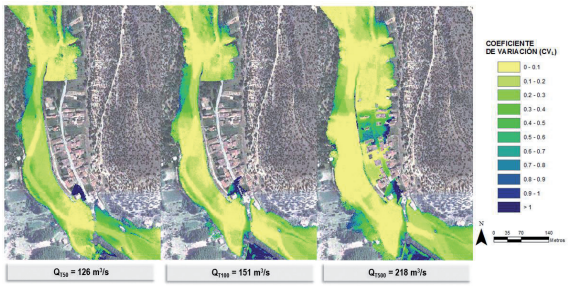



*Tabla 23. Coeficiente de variación global $CV_G$ de calado máximo para los diferentes escenarios de análisis*

| | $Q_{T50}$ = 126 m³/s | $Q_{T100}$ = 151 m³/s | $Q_{T500}$ = 218 m³/s |
|---|---|---|---|
| Coeficiente de variación global ($CV_G$) | 24% | 24% | 24% |

Estos resultados permiten identificar que los valores del $CV_L$ presentan mayor variabilidad en las zonas con menor calado, así como en aquellas zonas en las que el flujo se encuentra condicionado por la presencia de estructuras fijas. El coeficiente de variación global obtenido para los tres escenarios analizados ($CV_G$=24%) no permite establecer diferencias claras entre ambos modelos.

En el escenario que corresponde a la lámina de inundación de asociada al período de retorno de 500 años es posible comparar los resultados de los dos modelos ya que ambos muestran dicho sector inundado, en este caso se observa que los valores de $CV_L$ dentro de la zona urbana presentan una alta variabilidad principalmente a la entrada del pueblo y en la zona de menor pendiente dentro del mismo, destacando que el calado es sobreestimado en el modelo hidráulico unidimensional respecto al calculado con el modelo bidimensional en dichos sectores. En este análisis, no se debe dejar de lado la influencia que puede ejercer el uso de mapas diferentes de distribución de coeficientes de rugosidad en los dos modelos, que tendrán una mayor repercusión en las zonas con calados menores.

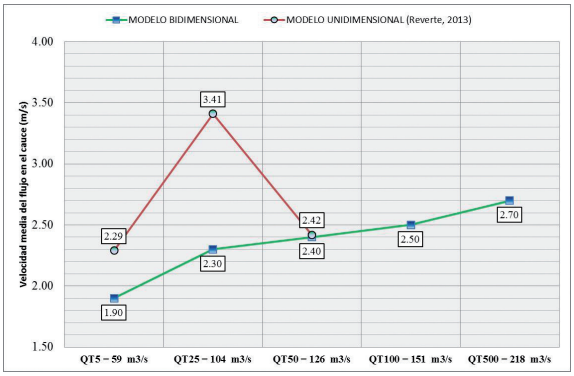
### 6.5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA MEDIA EN EL CAUCE DEL RÍO, OBTENIDA A PARTIR DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL

En la tabla 24 y figura 67 se exponen los resultados obtenidos de velocidad máxima media en el cauce del río para los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional.

*Tabla 24. Resultado obtenido de velocidad máxima promedio en el cauce (m/s) para los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional*

| | Velocidad máxima media en el cauce (m/s) | |
|---|---|---|
| | Modelo unidimensional (reverte, 2013) | Modelo bidimensional |
| $Q_{T5}$ = 59 m³/s | -- | 1,90 |
| $Q_{T25}$ = 104 m³/s | -- | 2,30 |
| $Q_{T50}$ = 126 m³/s | 2,29 | 2,40 |
| $Q_{T100}$ = 151 m³/s | 3,41 | 2,50 |
| $Q_{T500}$ = 218 m³/s | 2,42 | 2,70 |

*Figura 67. Resultado obtenido de velocidad máxima promedio en el cauce (m/s) para los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional*




Los resultados obtenidos de velocidad máxima en el cauce del río en el modelo hidráulico bidimensional, muestran una tendencia clara de la relación que guarda la velocidad con el caudal simulado, identificándose que un incremento del caudal de entrada en el modelo, tiene el efecto de incrementar la velocidad en el cauce del río. Por otra parte, los resultados obtenidos de velocidad máxima en el cauce del río en el modelo unidimensional, no sugieren una tendencia que relacione los incrementos de caudales de entrada con las variaciones de la velocidad de flujo.

# 7. DISCUSIÓN

## 7.1. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de este trabajo incorpora elementos que influyen directamente en los resultados obtenidos, y que deben ser tomados en cuenta para establecer la referencia de análisis de los mismos.

Dentro de estas limitaciones se debe mencionar que los datos de entrada correspondientes a los caudales de simulación para diferentes períodos de retorno, que se retoman del análisis estadístico de caudales punta aplicando funciones de distribución y métodos de ajuste de parámetros, incorporan una incertidumbre considerable para eventos extremos por la deficiencia en el ajuste de la curva de gastos para dichos escenarios, como resultado de las condiciones hidráulicas que condicionan el flujo en la sección transversal donde se tiene la estación de aforo (Reverte, 2013).

Otra limitación fundamental que condiciona el análisis de resultados por la incertidumbre que genera en los mismos, es la omisión de las etapas de calibración y validación de los modelos hidráulicos utilizados, que no pudieron ser completadas debido a la falta de la información para relacionar las referencias que se tienen de eventos de inundación anteriores (placas de inundación y limnimarcas) con los caudales registrados por la estación de aforo. Se realizó la solicitud de esta información a la Confederación Hidrográfica del Duero, sin poderse concretar la obtención de la misma para el desarrollo de las fases antes mencionadas. Se utilizó entonces un elemento de juicio en el que se evaluaron los resultados obtenidos de la simulación hidráulica, en base a la obtención de parámetros hidráulicos que se mantuvieran dentro de órdenes de magnitud lógicos.

También se plantea la limitante relacionada con la evaluación beneficio-costo de la obra de mitigación, ya que al desconocer el monto al que ascienden las etapas de construcción de la misma, no puede establecerse un balance para relacionar los riesgos económicos totales y desglosados que se ven alterados con el desarrollo del dique.

Finalmente, en el análisis comparativo de los resultados de los modelos hidráulicos uni- y bidimensional, se presentó la limitante para poder realizar el análisis comparativo entre el riesgo económico calculado en las estructuras fijas, ya que no se contaba con el dato correspondiente al modelo unidimensional.

## 7.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR PELIGROSIDAD

- En los resultados del análisis del factor peligrosidad referente al parámetro velocidad, se observa que para la lámina de inundación asociada a los períodos de retorno de 5, 25 y 50 años, el desarrollo de las dos etapas del dique posibilita la disminución de la velocidad de corriente en las zonas inundadas dentro del pueblo, de forma semejante a lo observado en el parámetro calado (Figuras 17 a 19). También es importante destacar, que otro de los efectos significativos de la obra de mitigación en sus diferentes etapas, es posibilitar la ruptura de continuidad de zonas de mayor velocidad dentro del pueblo. Sin embargo, para las avenidas asociadas a os periodos de retorno de 100 y 500 años, el desarrollo de la obra de mitigación posibilita que la velocidad máxima de flujo sobre la calle principal, tenga algunas zonas con aumento de la misma, manteniendo características discontinuas (Figuras 20 y 21).

- Al igual que ocurre con el parámetro calado, se observa que los resultados obtenidos de velocidad máxima reflejan que el desarrollo de la obra de mitigación y su función de restringir el libre tránsito de la avenida, al ocasionar una concentración del flujo al costado poniente de la estructura, provocan incrementos de la velocidad en dicho sector para los diferentes períodos de retorno.

- El coeficiente de variación global $CV_G$ de calado, sugiere una leve tendencia de mayor variabilidad en el modelo, en la medida que la variación de rugosidad se asocia a caudales bajos. Sin embargo, la determinación de este coeficiente no permite establecer diferencias significativas entre los escenarios analizados (Tabla 3).

- El coeficiente de variación global $CV_G$ de velocidad, sugiere que la variabilidad del resultado es aproximadamente la misma tanto para caudales bajos como altos, sin embargo, por tratarse de un coeficiente que engloba el promedio de resultados de todo el modelo, no permite establecer conclusiones definitivas del efecto de variación del parámetro rugosidad (Tabla 4).

- En general, se observa que el efecto de la rugosidad disminuye conforme aumenta el calado, por tanto, la influencia de este parámetro, es poco representativa en aquellas zonas de mayor profundidad de lámina de agua y que se asocian a zonas de mayor peligrosidad.

## 7.3. ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS DE RIESGO ECONÓMICO DE INUNDACIONES PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

- Las zonas inundables se definen en la legislación de aguas, suelo y ordenación territorial y Protección Civil, siendo todas ellas coordinadas mediante el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación que transpone la Directiva 2007/60, sobre la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (MAGRAMA, 2011a)

  El Texto Refundido de la Ley de Aguas introduce el concepto de "zona inundable" en el artículo 11 como *los terrenos que pueden resultar inundados durante las crecidas no ordinarias de los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos*, los cuales conservarán la calificación jurídica y la titularidad dominical que tuvieren (MAGRAMA, 2011a).

  Esta definición es precisada por el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que define la "zona inundable" en su artículo 14, considerando zonas inundables las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo periodo estadístico de retorno sea de quinientos años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e

hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas (MAGRAMA, 2011a).

- Tomando en cuenta este marco legal, las definiciones que le acompañan, y aplicando dichos criterios en el contexto de la zona de estudio, se considera que los resultados de este trabajo (tomando en cuenta las limitaciones del mismo) pueden ser tomados como fuente de información para los estudios hidrológicos e hidráulicos necesarios para determinar las zonas inundables en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), estableciéndose el valor del riesgo económico asociado a la avenida de inundación con probabilidad de ocurrencia baja o excepcional (T=500 años) bajo las condiciones topográficas actuales en 1.032.955 € considerando la ocurrencia durante el período agrícola inactivo (mayor probabilidad de ocurrencia según el análisis estadístico de caudales punta) (Reverte, 2013).

- Tomando como punto de referencia las estadísticas del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) referentes a las indemnizaciones en Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia) por la ocurrencia de inundaciones en los años 1996 y 2003 (Tabla 15), es posible establecer que las cuantías de riesgo económico por unidad de vivienda, calculadas para los eventos de inundación asociados a los períodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años, se encuentran muy por encima de la mayor cuantía de compensación en la zona de estudio, correspondiente a 1.802,56 € y que aproximadamente correspondería a una avenida con período de retorno de 20 años; de tal manera que el porcentaje de representación de la compensación económica de referencia con respecto al riesgo económico por vivienda varía desde 83% para la inundación asociada al período de retorno de 25 años hasta 26% para las condiciones de riesgo con período de retorno de 500 años; mientras que el riesgo por unidad de vivienda asociado a la lámina de inundación con período de retorno de 5 años, se encuentra por debajo de la cuantía de compensación antes mencionada, teniendo el valor de compensación, para este último caso, una representación de aproximadamente 500% con respecto al riesgo económico por unidad de vivienda calculado (Figura 51).

## 7.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE PELIGROSIDAD DE ARRASTRE DE PERSONAS, VEHÍCULOS Y PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS

- Se observa que los resultados de peligrosidad de arrastre de personas indican que el desarrollo de la construcción de la obra de mitigación hasta su condición actual, cumple su cometido de reducción del peligro de arrastre para avenidas de recurrencia alta a media, pero para avenidas extraordinarias el peligro de arrastre persiste en el núcleo poblacional.

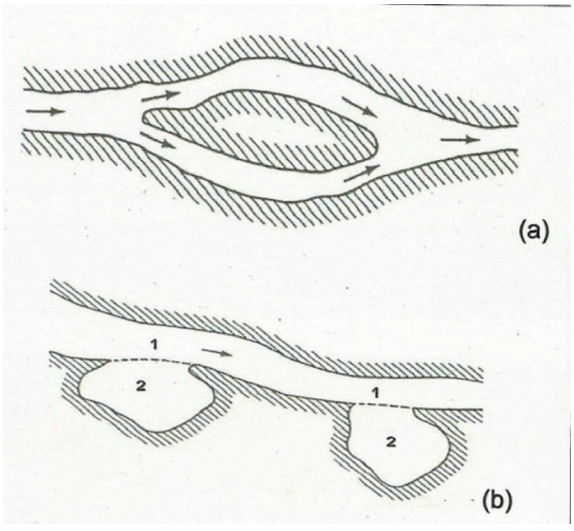
- Los resultados obtenidos sugieren que el desarrollo de la obra de mitigación en sus dos etapas brinda beneficios de reducción del peligro de arrastre de personas para avenidas asociadas a períodos de retorno 5, 25 y 50 años. Sin embargo, para avenidas con períodos de retorno de 100 y 500 años, se observa la generación de zonas sobre la calle principal del pueblo que posibilitan con peligro de arrastre de vehículos. También se identifica una zona de peligro cercana al puente que permite el acceso al pueblo, que permanece invariable con el desarrollo de la obra de mitigación.

- Las restricciones en el flujo que establece el dique, provocan que se genere una zona de peligro de daño estructural en edificios en la planicie ubicada al costado poniente de la obra mitigación sobre el margen derecho del río. Aunque actualmente en el sector no hay nada construido, la zona se encuentra expuesta a un peligro mayor, por tanto no sería recomendable el emplazamiento de edificaciones en dicha zona.

## 7.5. ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL

- La diferencia de resultados en la distribución espacial de inundación sobre el pueblo, obtenida entre los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional, para las avenidas asociadas a los períodos de retorno de 50 y 100 años (Figuras 62 y 63) responde a los fundamentos de solución de cada uno de los modelos, de tal manera que en el modelo unidimensional, las condiciones de solución de ecuaciones entre secciones transversales no permiten observar el flujo de agua dentro del pueblo, debido a la influencia de la variación de la topografía al aproximarse al dique. Una posible solución a esta discrepancia en el modelo unidimensional podría ser la determinación de condiciones internas (figura 68) que permitan el establecimiento de un tramo secundario definido dentro del pueblo, con sus correspondientes secciones transversales asociadas, o la definición de áreas de almacenamiento dentro del mismo (MAGRAMA, 2011b).

*Figura 68. Condiciones internas de separación del caudal por islas (a) y áreas de almacenamiento (b) (MAGRAMA, 2011b)*

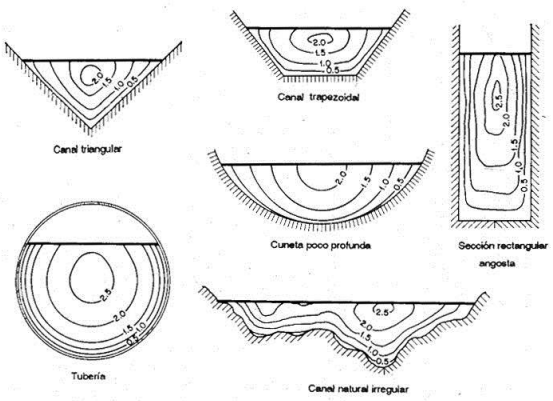



- La estimación del calado en el cauce principal en ambos modelos hidráulicos refleja una similitud significativa para el período de retorno de 500 años, este resultado es congruente,

por una parte, con los resultados de sensibilidad del modelo con respecto al coeficiente de rugosidad, en el que se identifica que no es un parámetro determinante para establecer el calado en zonas de mayor profundidad, tal y como se plantea en el apartado 7.2 de este documento y también es congruente con los esquemas de solución de cada modelo, en el que se establece que al tener zonas de mayor calado, como en los tramos rectos del cauce del río, se tendrá un flujo con características significativamente más representativas en la dirección del mismo, permitiendo la convergencia de los modelos al resolver sus esquemas numéricos correspondientes. En cambio, en las zonas de aguas someras, dado el comportamiento del flujo con características bidimensionales de significativa importancia, se ponen de manifiesto las limitaciones del modelo unidimensional que obtiene valores promedio del tirante hidráulico para las secciones transversales que lo definen, viéndose afectado por la mayor longitud de las mismas en estas zonas y generando discrepancias sensibles entre ambos modelos. Para el caso de estudio, la similitud en los resultados obtenidos entre ambos modelos, hace suponer que para la avenida asociada al período de retorno de 500 años, la inundación dentro del pueblo se comporta como un flujo con características unidimensionales que permiten al modelo obtener resultados que reflejan aproximadamente la dinámica esperada.

En este análisis es importante tener en cuenta que la distribución de velocidades en una sección de canal, se encuentra condicionada por diferentes factores, entre los que destacan la presencia de la superficie libre y la fricción a lo largo de las paredes del canal, provocando que las velocidades no estén uniformemente distribuidas en la sección. (Chow, 2004). En la figura 69 se muestran los modelos generales para la distribución de velocidades en diferentes secciones y formas de canal.

*Figura 69. Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal (Tomado de Chow, 2004)*




Esta característica de variación de la velocidad con la profundidad, es importante al momento de interpretar los resultados de velocidad de los modelos unidimensional y bidimensional, partiendo del esquema de cálculo en el que se basan ambos.

Tomando en cuenta la ingeniería de cálculo detrás de los esquemas de soluciones de ambos modelos, se considera importante destacar que para la zona de estudio, la determinación de la velocidad en los tramos del cauce donde se tengan cambios de dirección, estará mejor definida bajo los criterios de cálculo del modelo bidimensional. Mientras que en tramos largos y rectos del cauce, será el modelo hidráulico unidimensional, el que tendrá mejores resultados, en la medida que se tendrá un flujo con características más representativas en la dirección de la corriente, perpendicular a las secciones que lo definen.

## 8. CONCLUSIONES

- El riesgo económico total calculado a partir de los resultados del modelo hidráulico unidimensional es subestimado con respecto al cálculo obtenido con el modelo bidimensional, debiéndose principalmente a las limitaciones del modelo unidimensional para simular la dinámica de flujo en el núcleo urbano ante caudales que representan crecidas de mediana frecuencia que provocan la inundación del mismo; por otra parte, para avenidas extraordinarias, dadas las características de distribución de calado con mayor altura, se obtienen resultados similares cuantitativamente tasándose el riesgo económico total en los escenarios comunes de análisis de ambos modelos, para el período de labor agrícola inactivo y activo respectivamente, en 870.463 € y 1.043.134 € según el modelo unidimensional y en 901.085 € y 1.047.100 € para el modelo bidimensional. Con respecto a la distribución espacial para avenidas extraordinarias, se encuentra convergencia de resultados entre ambos modelos hidráulicos que hacen suponer que para dichas condiciones, el comportamiento del flujo tiene características significativamente unidimensionales, pero para avenidas de mediana ocurrencia se encuentran discrepancias representativas en la inundabilidad del núcleo urbano, donde será necesario establecer condiciones internas en el modelo unidimensional para definir zonas de flujo en ramales o áreas de almacenamiento (MAGRAMA, 2011b) que posibiliten la aproximación de los resultados obtenidos, cercanos a la dinámica de inundación sobre el pueblo.

  Por otra parte, los resultados de calado máximo para los modelos hidráulicos describen semejanza o menor variabilidad en los tramos rectos de río y en zonas de mayor calado, donde prevalecen condiciones significativamente unidimensionales; mientras que se identifica una divergencia sobresaliente en las zonas de aguas someras caracterizadas por una dinámica bidimensional.

- Con respecto al análisis de sensibilidad del modelo hidráulico construido en Iber, se tiene que la caracterización de rugosidad de la superficie del modelo hidráulico bidimensional definida por los coeficientes de rugosidad de Manning, tiene un efecto menos significativo en la medida que se tiene un mayor calado, por tanto, la influencia de este parámetro es poco representativa en aquellas zonas de mayor profundidad de lámina de agua, que a su vez están asociadas a zonas de mayor peligrosidad, interpretando que los datos de rugosidad no dominan los resultados del modelo. De tal manera que la caracterización de rugosidad, tendrá un efecto significativo en las zonas inundables dentro de la planicie de inundación,

que se caracterizan por poca profundidad, y donde se tendrán calados inferiores a los valores umbral de 0,22 m y 0,67 m por debajo de los cuales el parámetro rugosidad ejerce una mayor influencia en calado y velocidad respectivamente.

Un error en la estimación de la rugosidad en la zona de estudio, ejercerá influencia en el resultado de calado en las zonas de aguas someras del modelo hidráulico, aun con mayor efecto si este se sobreestima. En el caso de otorgar valores subestimados de rugosidad, se afectará en mayor medida el resultado de velocidad en las zonas de mayor pendiente, cambio de dirección y poca profundidad, por lo que en estos sectores debe enfocarse una determinación más exacta de dicho parámetro.

- A partir de los resultados obtenidos del factor peligrosidad utilizando el modelo hidráulico bidimensional Iber, se identifica que la problemática de inundaciones en el núcleo urbano de Pajares de Pedraza está determinada por tres zonas de entrada del flujo de inundación: ingreso por la calle principal del pueblo; reflujo proveniente desde aguas abajo en el punto de finalización de la obra de mitigación; e ingreso de agua proveniente del desbordamiento del río Cega hacia su margen derecho, en el costado poniente del pueblo; siendo esta última condición de entrada la que se ve principalmente limitada por la construcción del dique en su condición actual, con mayor efectividad para las avenidas de alta y mediana frecuencia. La identificación de estos puntos de entrada de las avenidas de inundación al pueblo, pueden servir como elementos de juicio para la toma de decisiones del desarrollo de medidas de mitigación (preventivas o correctoras) en el sentido de mejorar las expectativas de riesgo en la localidad.

- A pesar de que las condiciones actuales del dique no evitan la inundación del núcleo urbano para periodos de retorno superiores a 25 años, y que el riesgo económico total calculado para la zona inundable es mayor que el correspondiente a la condición sin dique, es importante destacar que los bienes expuestos experimentan efectos diversos, derivados de las dos etapas de construcción del dique: Las zonas de ocupación urbana perciben una sensible reducción del riesgo económico con respecto a la situación sin dique y a la primera etapa del mismo, debiéndose principalmente a la reducción del peligro en la zona urbana (menor calado), también se reducen e interrumpen las zonas dentro del pueblo donde la inundación tiene características que representan peligro de arrastre de personas y vehículos, así como la reducción del número de viviendas bajo riesgo de daño estructural para avenidas de alta a mediana frecuencia de ocurrencia; las zonas de ocupación rústica, actualmente, tienen un menor riesgo económico para avenidas de mediana a baja frecuencia de ocurrencia que con las condiciones previas, pero para avenidas con alta probabilidad de ocurrencia se ven afectadas por el caudal restringido, que al no distribuirse sobre el pueblo, pasa a ocupar otras áreas de ocupación rústica, lo cual no ocurría sin el dique, sin embargo, los resultados indican que a pesar que el riesgo económico aumenta con respecto a la situación inalterada, esta segunda etapa del dique si genera ventajas de reducción del riesgo económico, comparado con el riesgo económico que supone haber ejecutado únicamente la primera fase; las estructuras fijas son los elementos expuestos que se ven principalmente afectados, por un incremento del riesgo económico por el desarrollo del dique en sus dos etapas, ya que el factor peligro aumenta por la restricción de flujo que representa la obra de mitigación, incluso, el riesgo económico calculado con la situación actual es mayor que el riesgo económico estimado para el dique parcialmente construido, siendo principalmente afectado el puente peatonal que recibe una lámina de agua de mayor altura.

- Los resultados obtenidos de riesgo económico total asociado a las avenidas de inundación para diferentes períodos de retorno en Pajares de Pedraza, corroboran la previsión de que éstos serán mayores, si las avenidas de inundación tienen lugar durante el período agrícola activo (mayor vulnerabilidad en la ocupación rústica). Esta perspectiva lógica se complementa con la representatividad de este incremento en función de la avenida de inundación, de tal manera que el incremento será más significativo (hasta 27%) en avenidas asociadas a una frecuencia de ocurrencia alta a media, y menos representativo (hasta 14%) para avenidas de ocurrencia extraordinaria.

- Las cuantías de riesgo económico por unidad de vivienda para la situación topográfica actual, calculadas para los eventos con períodos de retorno superiores a 25 años, se encuentran muy por encima de la referencia de compensación de 1.802,56 € por vivienda que, según los datos obtenidos en este trabajo, corresponde aproximadamente a una avenida con período de retorno de 20 años, y que se obtiene de las estadísticas de indemnizaciones del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) en Pajares de Pedraza, para los eventos de inundación en los años 1996 y 2003. Únicamente el riesgo económico por vivienda asociado a la avenida de inundación con período de retorno de 5 años se encuentra por debajo de esta compensación de referencia, representando aproximadamente una quinta parte de la misma.

- El núcleo urbano de Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), bajo las condiciones topográficas actuales y según las características hidráulicas obtenidas en Iber (calado, velocidad y extensión) para las avenidas modelizadas, que resultan del análisis estadístico de frecuencia de caudales punta, utilizando la función de distribución generalizada de valores extremos (Generalized Extreme Value, GEV) con el método de ajuste de parámetros de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood, ML), se encuentra expuesto al peligro de inundación ante eventos correspondientes a períodos de retorno superiores a 25 años, por lo que según la Ley de Aguas y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, se cataloga como zona inundable. Por tanto, a partir de los niveles teóricos obtenidos de este estudio para las avenidas cuyo período de retorno sea de 500 años, y tomando en cuenta las limitaciones del mismo, se determina para la localidad de Pajares de Pedraza (Arahuetes, Segovia), bajo las condiciones topográficas actuales, un riesgo económico del orden de 1.032.955 € considerando el escenario con mayor probabilidad de ocurrencia según el registro estadístico de caudales punta (época agrícola inactiva), y de 1.178.970 € en el escenario menos probable (época agrícola activa).

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Arcement, G.J.; Schneider, V.R.; (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. USGS, Denver.*

Australian Government (2001). Economic Costs of Natural Disasters in Australia. Department of Transport and Regional Studies, Bureau of Transport and Regional Services. *http://www.btre.gov.au/docs/r103/contents.htm.*

Ayala, F.J., (1993). Estrategias para la Reducción de Desastres Naturales. Investigación y Ciencia 200, pp. 6-13.

Ballesteros Canovas, J.A.; Ruiz-Villanueva, V.; Stoffel, M.; Eguibar, M.A.; Sanchez-Silva, M.; Bodoque, J.M.; Diez-Herrero, A. (2013a). *Can tilted trees be used for flood discharge estimaton? Second American Dendrochronology Conference, 13-17 May 2013. Tucson, Arizona. Book of Abstracts, Dendrohydrology/* 166, p. 14.

Ballesteros Canovas, J.A.; Sánchez-Silva, M.; Márquez, F.; Diez-Herrero, A.; Bodoque, J.M.; Ruiz, V.; Stoffel, M.; Eguibar, M.A. (2013b). Floods peak discharge estimation based on deformation of tilted trees. *Accepted Abstracts of the 9th International Conference on Dendrochronology (WorldDendro 2014)*, p. 11, pp. 13-17 January 2014, Melbourne (Australia).

Ballesteros-Canovas, J.A.; Bodoque, J.M.; Ruiz-Villanueva, V.; Diez-Herrero, A. (2012a). *Advance on the past flood discharge estimation from the dendro-mechanical analysis of tilted trees.* Annual Meeting Abstracts, *page 52, Association of American Geographers, New York, USA, 24 to 28 February 2012.*

Ballesteros Cánovas, J.A.; Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Ruiz-Villanueva, V. (2012b). Una nueva metodología para la reconstrucción de caudales de avenidas a partir de la información contenida en los árboles inclinados de las márgenes fluviales. En: A. González Díez (Coord.), Avances de la Geomorfología de España, pp. 453-456. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander, 17-20 septiembre de 2012. PUbliCan Ediciones, Universidad de Cantabria, Santander, 690 pp. ISBN 978-84-86116-54-5; DL SA 446-2012.

Bladé, E.; Cea, L.; Corestein, G.; Escolano, E.; Puertas, J.; Vázquez-Cendón, E.; Dolz, J.; Coll, A.; (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 30(1), 1-10.

BOE (2001). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio de 2001, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. BOE núm. 176 (24 julio 2001). 26791-26817.

BOE (2010). Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. BOE 171 (15 julio 2010): 61954-61967.

BOE (2012). Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo. BOE núm. 227 (20 septiembre 2012). 66167-66192.

Brunner, G.W., (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 4.1. U.S. Army Corps of Engineers, Davis.*

*Consellería D´ Obres Públiques, Urbanisme I Transports de la Generalitat Valenciana*; (2002). Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA). *Direcció General d´Urbanisme i Ordenació Territorial*. Recuperado de:

*http://www.cth.gva.es/espa/urbanismo/publicaciones/pdf_patricova/DOCS/patricova.exe*

CEDEX, FLUMEN, GEAMA & CIMNE; (2012). Iber, Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas - Manual de referencia hidráulico. p5, p7, p45.

Chow, V.T.; (2004). Hidráulica de los canales abiertos. McGraw-Hill. Ed. Nomos S.A. Colombia, 2004. p25.

Cuervo Muñoz, A.E.; (2012). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (Iber) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. Trabajo fin de máster. *Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politécnica de Catalunya.*

Díez, A. y Pedraza, J. (1997). Cálculo hidrometeorológico de caudales de avenida en la subcuenca de El Burguillo (río Alberche, Cuenca del Tajo).*Geogaceta*, 21, 93-96. ISSN 0213-683X; D.L. M-30884/95

Díez Herrero, A. (2008a). Taller: ¡Doctor, doctor... que se me inunda la casa! *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.1, 35-42. ISSN: 1132-9157; D.L.: M-27329-1992.

Díez-Herrero, A.; Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008b). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, 190 págs., Madrid. D.L. M-46538-2008; ISBN 978-84-7840-770-5; NIPO 657-08-026-2.

Díez-Herrero, A.; Ballesteros-Cánovas, J.A.; Bodoque, J.M.; Ruiz-Villanueva, V. (2013a). A review of dendrogeomorphological research applied to flood risk analysis in Spain. *Geomorphology*, p. 196, pp. 211-220.

Díez-Herrero, A.; Ballesteros-Cánovas, J.A.; Bodoque, J.M.; Ruiz-Villanueva, V. (2013b). *A new methodological protocol for the use of dendrogeomorphological data in flood risk analysis. Hydrology Research*, 44.2, pp. 234-247.

DOUE (2007). Directiva 2007/60, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. DOUE (23 octubre 2007). L288/27 – L288/34.

Elera Moreno, G.A.; (2005). Modelación numérica del Río Piura utilizando River 2D, entre los puentes Cáceres e Integración. pp. 73-74. Perú (2005).

Escobar, C.A. (2010). Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidráulico del embalse Punchiná (Antioquia). Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 14, p. 97-113. Diciembre 2010.

González, M. (2013). La dendrogeomorfología en el análisis de peligrosidad de inundaciones torrenciales. Trabajo fin de grado, Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 83 pp. (documento inédito).

INDUROT – Universidad De Oviedo; (2010). Plan especial de Protección Civil ante inundaciones en el Principado de Asturias (PLANINPA). Dpto. de Protección Civil – 112 ASTURIAS.

Instituto Geográfico Nacional (IGN). Ministerio de Fomento. Dirección web: *http://www.ign.es*. Enlace del visualizador IBERPIX: *http://www.iberpix.com*

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Enlace al navegador de información geocientífica INFOIGME: *http://www.igme.es/infoigme/visor/*. Enlace al Plan MAGNA (1972 - 2005) Hojas 430 - 431, 457-458: http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp

Instituto Nacional de Estadística (INE). Dirección web: *http://www.ine.es/inebmenu/indice.htm*

Kelman, I Y Spence, R. (2004). An overview of flood actions on buildings. Engineering Geology, 73: pp. 297–309.

MAGRAMA (2011a). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Z.I. con probabilidad baja o excepcional (T=500 años). Recuperado de: *http://www.sig.magrama.es/Docs/PDFServiciosProd1/ZI_T500.pdf*

MAGRAMA (2011b). MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Guía Metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables. Ed. MAGRAMA, 2011. Pp 210-211

Martín-Vide, J.P (1997). Ingeniería de ríos. Ediciones UPC, Barcelona.

Nakamura, T.; Hutton, C; Kunbao, X Y Gavidia, J. (2001*). Assessment of vulnerability to flood impacts and damages. Disaster Management Programme, UNCHS (Habitat)*. Recuperado de: http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/eng/doc14385/doc14385-contenido.pdf.

Queensland Government (2002). Disaster Loss Assessment Guidelines. Department of Emergency Services, Counter Disaster and Rescue Services. Final edited compilation 9 *May 2002*. Recuperado de: http://www.emergency.qld.gov.au/cdrs/mitigation/pdf/Guidelines.pdf.

Rebolledo Fajardo B. (2014). Vulnerabilidad del territorio a la contaminación por nitratos de origen agrario. Desarrollo y aplicación del modelo paramétrico IVNA-LSP. p 115.

Reverte, C. (2013). Análisis del riesgo económico por avenidas e inundaciones en Pajares de Pedraza. Trabajo fin de máster (inédito). Universidad de Málaga.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. & Ratto, M.; (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models, Wiley Online Library.*

Sede Electrónica de la Dirección General del Catastro. Dirección web: *https://www.sedecatastro.gob.es/*

Semarnat. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), pp33.

SMEC (2002). *Narrabeen Lagoon Floodplain Risk Management Plan. Volume 2. Warringah Council, Pittwater Council and Department of Land and Water Conservation (Australia)*. Recuperado de: http://www.warringah.nsw.gov.au/narrabeen_lagoon_floodplain_2003.htm.

Van Der Sande, C. (2001). *River flood damage assessment using IKONOS imagery. European Commission, Joint Research Centre, Space Applications Institute (SAI).*

# 10. ANEXOS

## 10.1. AXEXO 1. GALERÍA FOTOGRÁFICA DE CONDICIONES OBSERVADAS EN LA LOCALIDAD DE PAJARES DE PEDRAZA (ARAHUETES, SEGOVIA)

***Figura A1-1.*** *Inundación observada desde el dique en Pajares de Pedraza (Marzo, 2013)*

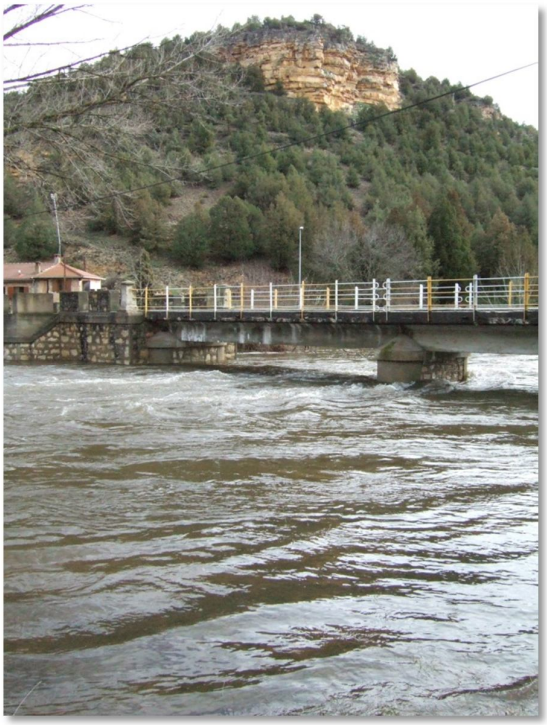


***Figura A1-2.*** *Inundación observada a la altura del Puente Pajares (Marzo, 2013)*

***Figura A1-3.*** *Inundación observada en zona de recreo El Cega (Marzo, 2013)*

***Figura A1-4.*** *Vivienda en Pajares de Pedraza donde se observan costales de arena colocados para impedir el ingreso de la inundación (Marzo, 2013).*

***Figura A1-5.*** *Inundación dentro de una vivienda en Pajares de Pedraza (Marzo 2013).*

***Figura A1-6.*** *Placa que marca la altura de la lámina de agua en el evento de Enero de 1996.*

10.2. ANEXO 2. PROCESO DETALLADO DE DESARROLLO DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL IBER EN PAJARES DE PEDRAZA (ARAHUETES, SEGOVIA).

## DATOS DE ENTRADA DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL

### 1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El modelo digital de elevación original utilizado para caracterizar la zona de estudio proviene del tratamiento de los datos LIDAR originales (ficheros .las), para la eliminación del ruido provocado por la vegetación, así como de las estructuras transversales al canal; del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del España, con una densidad media de 0.5 ptos/$m^2$ (Figura A2-1).

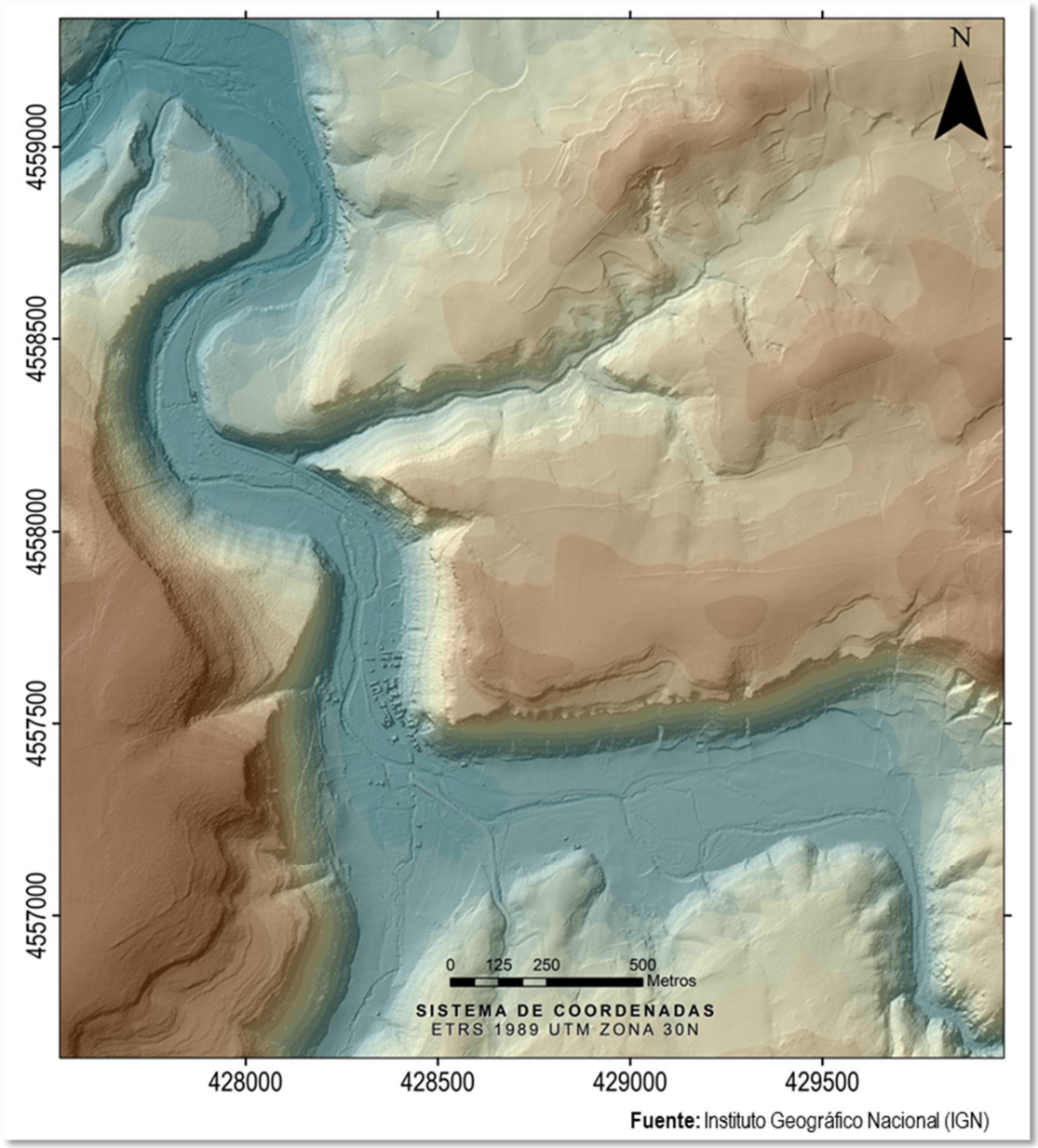



***Figura A2-1.*** *Mapa ráster del modelo digital de elevaciones de la superficie del suelo, con resolución 1m x 1m*

La delimitación del área del modelo digital de elevaciones del terreno, toma en cuenta los siguientes factores:

- Ubicación del núcleo poblacional de Pajares de Pedraza.
- Margen de seguridad para evitar la influencia de la ubicación de las condiciones de contorno, dejando una longitud de tránsito moderada entre la zona de interés y la entrada y salida del modelo.
- Eliminar zonas no inundables del modelo digital de elevaciones del terreno, para reducir el número de celdas de cálculo no efectivas, con el objetivo de mejorar el rendimiento de cálculo de la modelación.

En la figura A2-2, se muestra el modelo digital de elevaciones del terreno que se usó para la simulación de los diferentes escenarios:

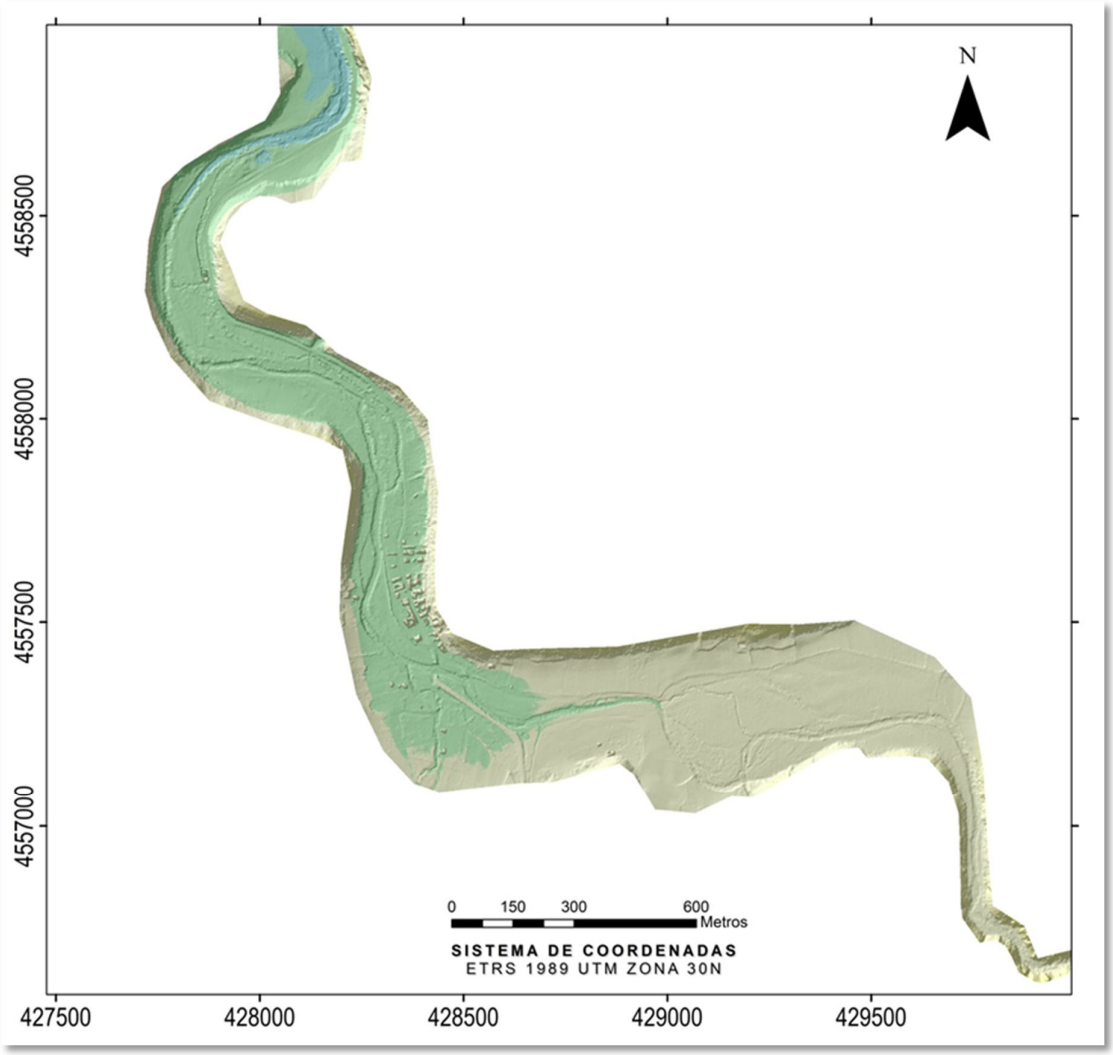



***Figura A2-2.*** *Mapa ráster del modelo digital de elevaciones de la superficie del suelo delimitado por las condicionantes de rendimiento y ubicación de la zona de interés.*

## 1.1. MODIFICACIONES DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DEL TERRENO

### 1.1.1. INCORPORACIÓN DE ESTRUCTURAS INTERNAS

En el tramo de análisis, se tiene la presencia de dos estructuras fijas consistentes en puentes. Uno de ellos, posee una pila central que está construida sobre el lecho del río Cega, y para incorporarla al modelo se optó por modificar el modelo digital de elevación en dicha sector (Figura A2-3).

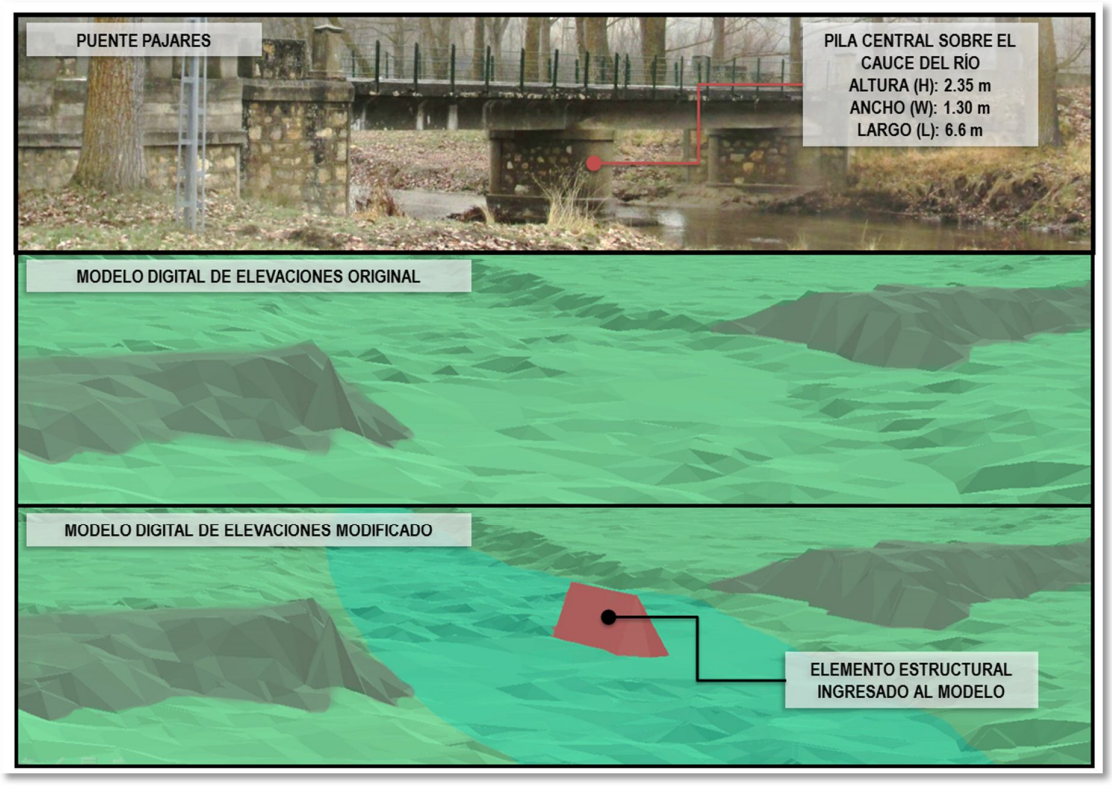



***Figura A2-3.*** *Imagen de uno de los puentes ubicados en Pajares de Pedraza y la modificación del modelo digital de elevación para incorporar la pila central.*

El tablero de los puentes que forman parte de las estructuras de simulación, se define posteriormente en los datos hidráulicos dentro del modelo Iber.

### 1.1.2. INCORPORACIÓN DE OBRAS DE MITIGACIÓN

Tal y como se menciona en el apartado de descripción de la problemática de inundaciones en Pajares de Pedraza, se presentan tres escenarios de simulación relacionados con tres etapas de desarrollo de una obra de mitigación, consistente en un dique.

Para incorporar esta variable a los modelos de simulación, se realizó la modificación del modelo de elevación digital, creando los tres siguientes escenarios:

- **Condición 1: Sin dique**
- **Condición 2: Dique construido (Primera Etapa)**
- **Condición 3: Dique construido (Segunda Etapa)**

En la figura A2-4, se muestra la extensión en planta del dique en sus diferentes etapas.

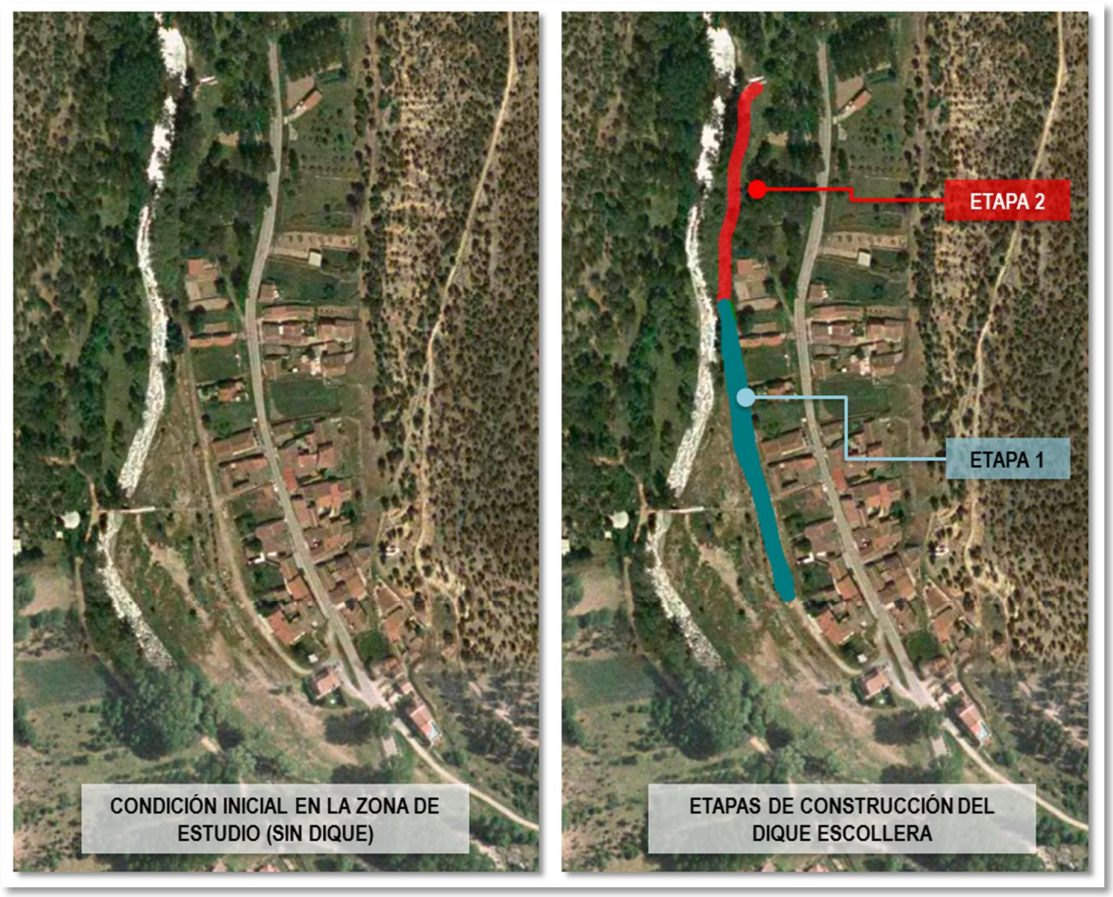



***Figura A2-4.*** *Condiciones de modificación del modelo digital de elevación del terreno, incorporando las obras de mitigación.*

El resultado de la modificación del modelo digital de elevaciones para obtener los tres escenarios de simulación se expone en la figura A2-5:

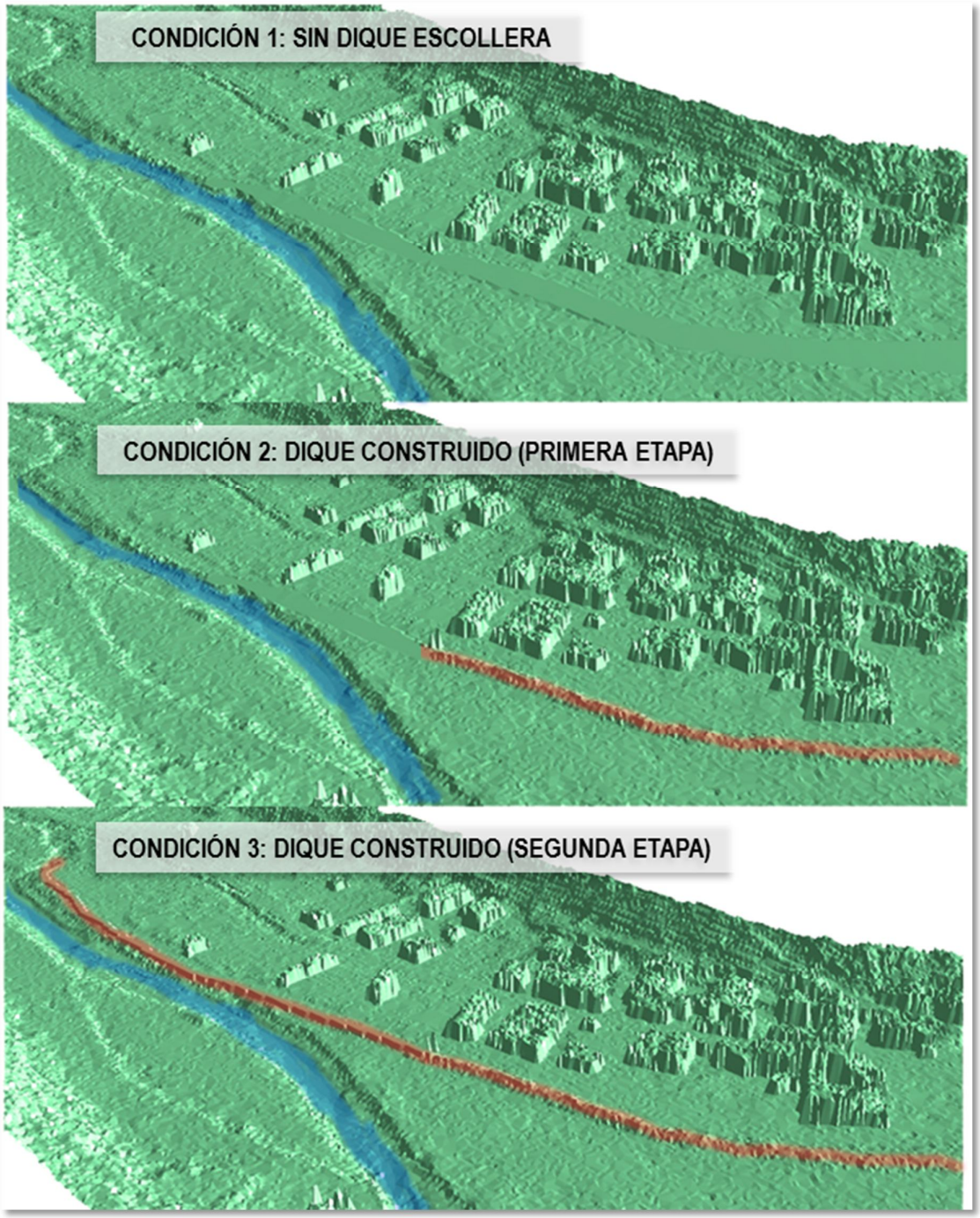



***Figura A2-5.*** *Condiciones de modificación del modelo digital de elevación del terreno, incorporando las obras de mitigación.*

## 2. INCORPORACION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN AL ENTORNO IBER

Cada una de las versiones del modelo digital de elevación que será utilizado en las simulaciones hidrodinámicas, se incorpora a Iber de la siguiente manera:

a) Haciendo uso del software ArcGIS v9.3, se transforma el MDT de formato Ráster a formato ASCII (.asc) usando la opción *Conversion Tools/ From Raster/ Raster to ASCII* contenida en ArcToolbox (figura A2-6).

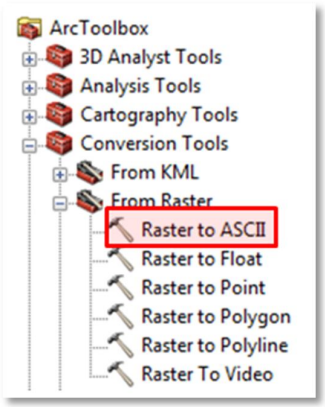



***Figura A2-6.*** *Herramienta de conversión de formato ráster a ASCII*

b) En el entorno de Iber, a partir del MDT se crea una Red Irregular de Triángulos Rectángulos (Right-Triangulated Irregular Network (RTIN) a través del *Menú Herramientas Iber/ Crear RTIN*, donde se definen los parámetros de la RTIN que se creará (Tolerancia: 0.1 m, Lado Máximo: 1.0 m, Lado Mínimo: 0.5 m tal y como se muestra en la Figura A2-7:

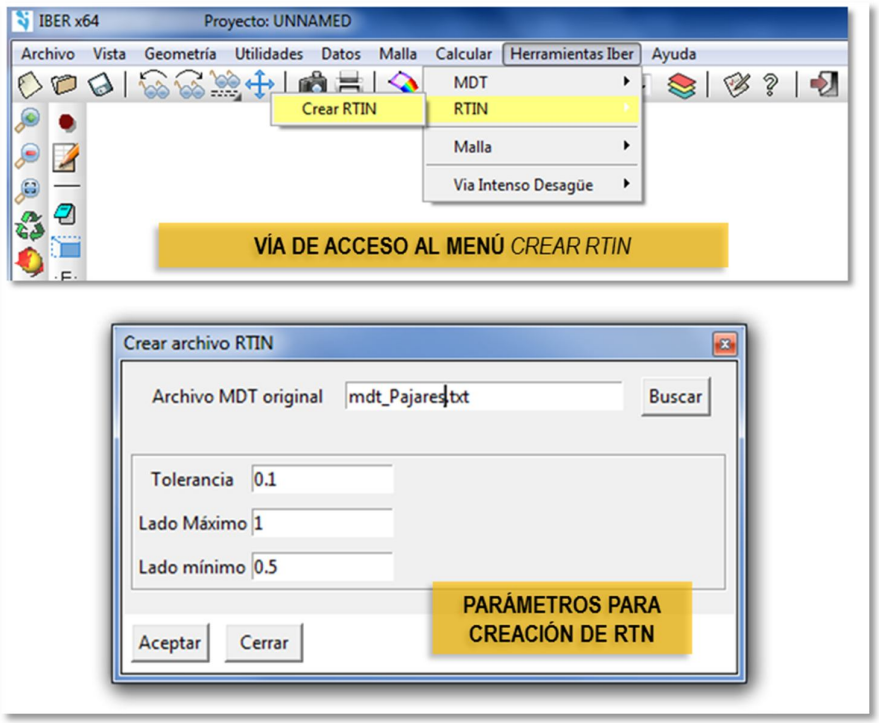



***Figura A2-7.*** *Creación de RTIN en el entorno Iber*

Al finalizar este proceso, Iber solicita aprobación para "colapsar" la geometría, que consiste en eliminar elementos lineales comunes entre los triángulos que conforman la RTIN para volverla menos densa, se recomienda ejecutar este paso.

Posteriormente al colapsó de la RTIN, Iber solicita aprobación para mallar la geometría, este paso se realizará luego de asignar las características hidrodinámicas del modelo, por lo que se recomienda no ejecutar dicho paso. La RTIN creada se mostrará en el entorno de Iber (Figura A2-8).

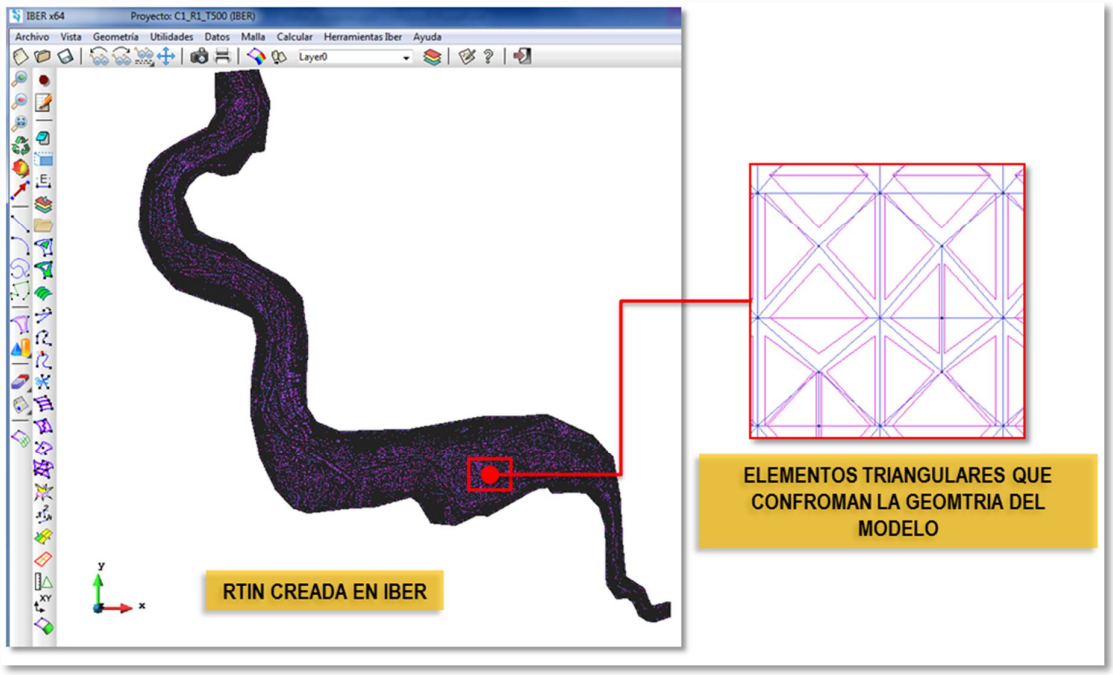



***Figura A2-8.*** *RTIN creada en el entorno Iber*

## 2.1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL MODELO

Sobre la RTIN creada se definirán los siguientes parámetros hidráulicos del modelo: Condiciones de contorno, Condiciones Iniciales y Estructuras.

a) Condiciones de contorno: Las condiciones de contorno que se definen en Iber serán la Entrada y Salida 2D del modelo. Estas condiciones se asignan en el menú *Datos/ Hidrodinámica/ Condiciones de contorno*, en la ventana emergente se seleccionan las características que se muestran en las figura A2-9, variando el caudal para cada período de retorno modelado.

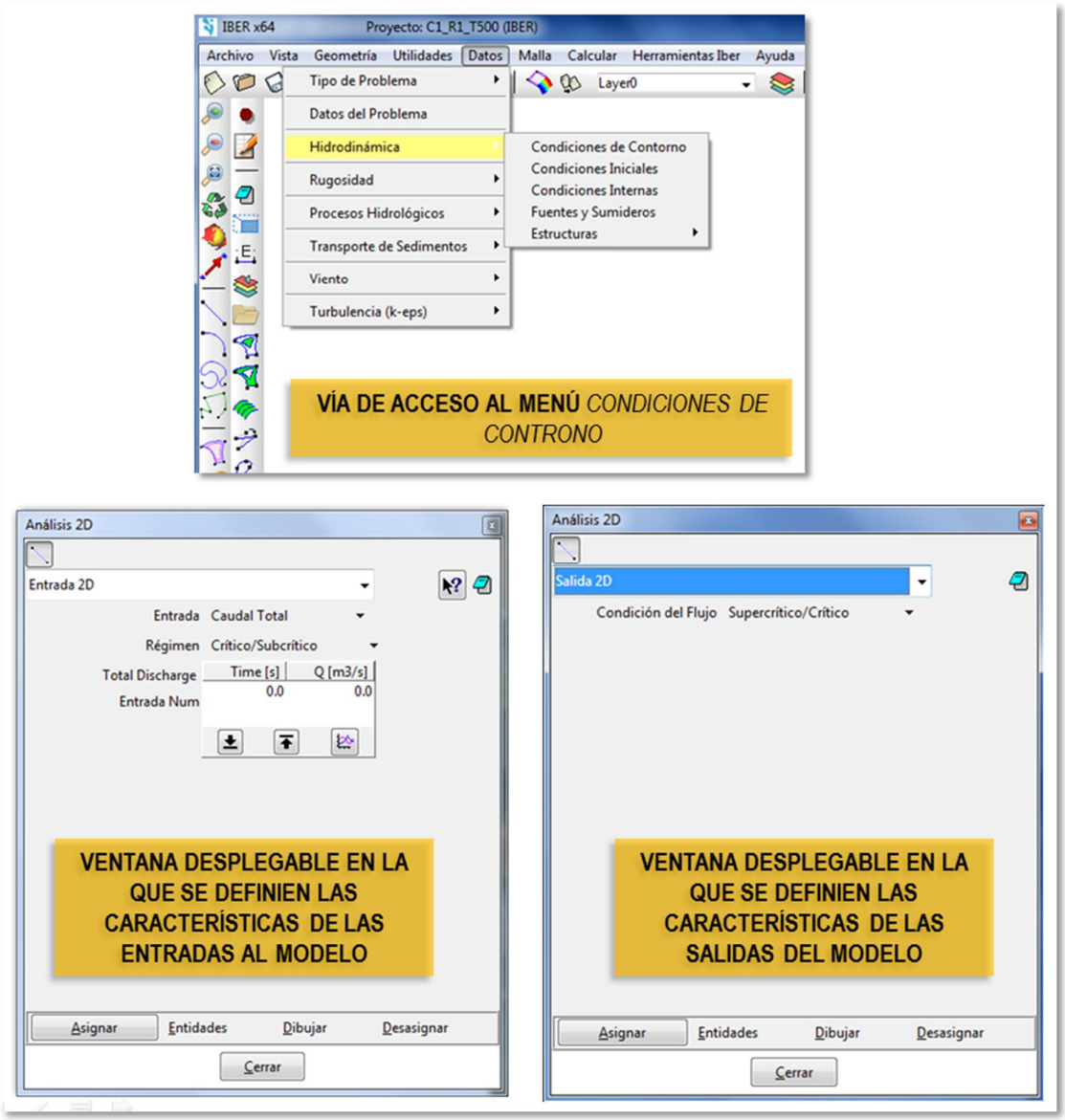



***Figura A2-9.*** *Características de la Entrada y Salida 2D del modelo.*

Una vez definidas las características, se procede a asignar cada condición de contorno a los elementos de la RTIN correspondientes, tal y como se muestra en la figura A2-10.

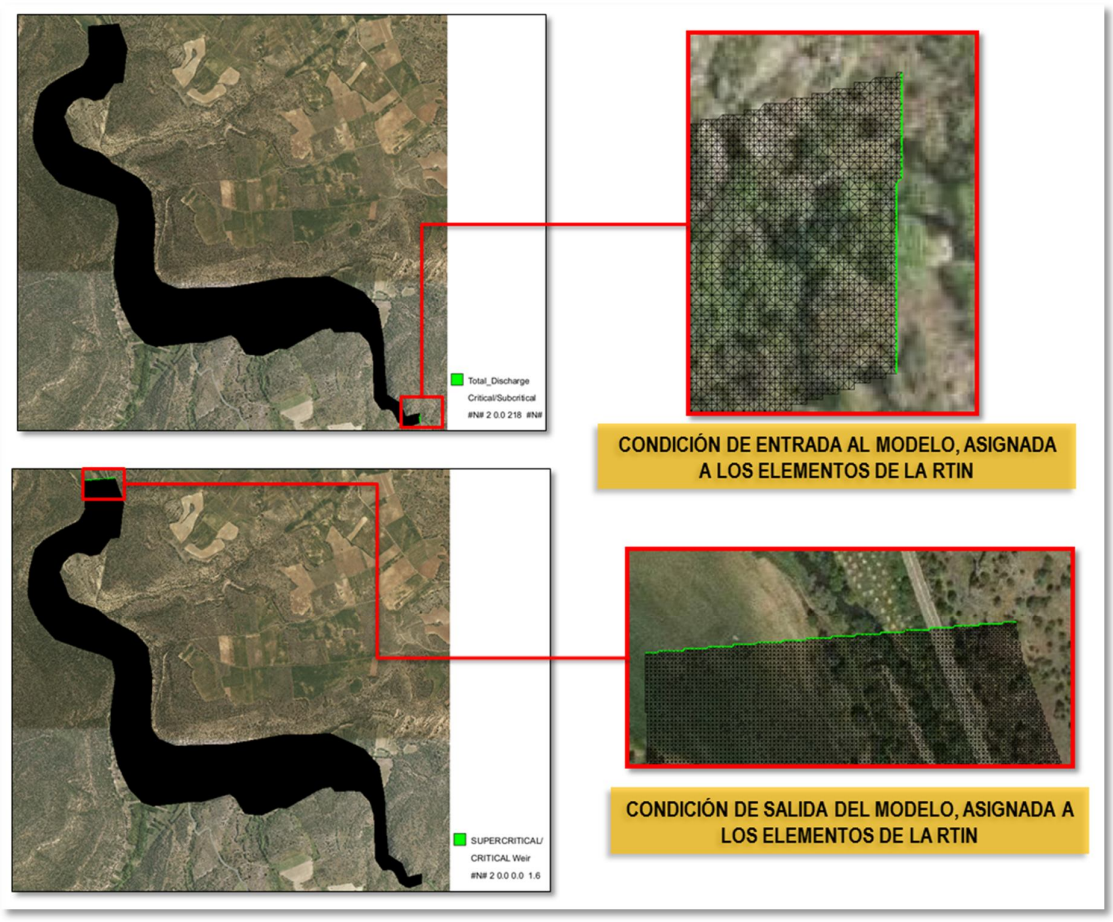



***Figura A2-10.*** *Condiciones de contorno asignadas a la RTIN del modelo.*

b) Condiciones iniciales: Para todos los modelos se definió una condición de calado inicial de 0.0m, ya que se tiene como dato de entrada un Caudal Total constante, y se establecerá un tiempo de simulación lo suficientemente prolongado para garantizar la estabilidad del modelo. La asignación de las condiciones iniciales se realiza mediante el menú *Datos/ Hidrodinámica/ Condiciones Iniciales* definiendo en la ventana emergente los parámetros que se muestran en la figura A2-11 y asignándolo a la totalidad de la RTIN.

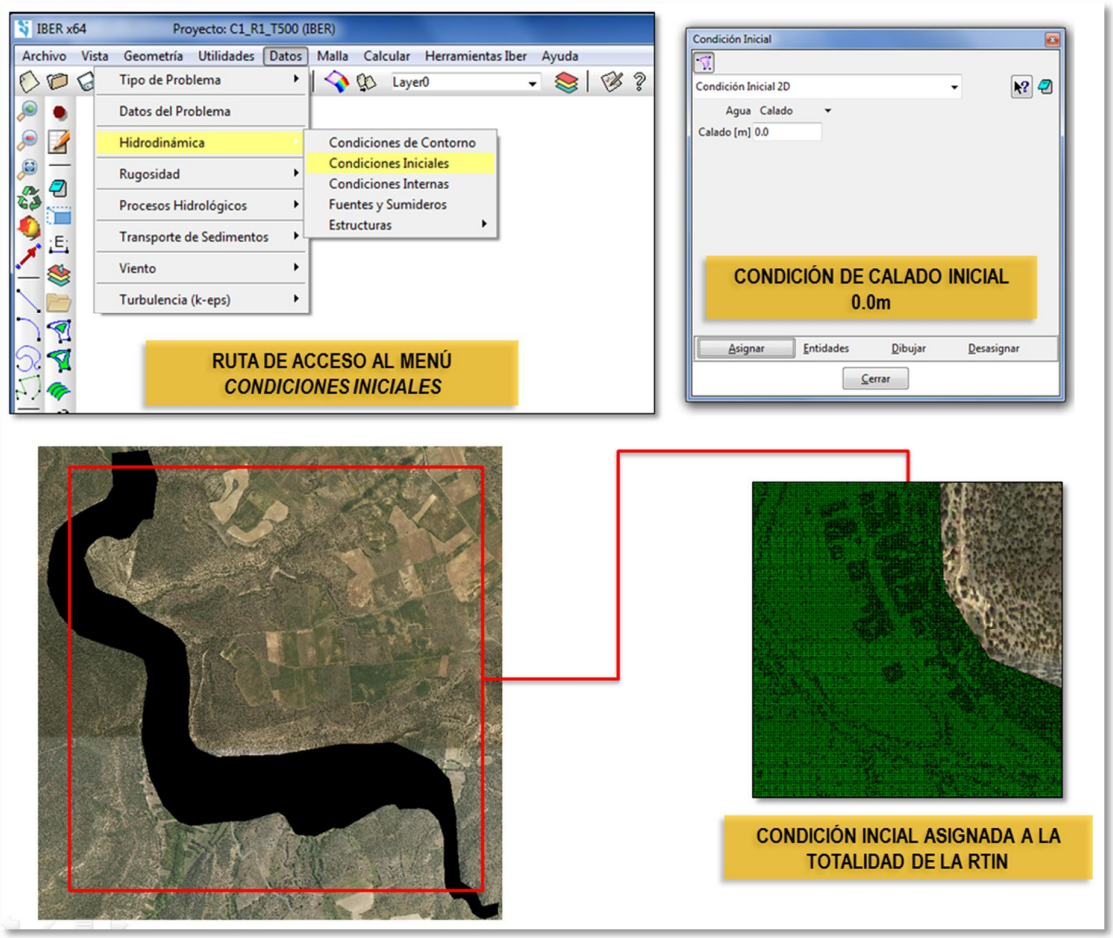



***Figura A2-11.*** *Condición inicial asignada a la RTIN del modelo.*

c) Estructuras: En la zona de estudio, se tienen dos puentes que cruzan el río Cega, uno de ellos es un puente vehicular que se encuentra sobre la vía principal de la zona, y el segundo se ubica 200m aguas abajo del primero con capacidad estructural solo para tránsito peatonal. Las dimensiones utilizadas para la incorporación de los mismos en el modelo hidráulico, se muestran en las figuras A2-12 y A2-13.

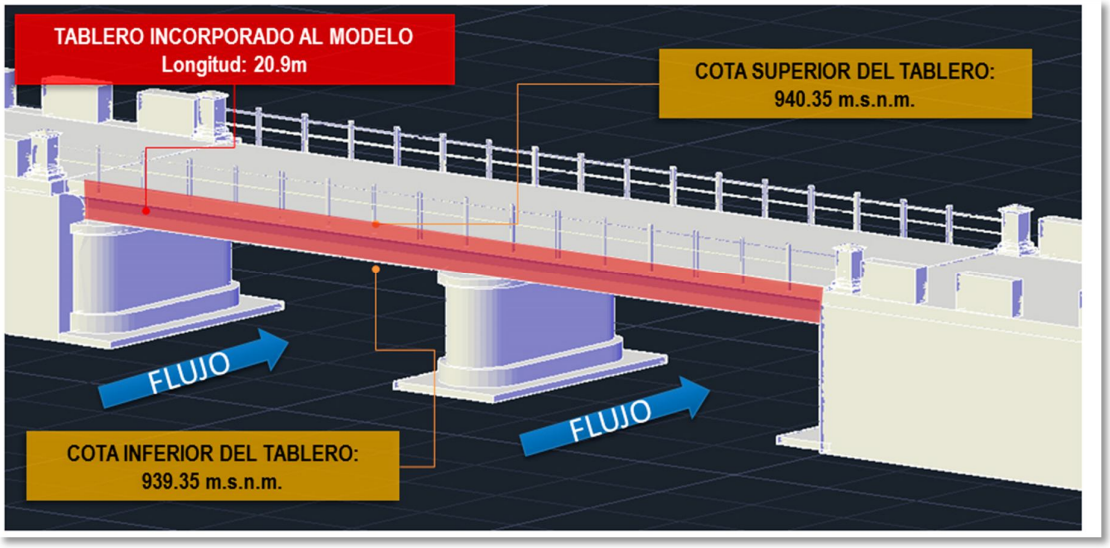



***Figura A2-12.*** *Características espaciales del puente vehicular.*

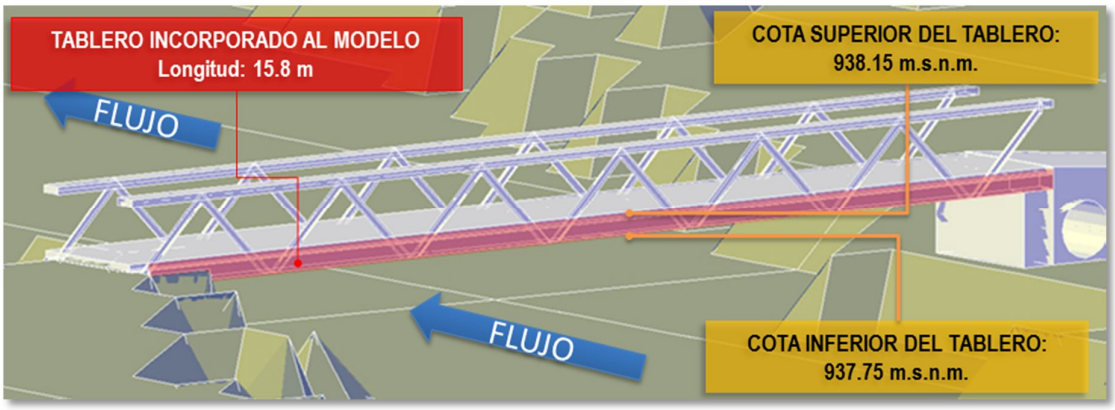



***Figura A2-13.*** *Características espaciales del puente peatonal.*

Para asignar las características de los puentes en Iber, se procede al Menú *Datos/ Hidrodinámica/ Estructuras/ Puentes*. En el cuadro emergente se definen las variables de los elementos estructurales, tal y como se muestra en la figura A2-14.

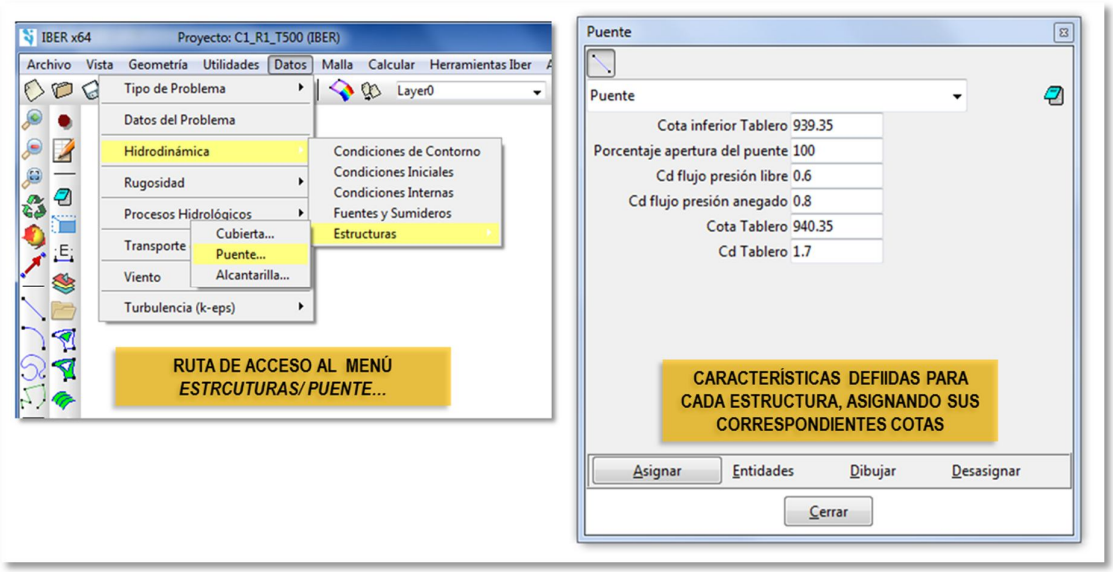



***Figura A2-14.*** *Cuadro de diálogo emergente en el que se introducen las características espaciales de los puentes.*

Posteriormente, las características definidas de cada puente se asignan a los elementos correspondientes del RTIN, tal y como se muestra en la figuras 15.

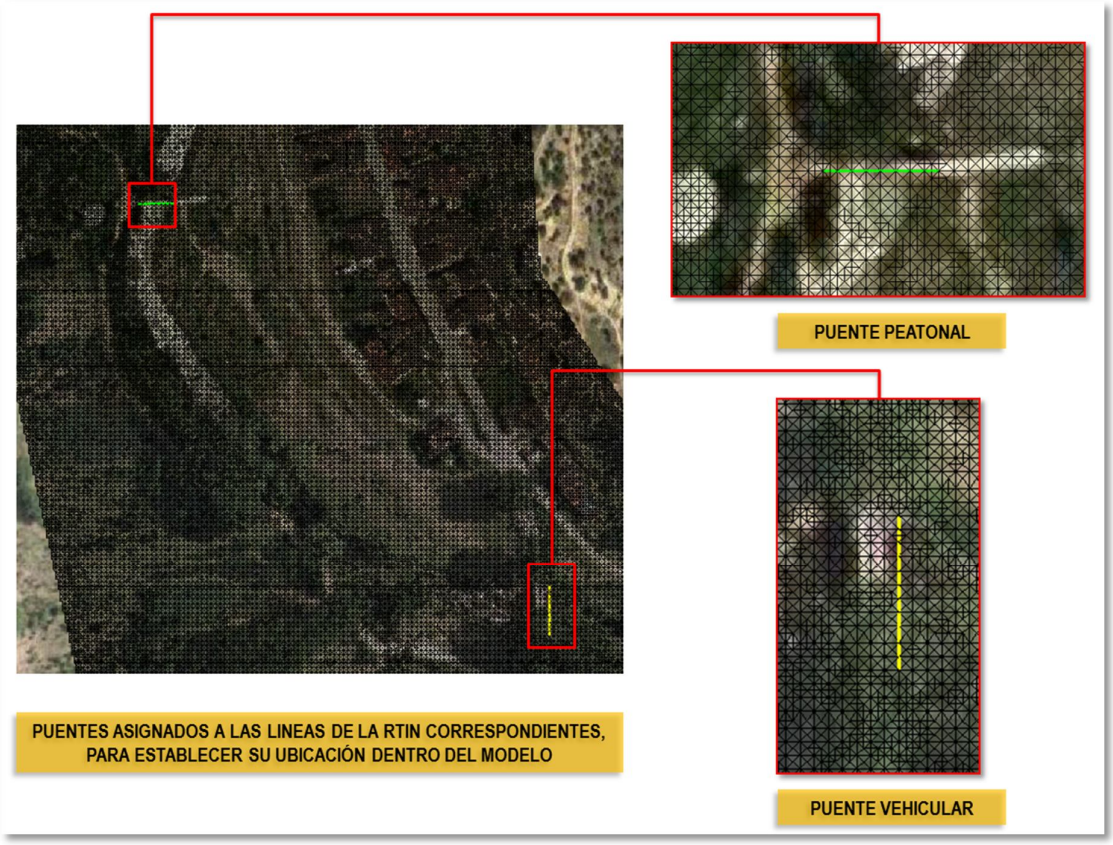



***Figura A2-15.*** *Asignación de puentes en la RTIN del modelo hidráulico.*

## 2.2. ASIGNACIÓN DEL PARÁMETRO RUGOSIDAD AL MODELO HIDRO DINÁMICO

Para la asignación automática del parámetro rugosidad en Iber, se lleva a cabo un procedimiento que requiere de un grupo de archivos y un formato de registro de las categorías y coeficientes de rugosidad, según el esquema de la figura 16:

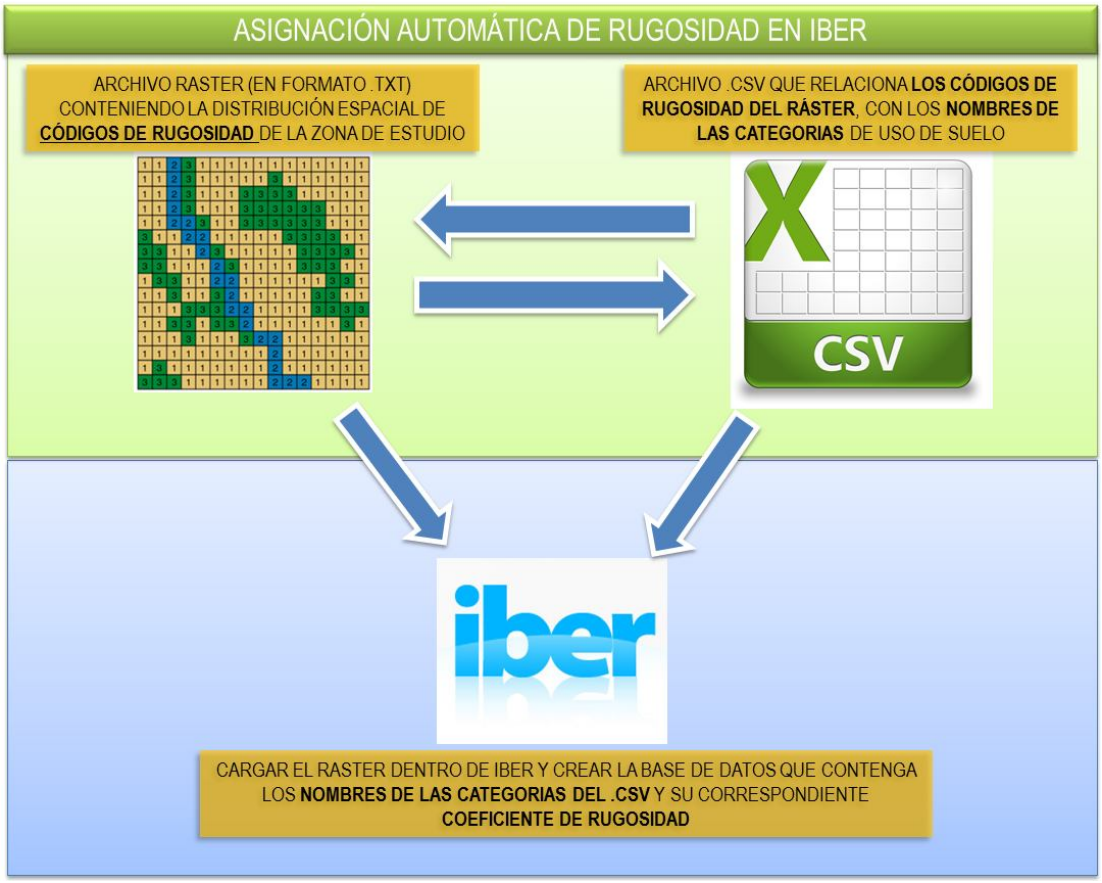



***Figura A2-16.*** *Esquema del procedimiento para asignación automática de rugosidad.*

En la tabla A2-1 se muestra la codificación, categoría y coeficiente de rugosidad de Manning que se utilizan en la creación de los escenarios de modelación, este mapa de distribución de rugosidades es un producto de los estudios desarrollados en el marco del proyecto MAS Dendro-Avenidas (2012, 2013). La asignación de la rugosidad del suelo (parámetro n de Manning) se ha llevado a cabo en dos fases: en primer lugar a partir de foto-interpretación sobre la orto-imágen del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), que para la zona de estudio corresponde con el año 2005, delimitándose las principales agrupaciones del terreno en función de su cobertura vegetal y relacionándolos con las clasificaciones generales que sobre este parámetro se han

propuesto (Arcement and Schneider, 1989; Brunner, 2010). Posteriormente, la delimitación obtenida en la primera fase ha sido cotejada mediante trabajo de campo en la zona de estudio, definiéndose así finalmente los distintos valores del parámetro n de Manning utilizados en la modelización hidráulica 2D que se llevó a cabo. Cabe destacar que para el estudio de sensibilidad del modelo, se utilizan distribuciones espaciales del parámetro rugosidad, incrementando y disminuyendo en 25% la rugosidad inicial.

***Tabla A2-1**. Valores de rugosidad asignados a la zona de estudio*

| Código | Categoría | Coeficiente de rugosidad | Coeficiente de rugosidad incrementado 25% | Coeficiente de rugosidad disminuido 25% |
|---|---|---|---|---|
| **1** | **Carretera** | 0.013 | 0.01625 | 0.00975 |
| **2** | **Cauce múltiple** | 0.045 | 0.05625 | 0.03375 |
| **3** | **Cauce simple** | 0.04 | 0.05 | 0.03 |
| **4** | **Construcciones** | 0.3 | 0.375 | 0.225 |
| **5** | **Cultivos** | 0.03 | 0.0375 | 0.0225 |
| **6** | **Plantación arbórea lineal** | 0.04 | 0.05 | 0.03 |
| **7** | **Puente** | 0.12 | 0.15 | 0.09 |
| **8** | **Vegetación arbustiva densidad alta** | 0.07 | 0.0875 | 0.0525 |
| **9** | **Vegetación arbustiva densidad baja** | 0.04 | 0.05 | 0.03 |
| **10** | **Vegetación arbustiva densidad media** | 0.05 | 0.0625 | 0.0375 |
| **11** | **Caminos y vegetación clara** | 0.02 | 0.025 | 0.015 |

En la figura A2-17 se expone el mapa con la distribución espacial de códigos de rugosidad que sirven como dato de entrada en el modelo Iber.

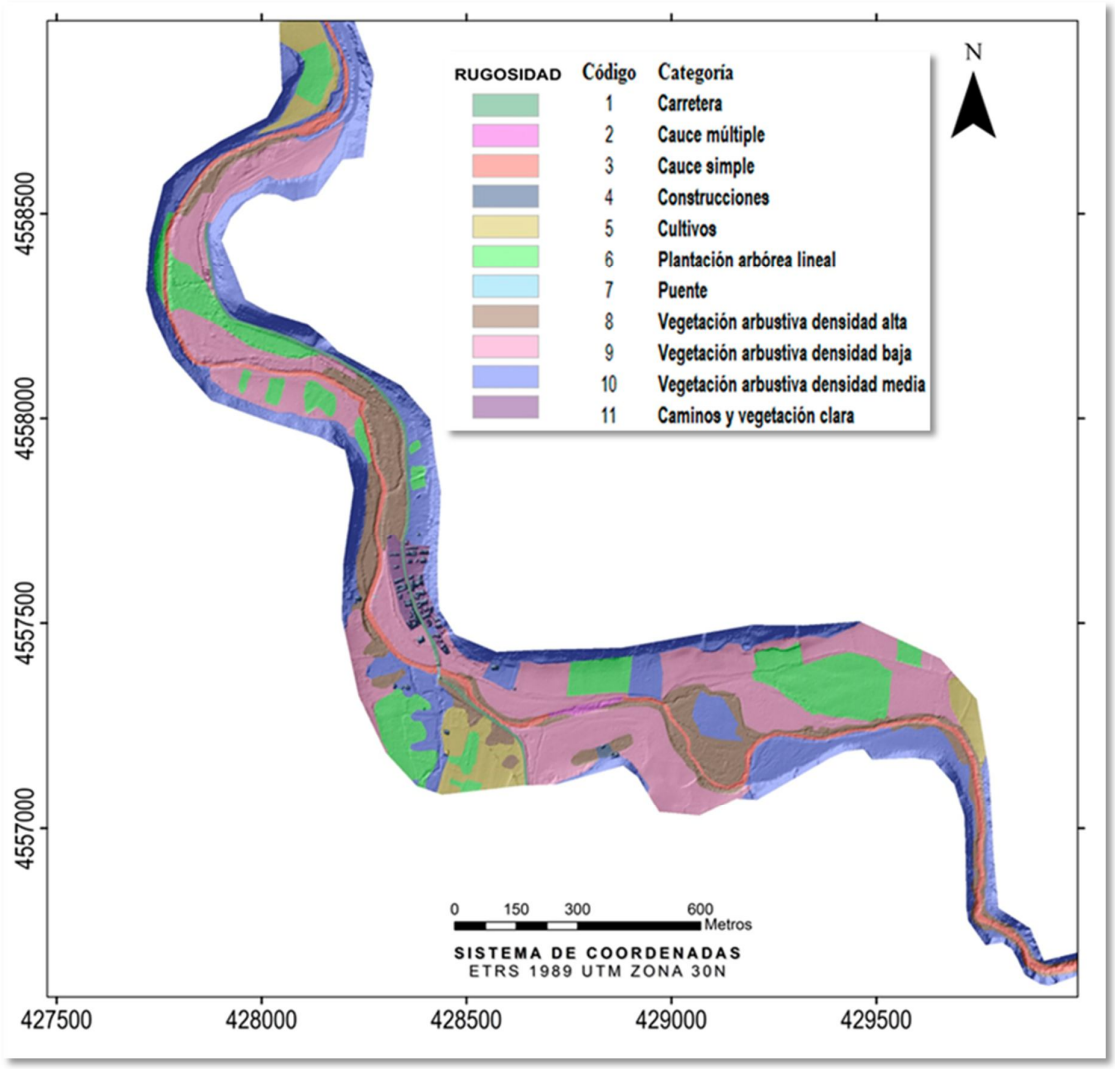



***Figura A2-17.*** *Mapa de códigos de rugosidad en la zona de estudio.*

El proceso para incorporar el mapa de coeficientes de rugosidad asignado a las diferentes zonas es el siguiente:

a) Dentro de Iber, se crea una malla a partir de la RTIN a la que se han asignado las características hidrodinámicas (Condiciones de contorno, condiciones iniciales, estructuras). Para crear la malla, se procede al Menú *Herramientas Iber/ Malla/ Un elemento por superficie*. Una vez finalizado el proceso se obtienen la malla del modelo que se ejecutará (Figura A2-18).

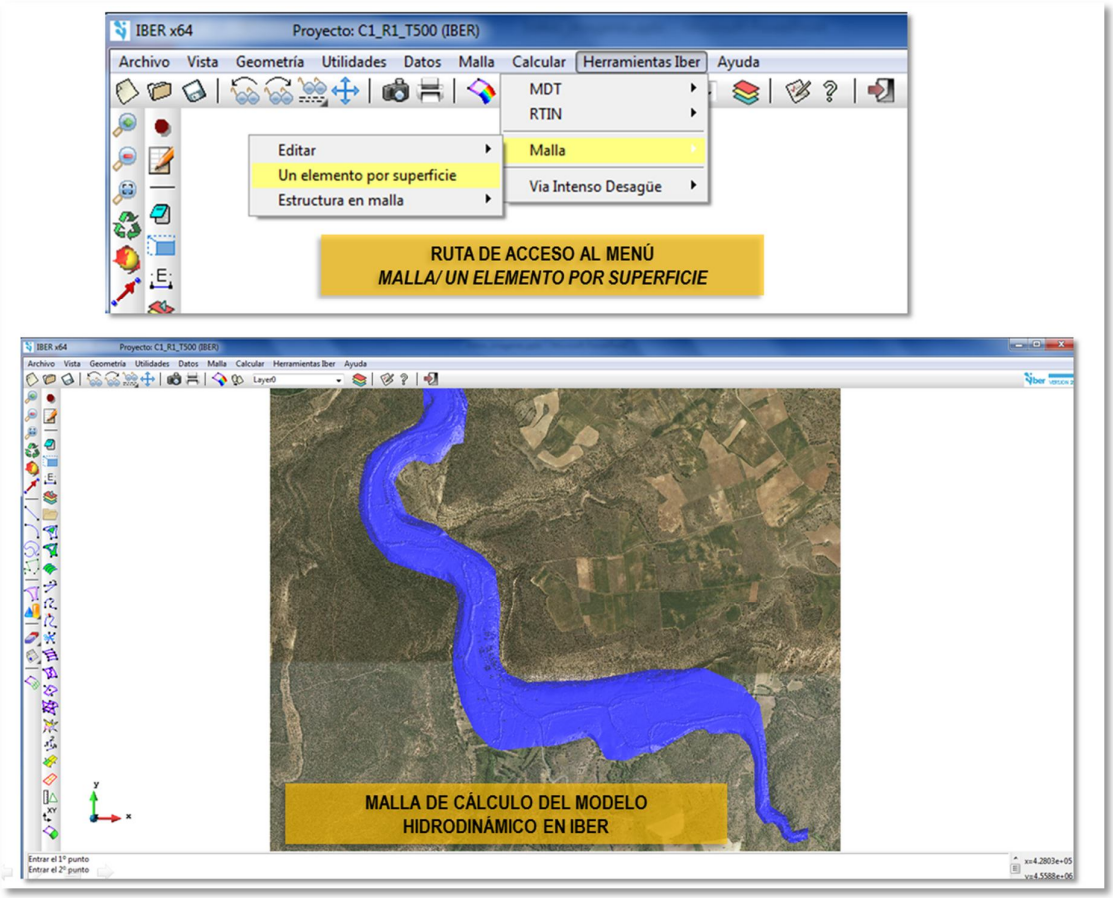



***Figura A2-18.*** *Malla generada a partir de la RTIN en el entorno Iber.*

b) Haciendo uso del software ArcGIS v9.3, se transforma el mapa de códigos de rugosidad de formato Raster a formato de archivo de texto ASCII (.txt) usando la opción *Conversion Tools/ From Raster/ Raster to ASCII* contenida en ArcToolbox. (El mapa de códigos de rugosidad usa los códigos que se muestran en la primera columna de la tabla 1, el archivo se guarda con el nombre **n_manning.txt**).

c) Se crea un fichero del tipo *Valores separados por comas* (Comma separated values .CSV) en el que se coloca el código de cada valor de rugosidad, seguido del nombre de la categoría de cada zona, tal y como se muestra en la figura A2-19. Este archivo se guarda con el nombre **n_manning.csv** dentro de la misma carpeta que contiene el archivo .txt creado en el literal anterior.

| | A | B |
|---|---|---|
| 1 | id;Class_Names | |
| 2 | 1;Carretera | |
| 3 | 2;Cauce_multiple | |
| 4 | 3;Cauce_simple | |
| 5 | 4;Construcciones | |
| 6 | 5;Cultivos | |
| 7 | 6;Plantacion_arborea_lineal | |
| 8 | 7;Puente | |
| 9 | 8;Vegetacion_arbustiva_densidad_alta | |
| 10 | 9;Vegetacion_arbustiva_densidad_baja | |
| 11 | 10;Vegetacion_arbustiva_densidad_media | |
| 12 | 11;Caminos_y_vegetacion_clara | |
| 13 | | |
| 14 | | |

***Figura A2-19.*** *Formato del fichero n_manning.CSV que contiene los códigos y categorías de rugosidad.*

.

d) En el entorno de Iber se crea la base de datos de rugosidad por categorías, ingresando al Menú *Datos/ Rugosidad/ Uso del Suelo*, que dará paso a una ventana emergente (Figura A2-20).

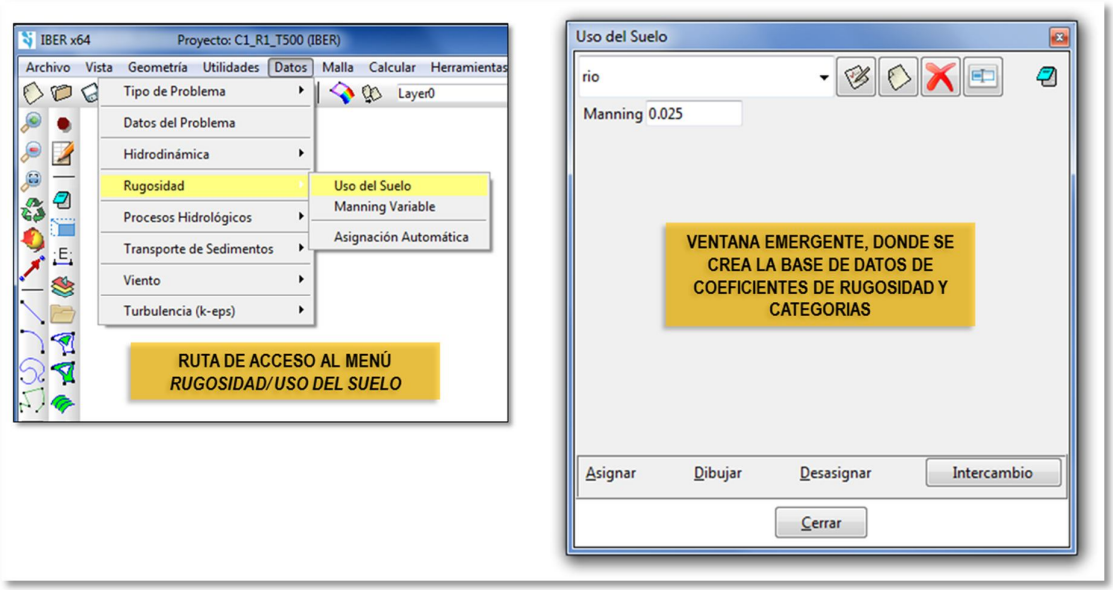



***Figura A2-20.*** *Ventana emergente para el ingreso de las categorías y coeficientes de rugosidad.*

Dentro de la ventana, se ingresa una nueva categoría haciendo clic en el botón y se asigna el coeficiente de rugosidad en el campo correspondiente, luego, para archivar el uso de suelo ingresado, se presiona el botón .

e) Luego se procede a la asignación automática de los valores de rugosidad, para ello, se ingresa al Menú *Datos/ Rugosidad/ Asignación Automática/ Archivo ASCII Grid* y se selecciona el archivo **n_manning.txt**, el resultado de este proceso se muestra en la figura A2-21.

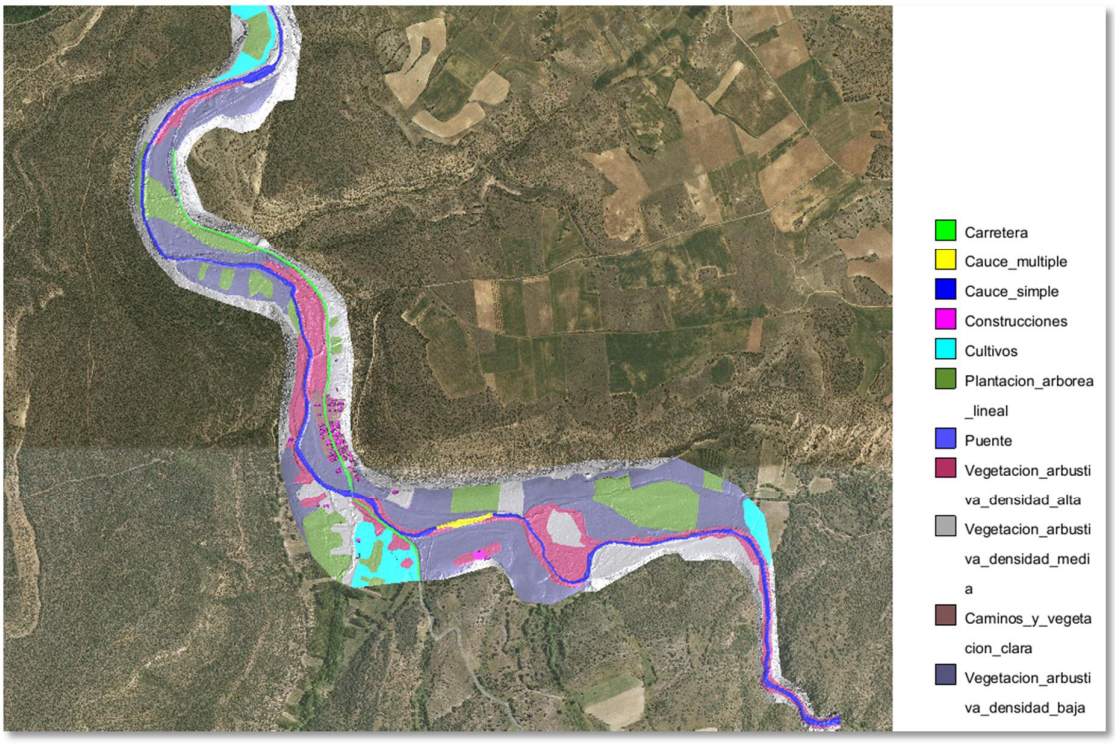



***Figura A2-21.*** *Asignación automática de los coeficientes de rugosidad, a la malla del modelo en Iber.*

## 2.3. ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS DE TIEMPO DE SIMULACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL.

Para el caso de estudio en Pajares de Pedraza, en la determinación de los parámetros de tiempo de simulación se toma en consideración que el modelo se ejecute por un tiempo lo suficientemente prolongado como para obtener estabilidad en los resultados, que se tengan intervalos de tiempo que ofrezcan información representativa y que la ejecución del mismo tenga un rendimiento aceptable, de tal manera que se establecen como parámetros de simulación los que se muestran en la tabla A2- 2.

***Tabla A2-2**. Parámetros de tiempo de simulación del modelo hidráulico de Pajares de Pedraza*

| Parámetro | Valor (segundos) |
|---|---|
| **Instante inicial** | **0** |
| **Tiempo máximo de simulación** | **5400** |
| **Intervalo de resultados** | **100** |

El ingreso de estos datos en Iber se realiza mediante el Menú *Datos/ Datos del Problema* (Figura A2-22).

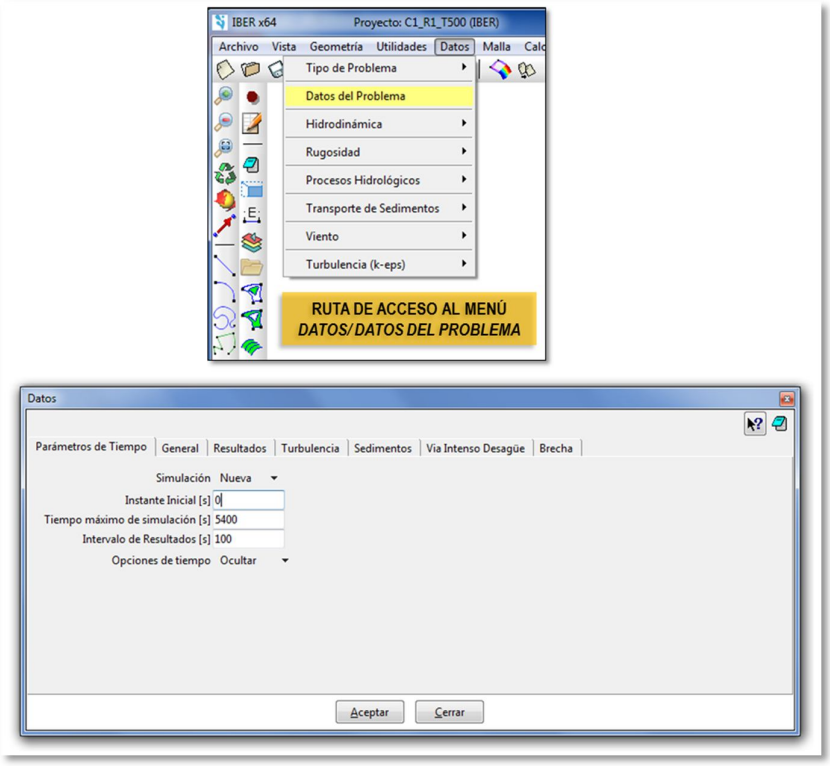
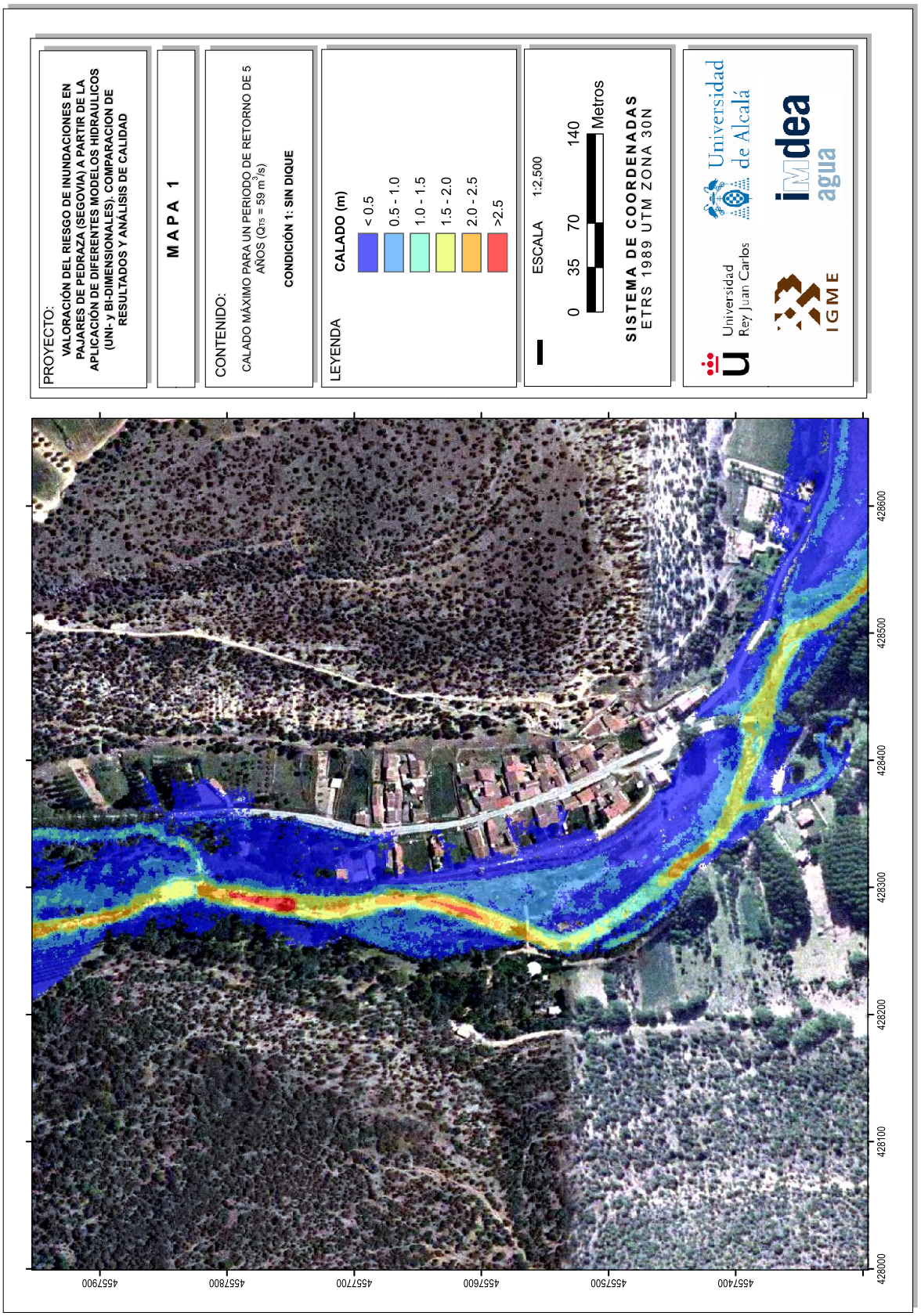
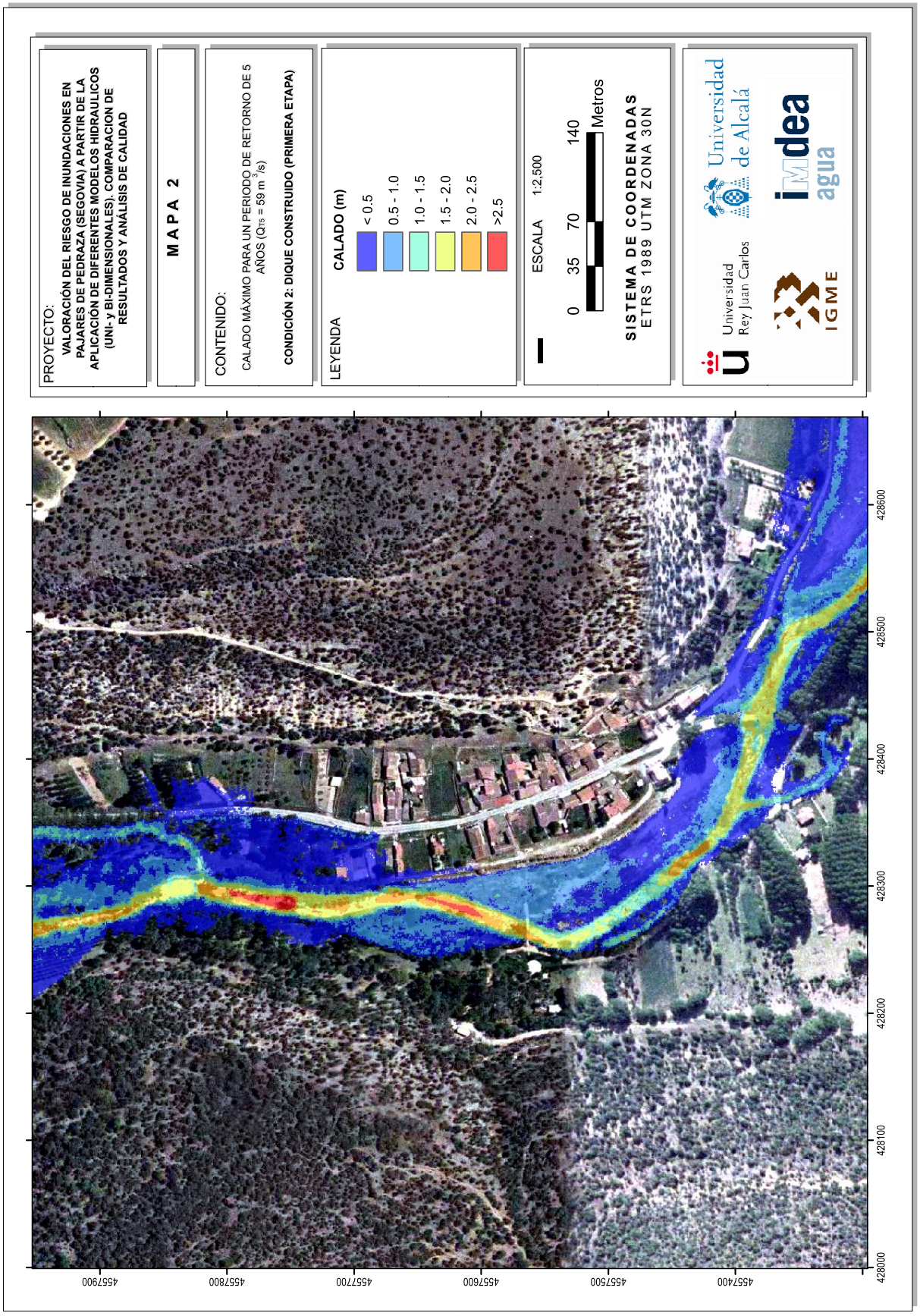


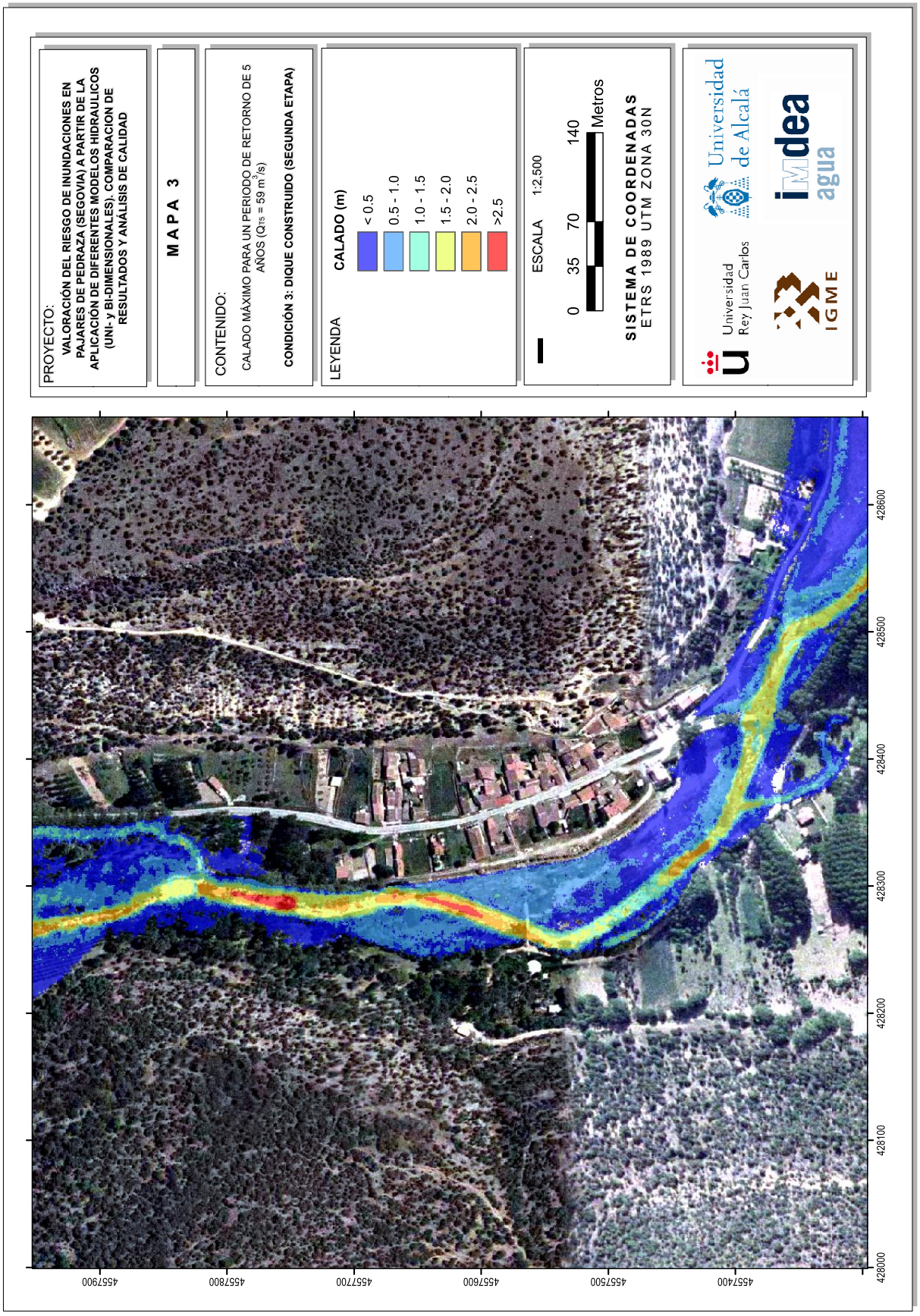

***Figura A2-22.** Asignación de parámetros de tiempo de simulación del modelo.*

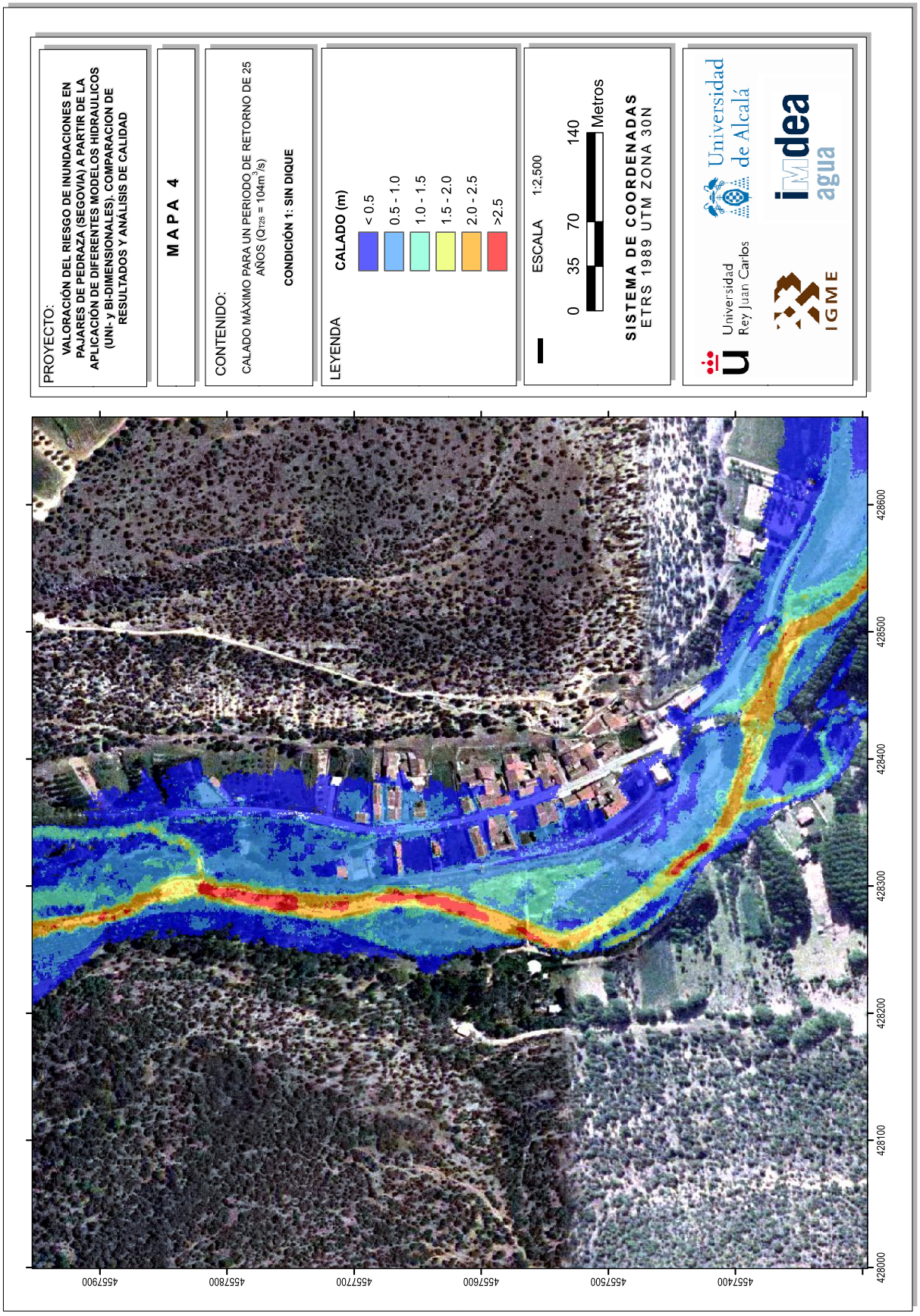
Una vez completado este paso, el modelo hidráulico bidimensional está listo para ejecutarse en Iber.

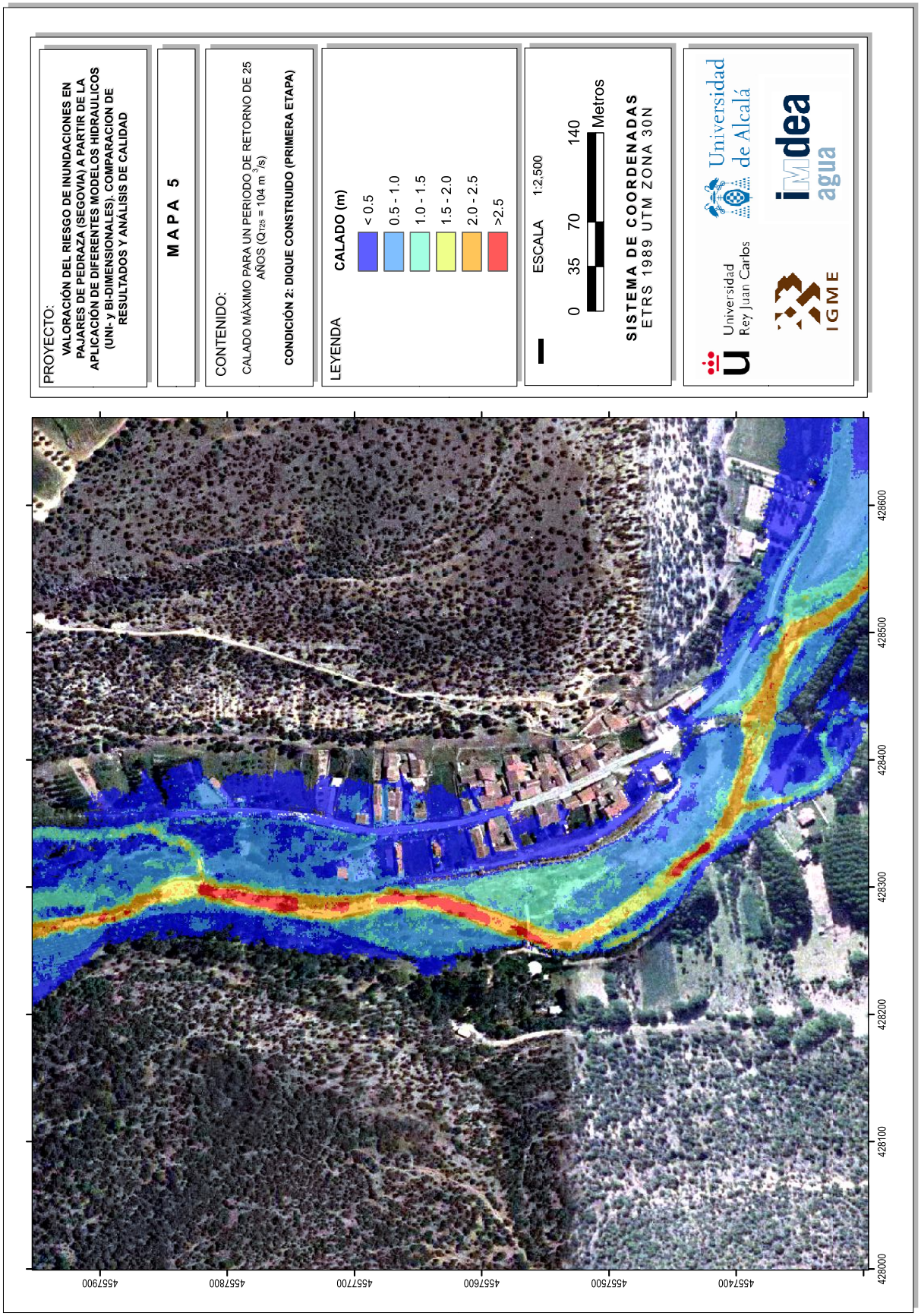
## 10.3. ANEXO 3. MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CALADO MÁXIMO, VELOCIDAD MÁXIMA Y PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA, CORRESPONDIENTE AL PELIGRO DE INUNDACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS

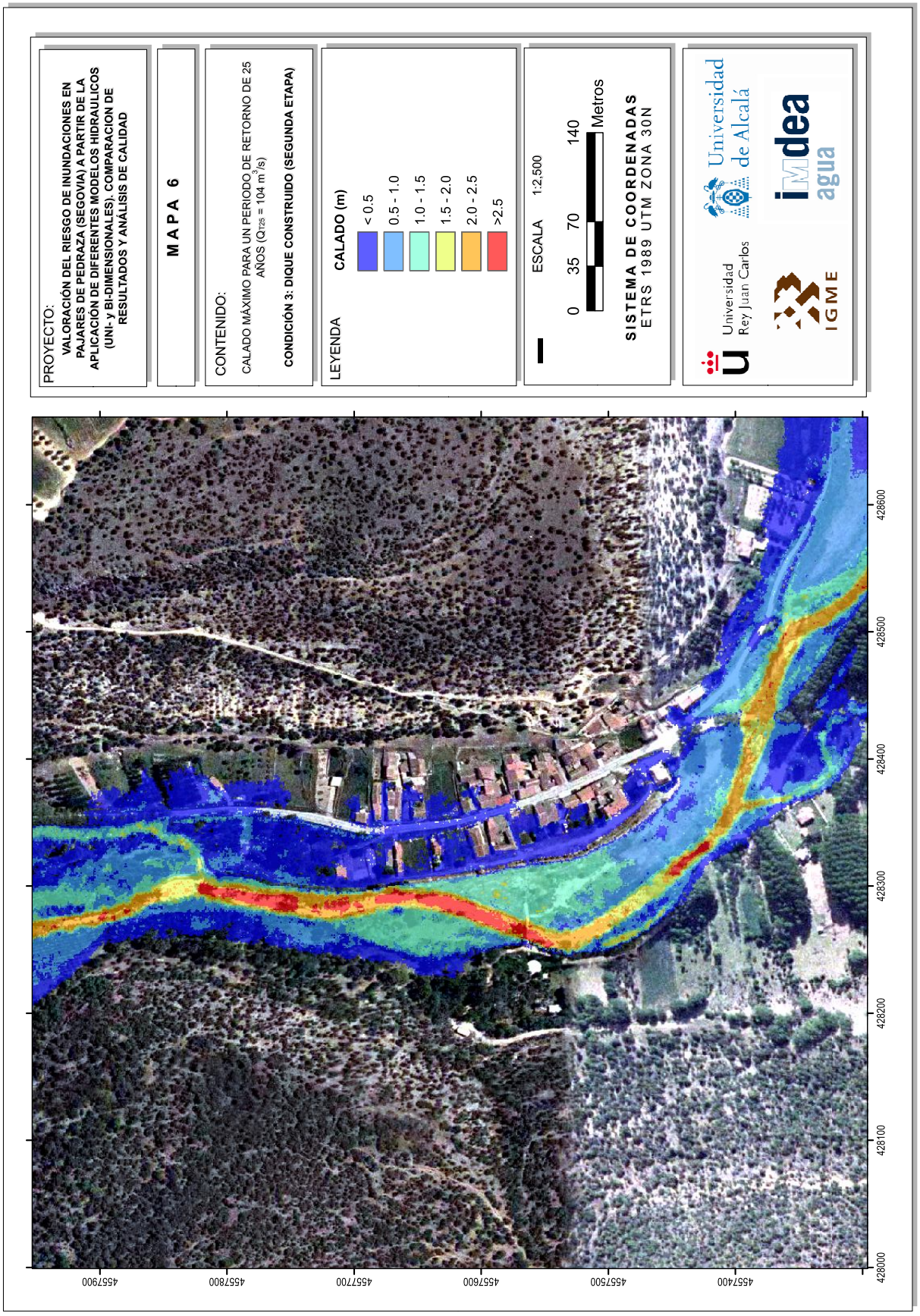


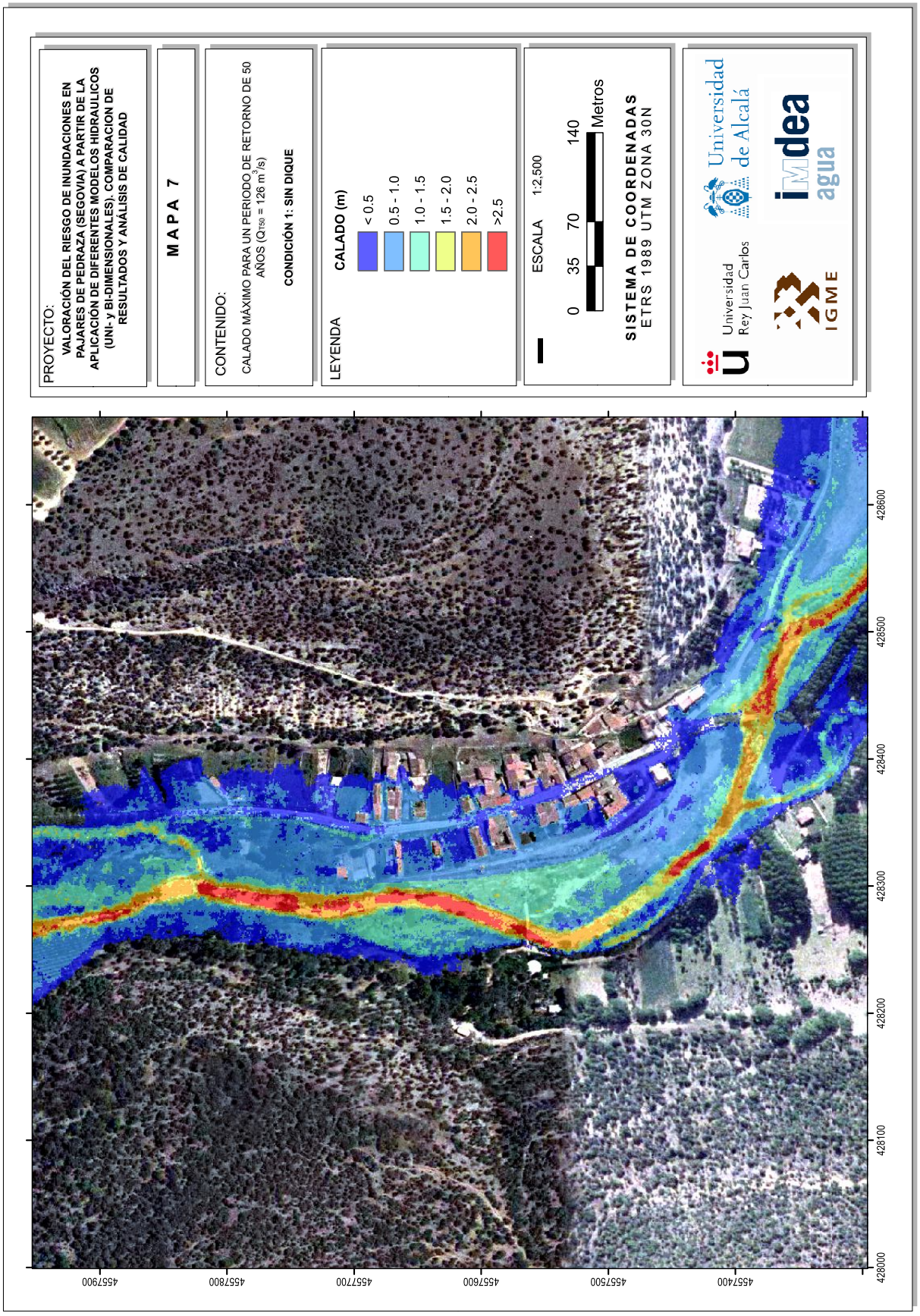

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 2
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q15 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

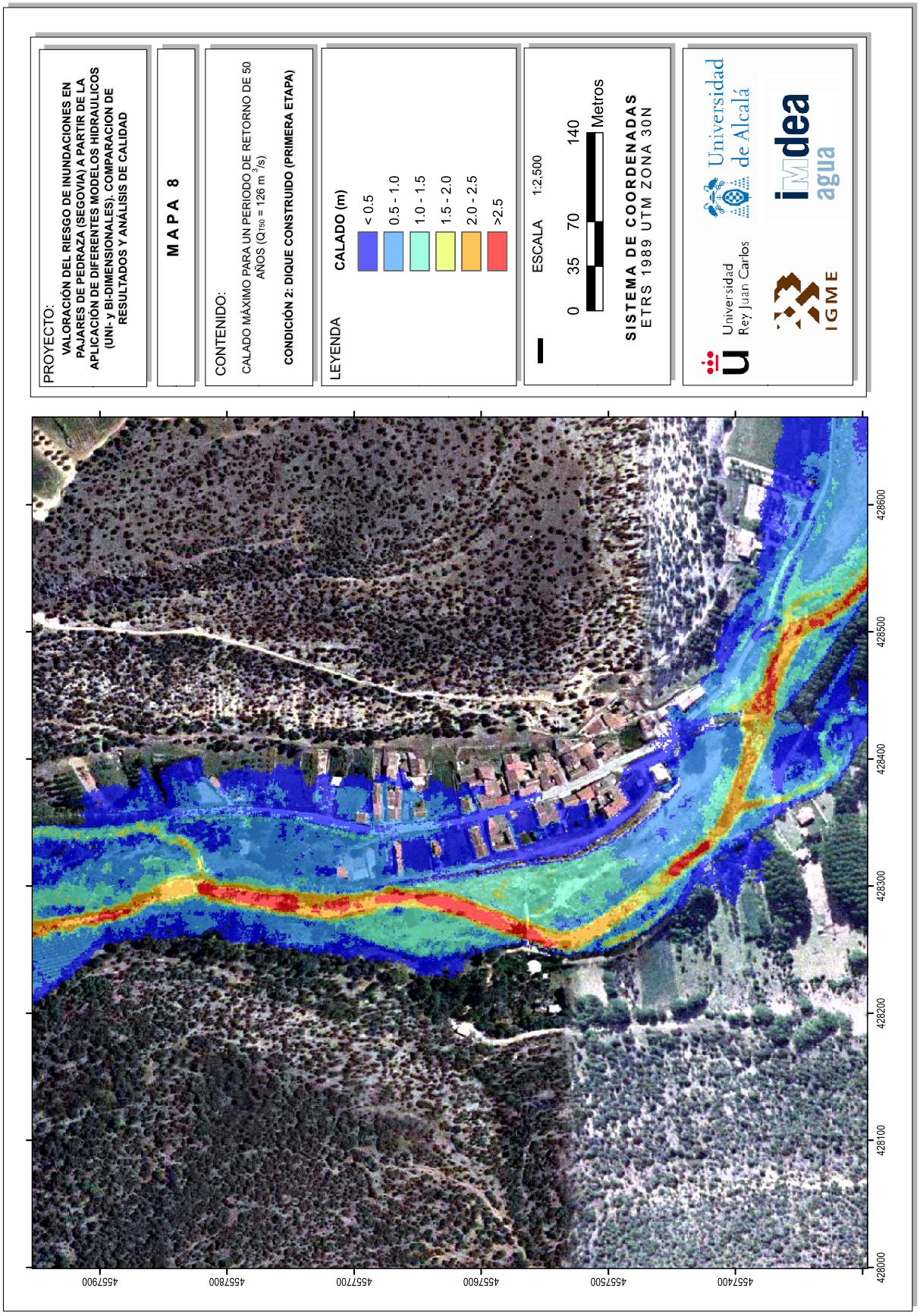

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 3
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q75 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

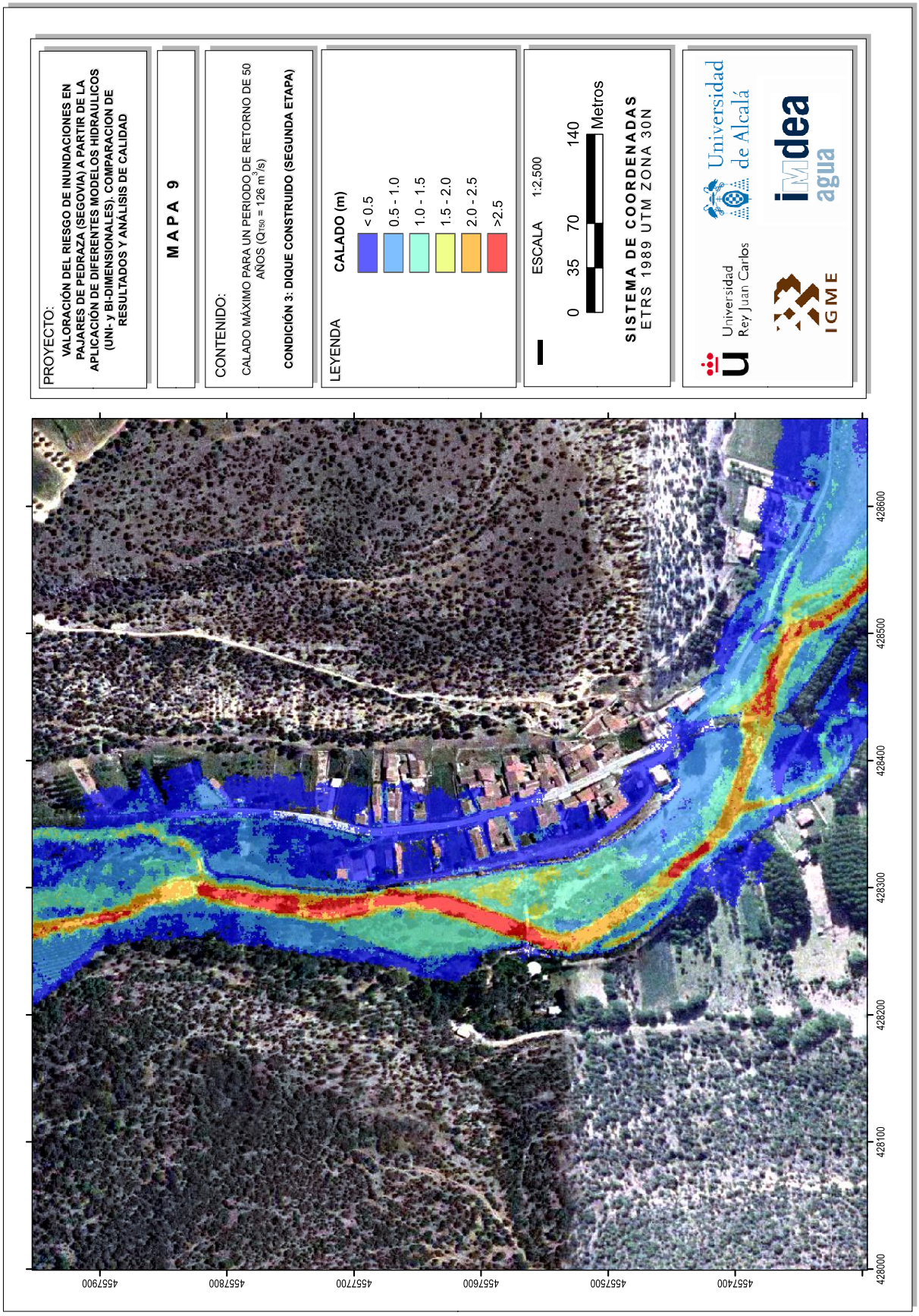

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 4
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Qt25 = 104m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

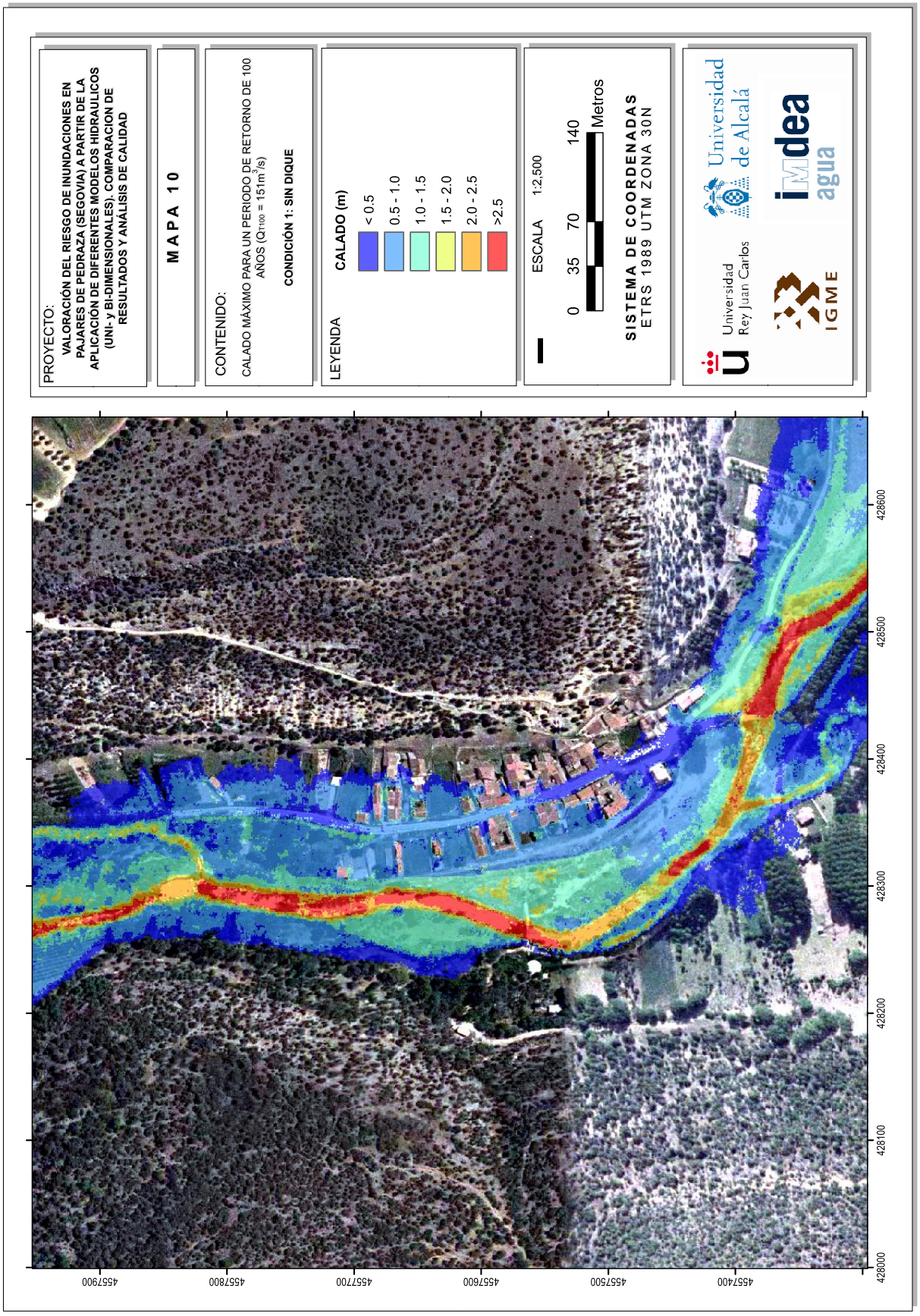

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 5
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

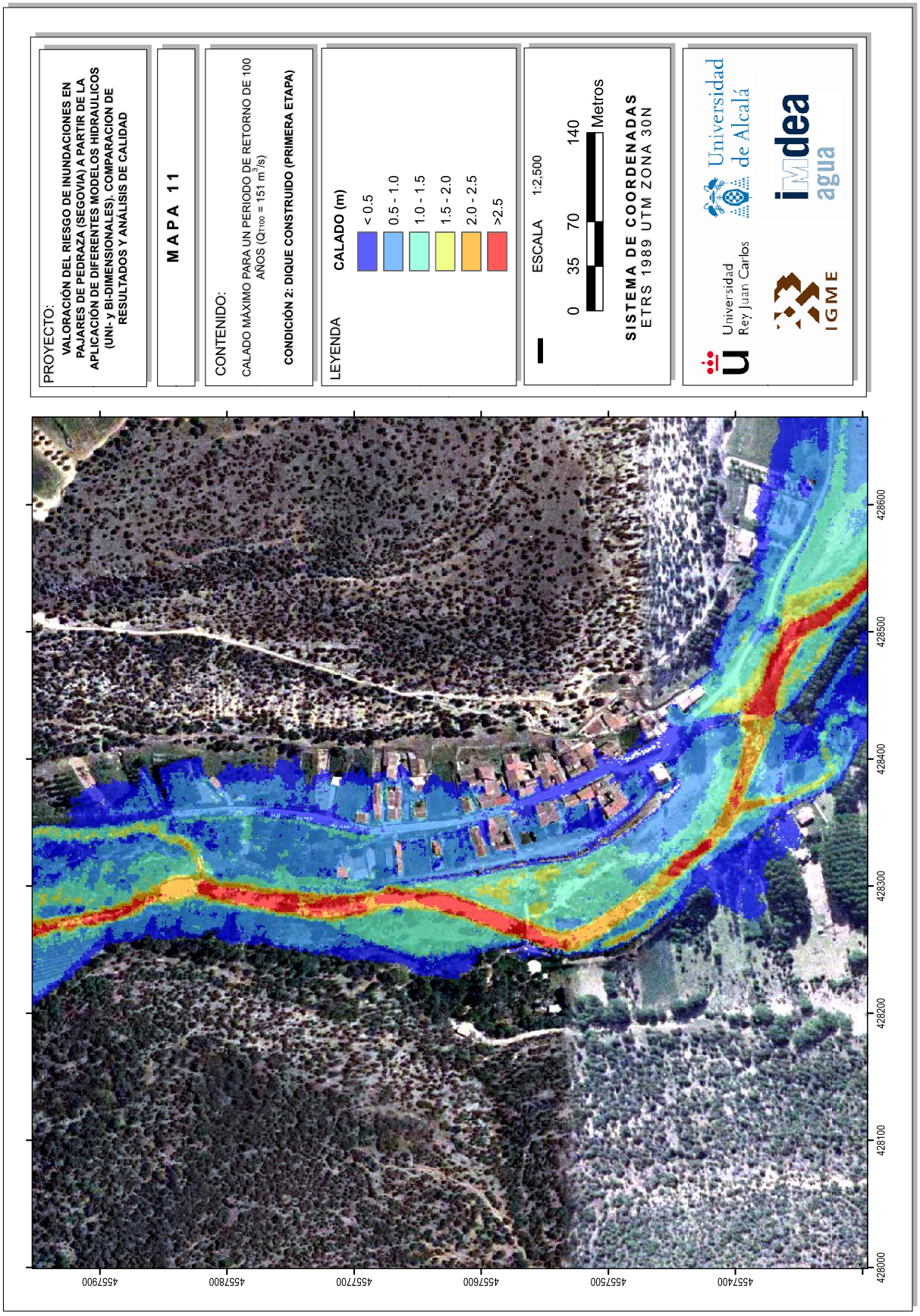

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 6
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Q25 = 104 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

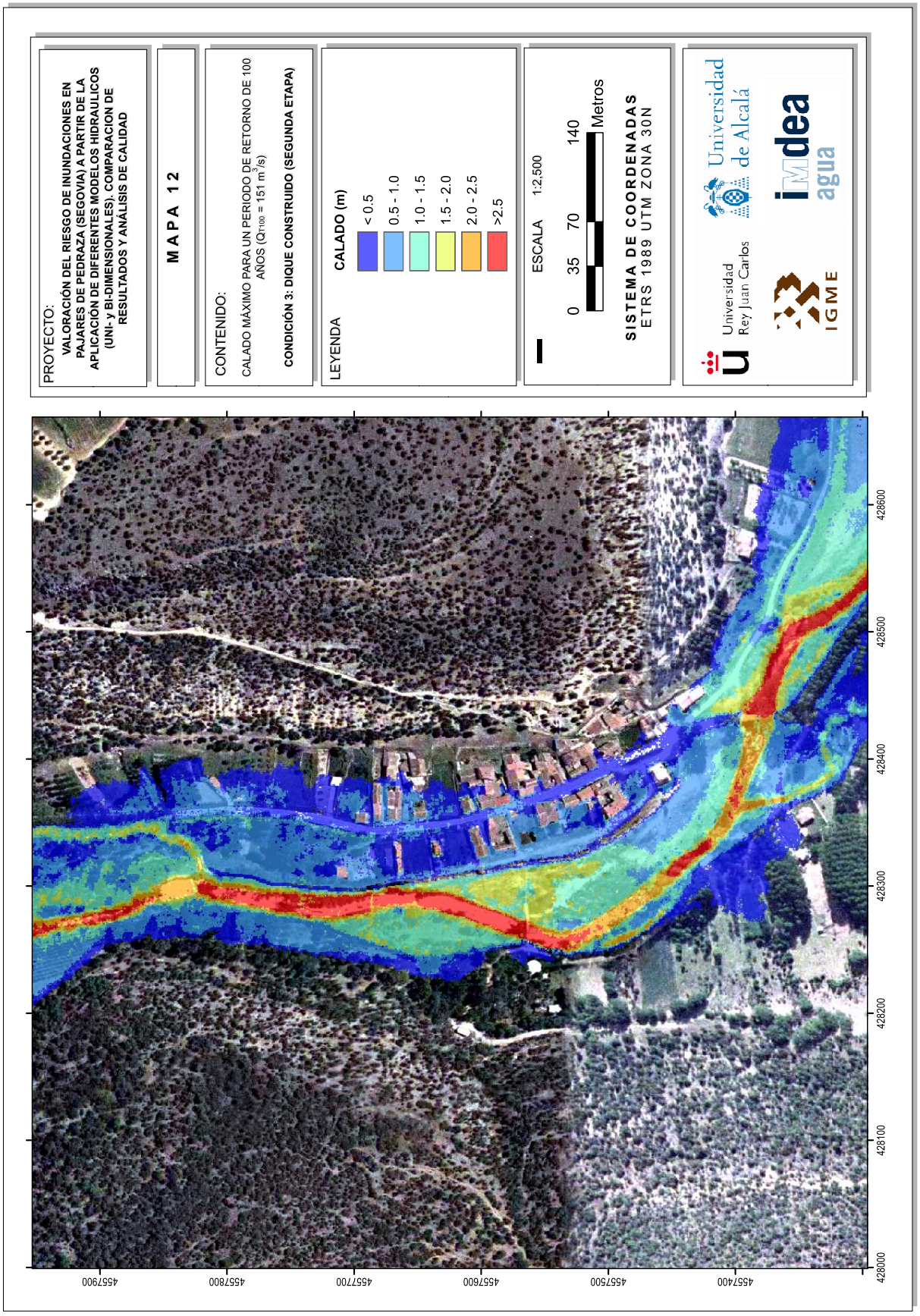

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 7
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

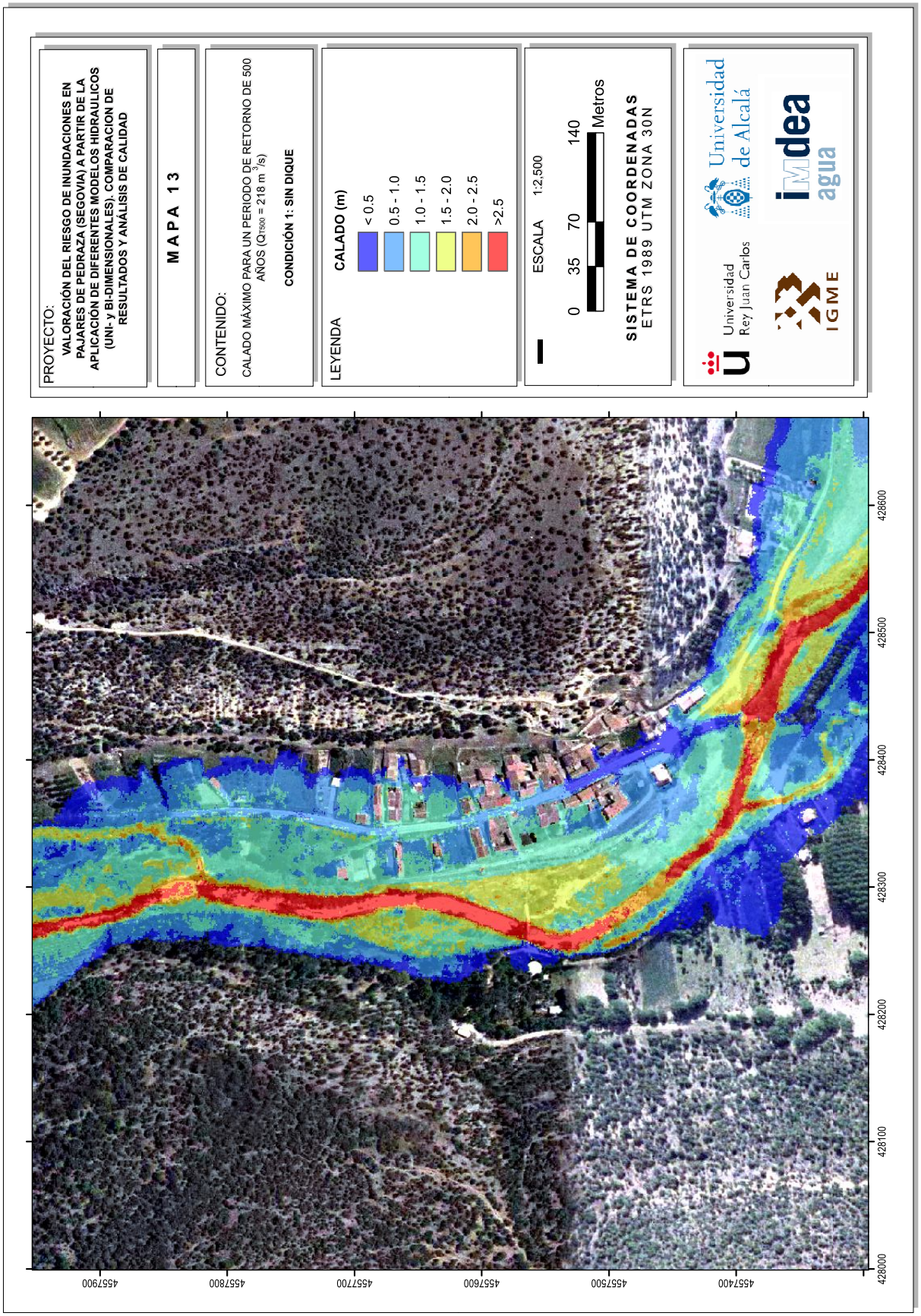

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 8
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

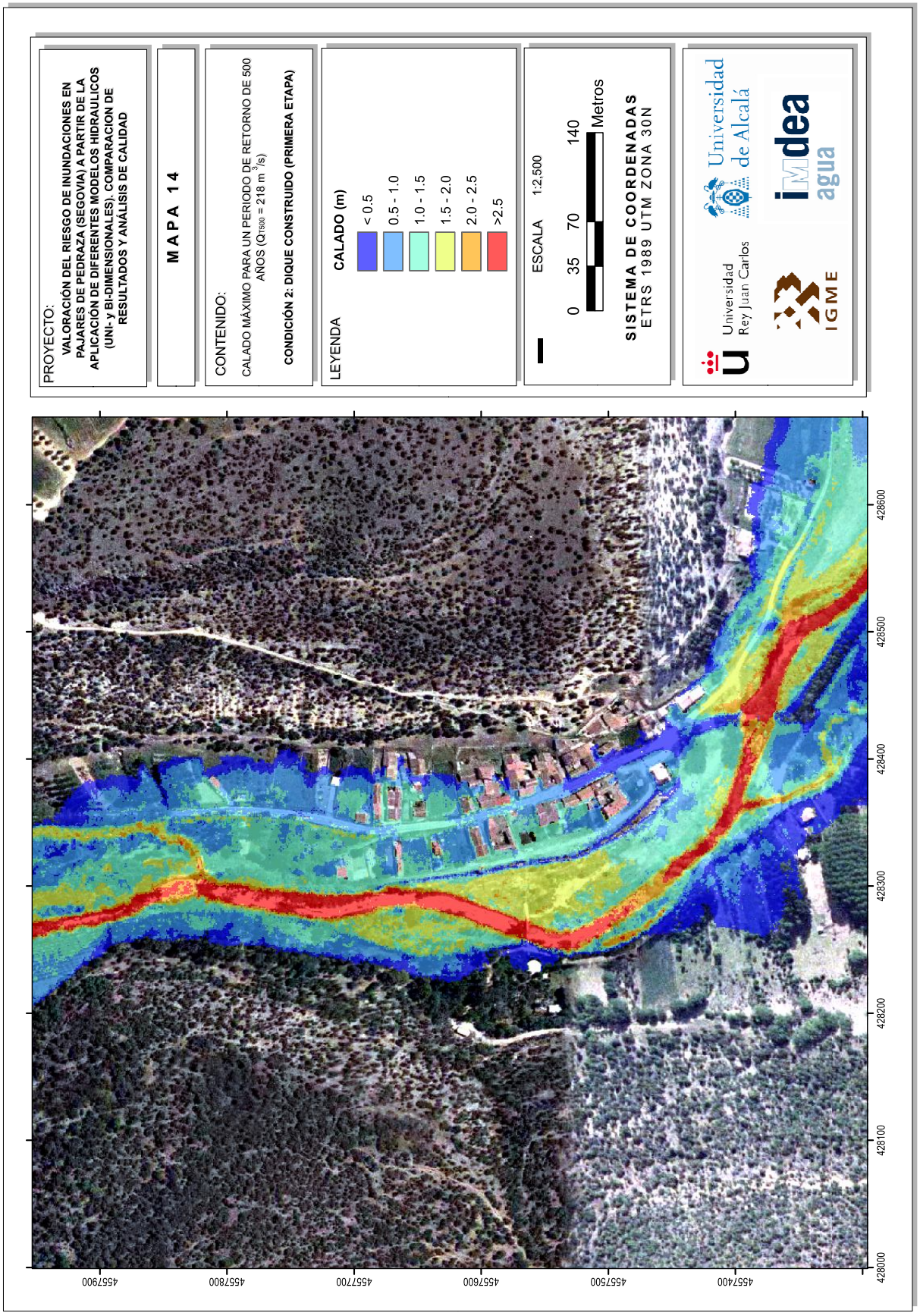

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 9
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
457900
457800
457700
457600
457500
457400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

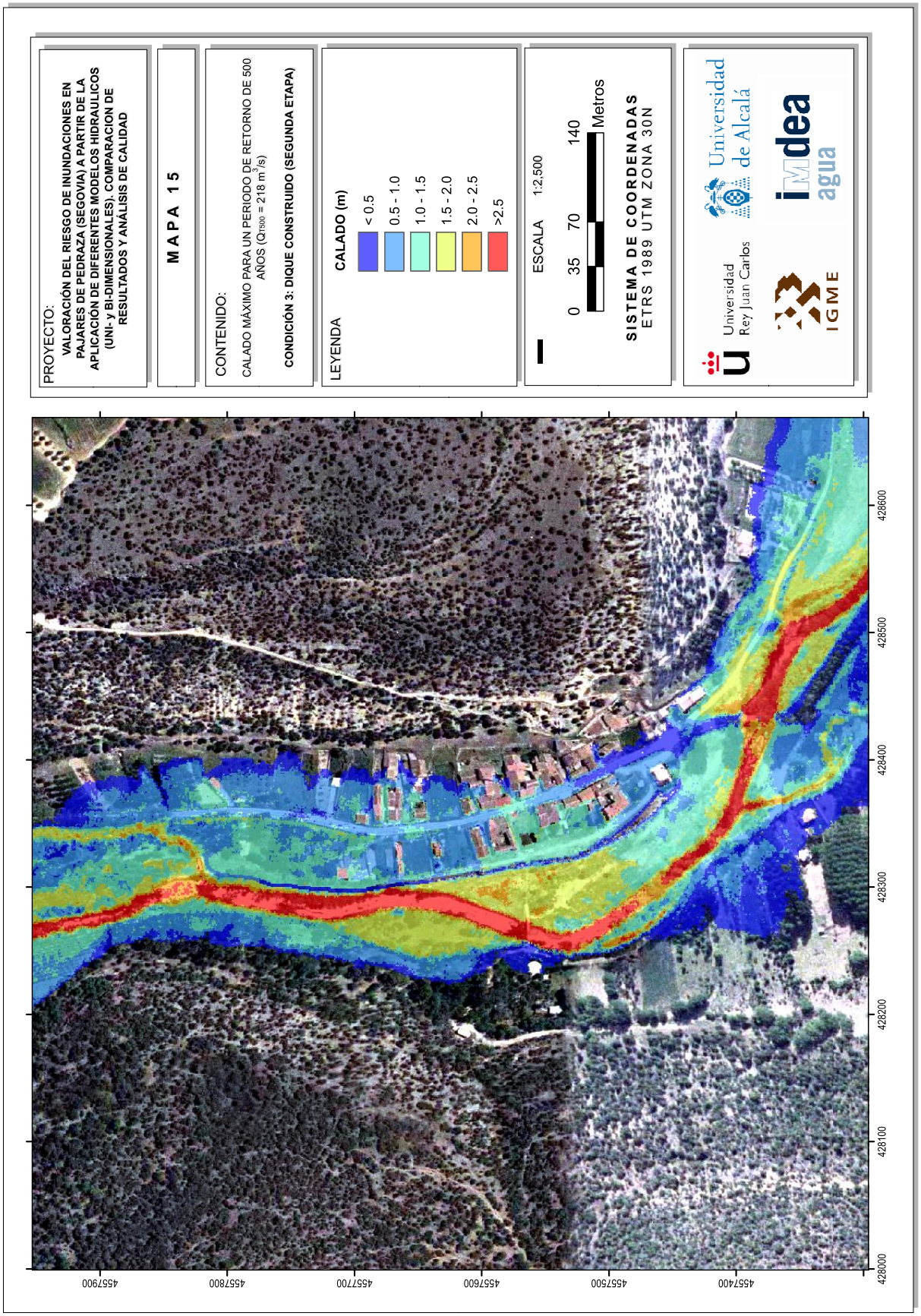

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 10
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151$m^3$/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 11
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS (QT100 = 151 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 12
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 13
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS (QT500 = 218 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
idea agua
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 14
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS (QT500 = 218 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 15
CONTENIDO:
CALADO MÁXIMO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CALADO (m)
< 0.5
0.5 - 1.0
1.0 - 1.5
1.5 - 2.0
2.0 - 2.5
>2.5
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 16

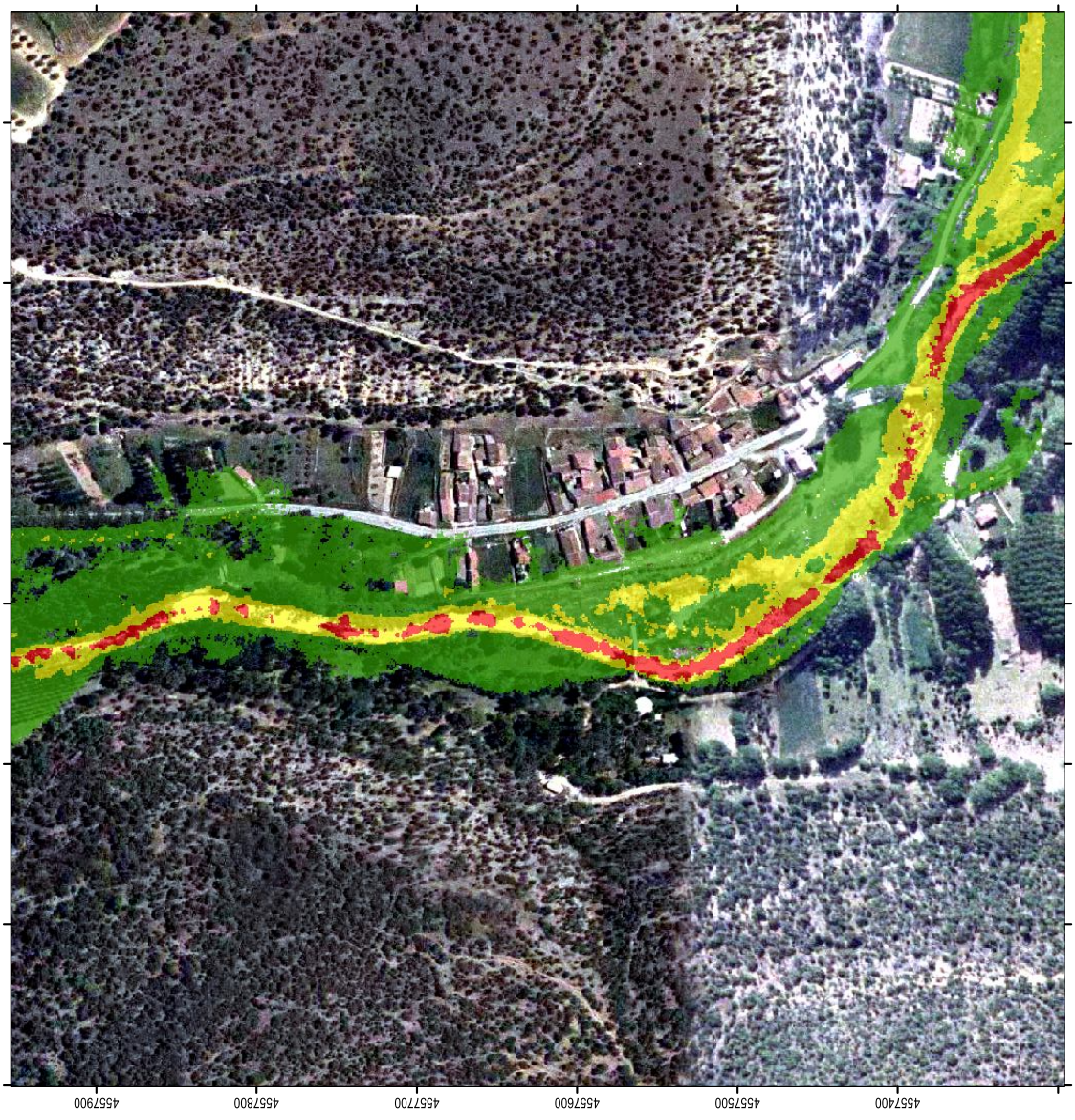
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS ($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE

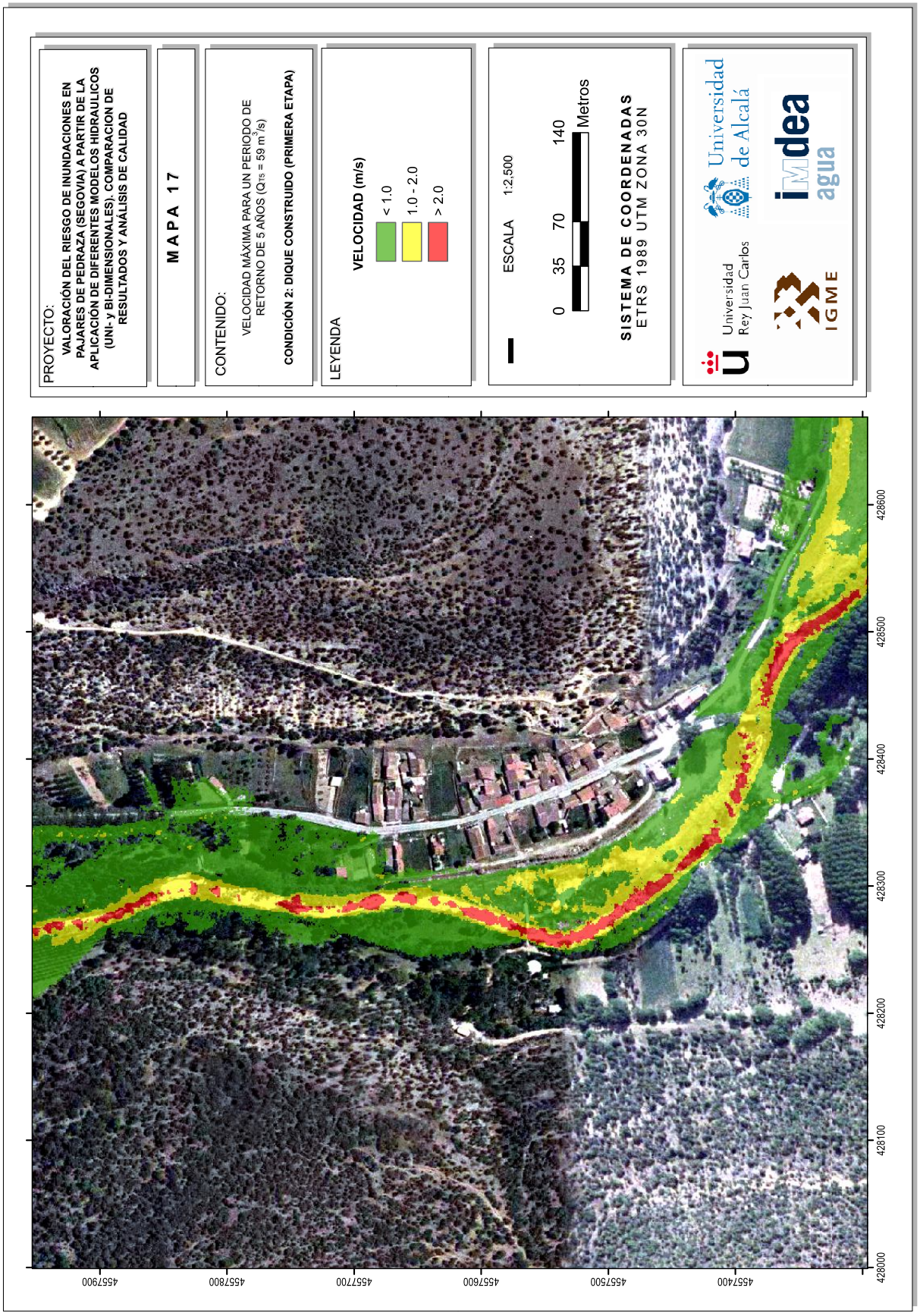
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0

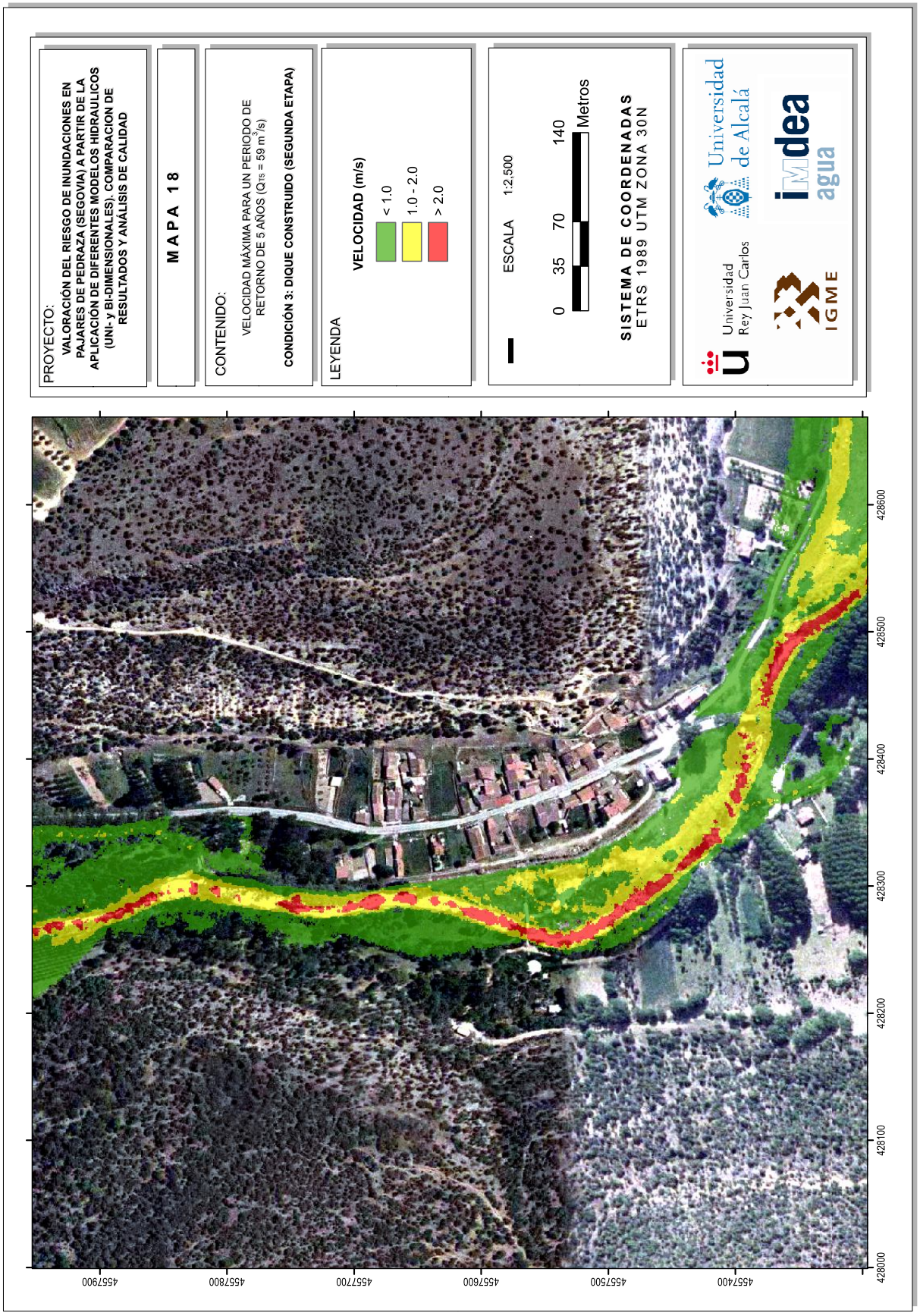
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros

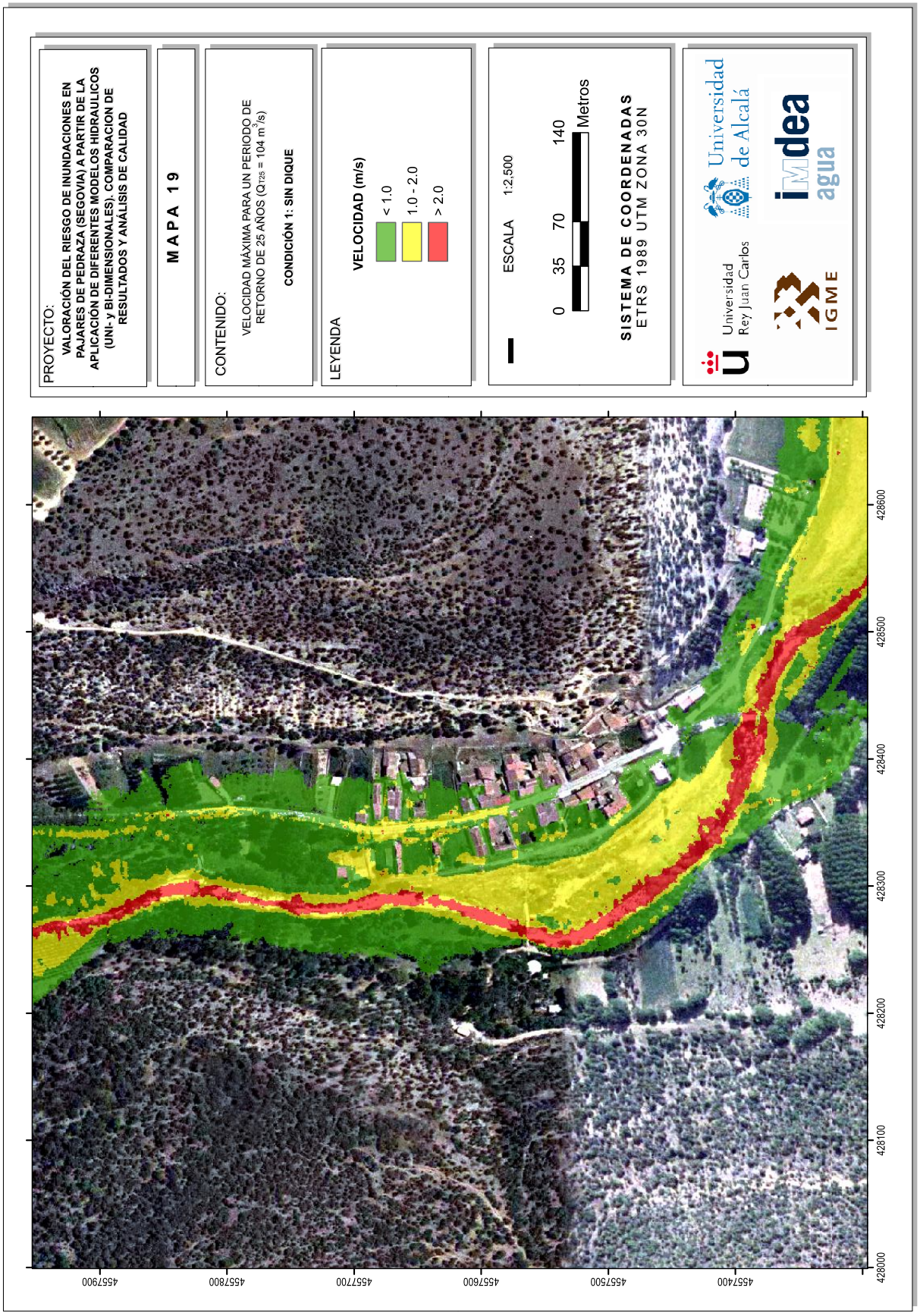
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

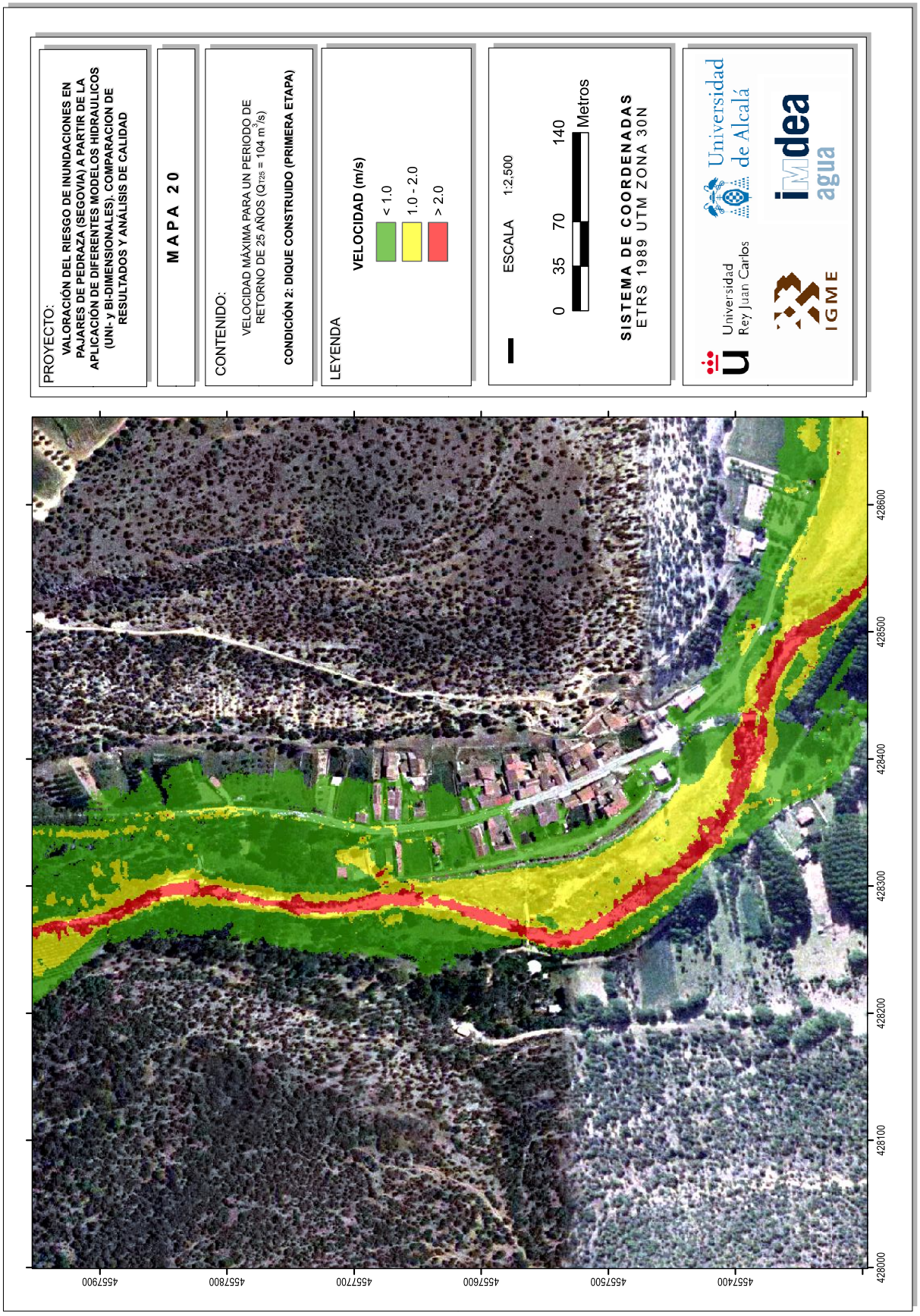
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua

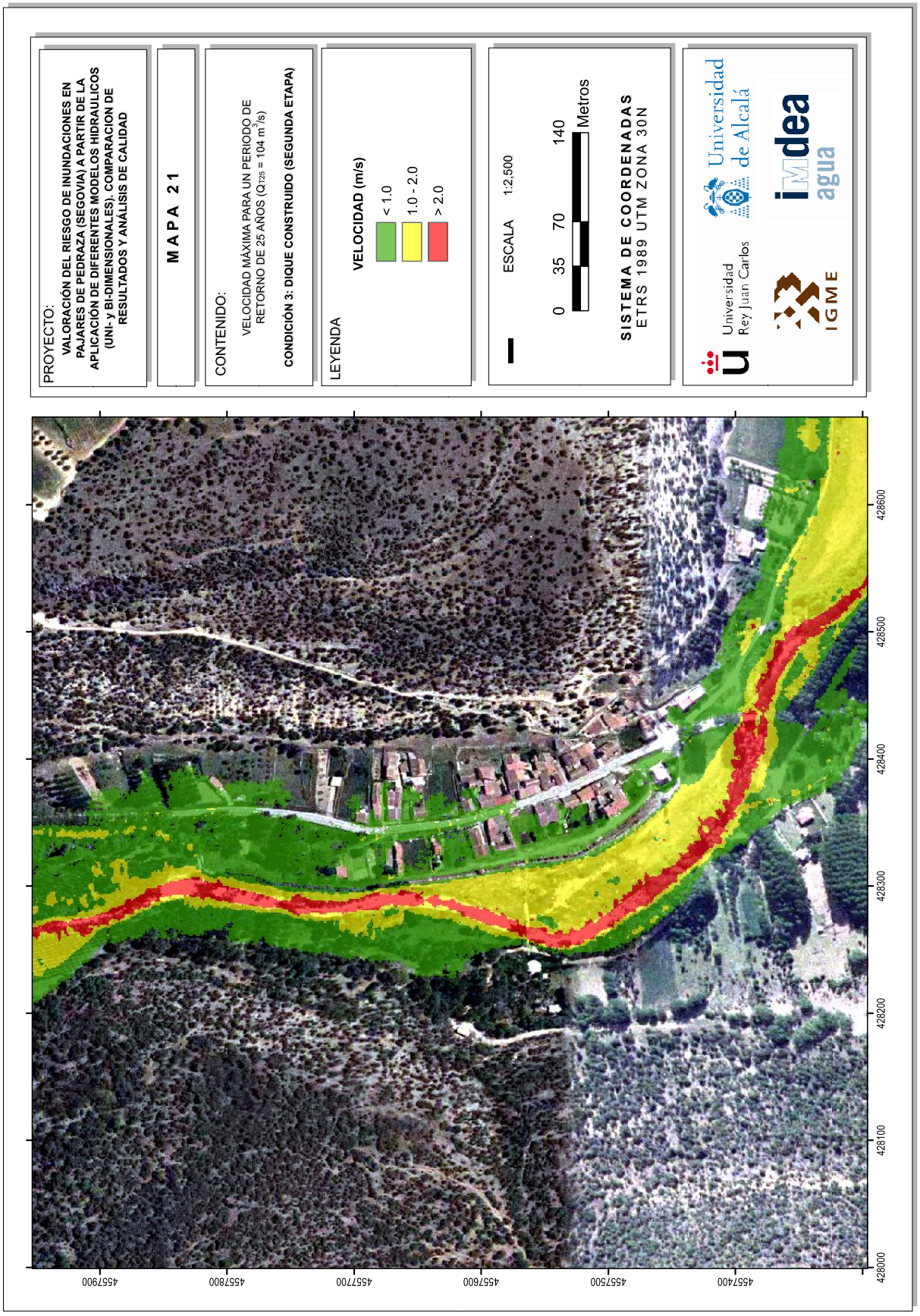


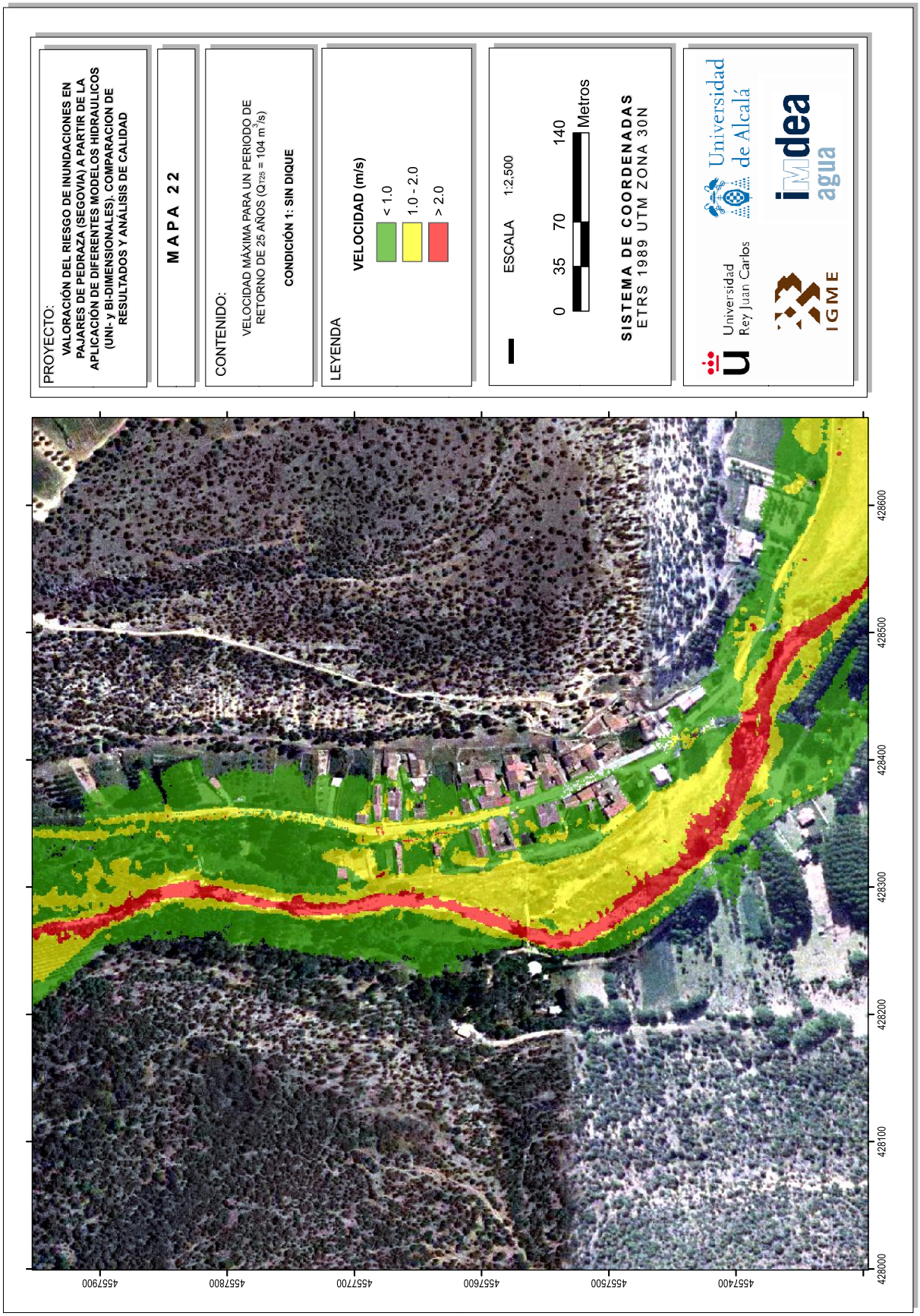

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 17
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q25 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

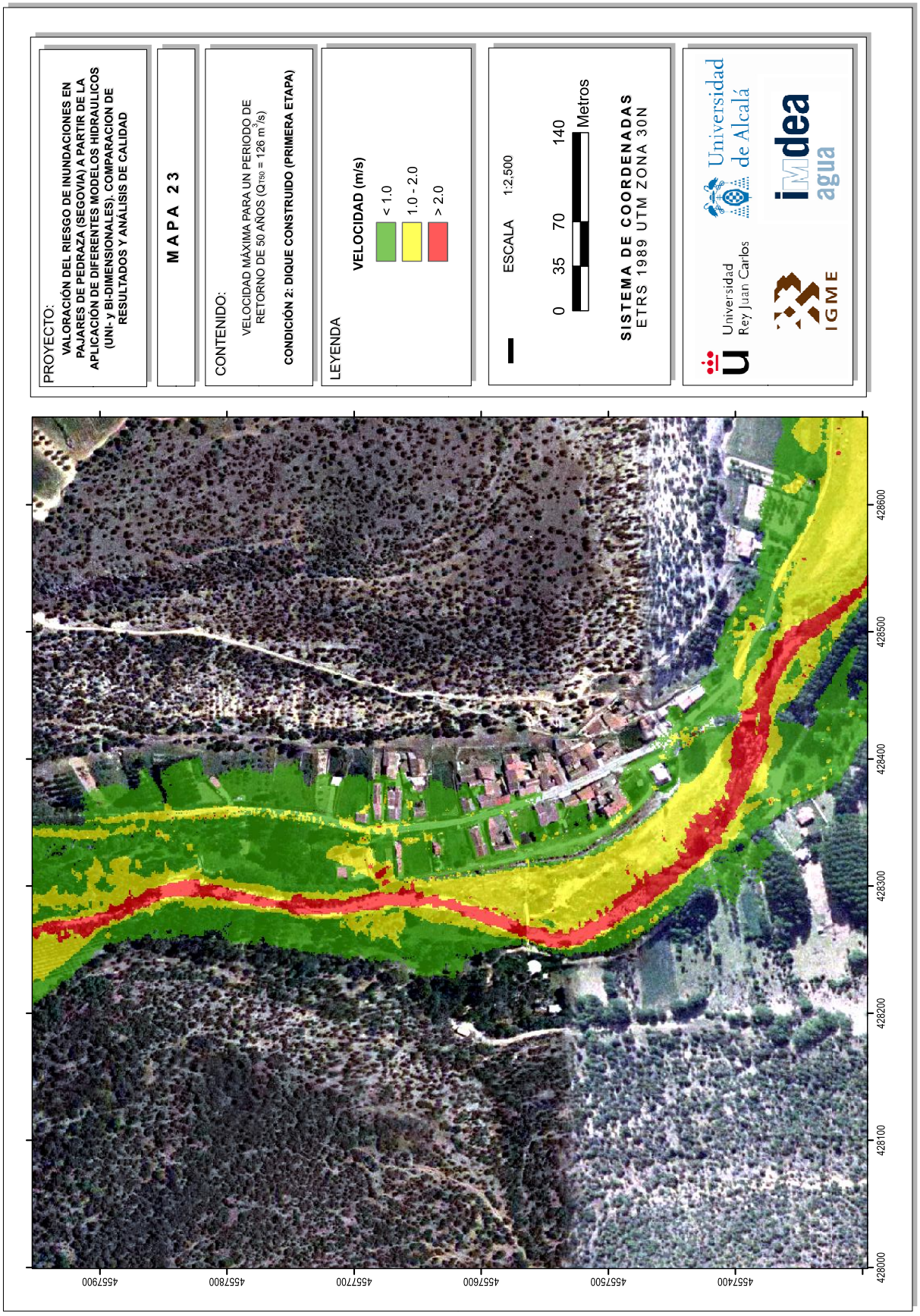

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 18
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q25 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

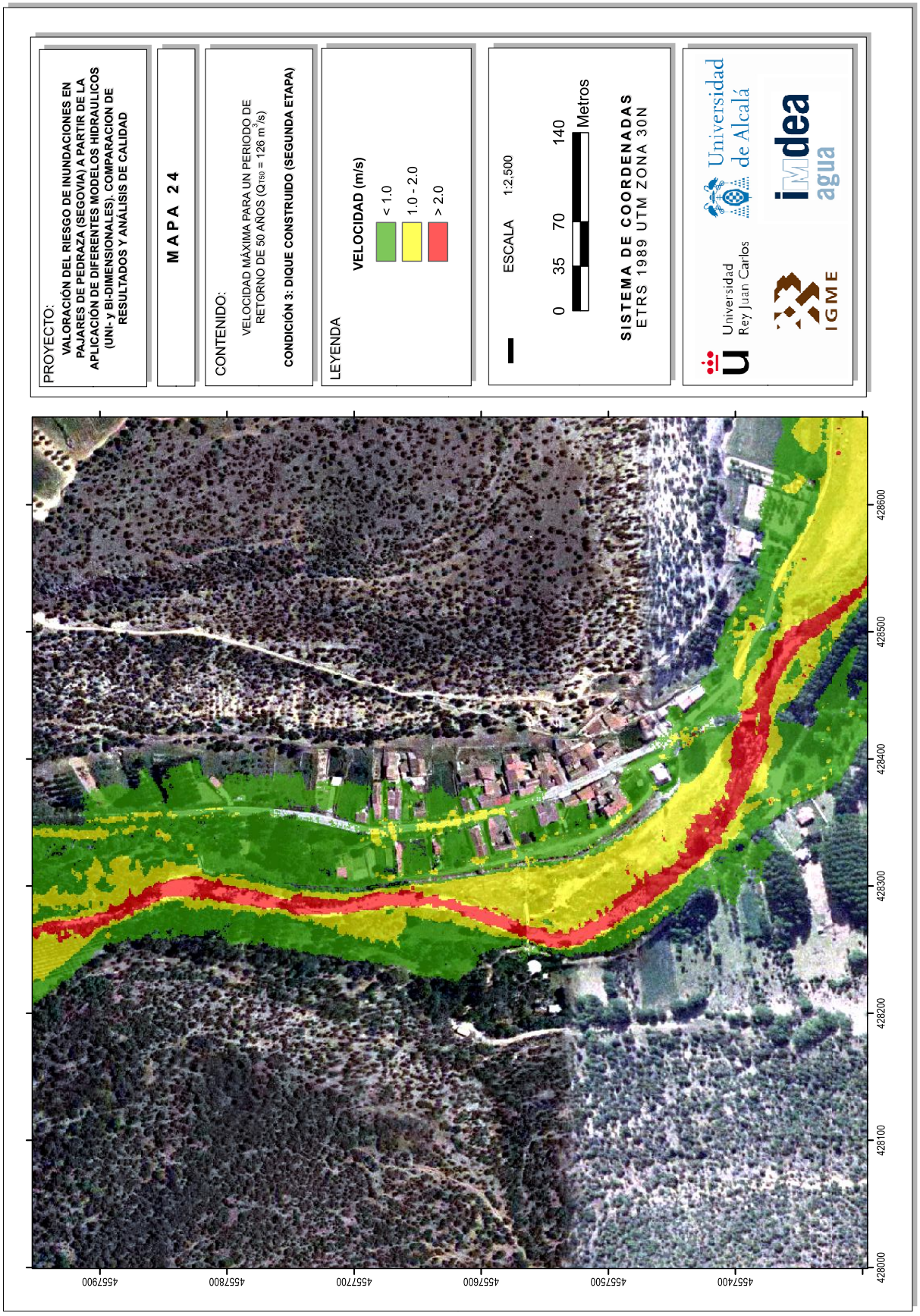

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 19
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Q125 = 104 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 20
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Q125 = 104 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 21
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Q125 = 104 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 22
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Q125 = 104 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 23
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS (Q150 = 126 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 24
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS (Q150 = 126 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 25

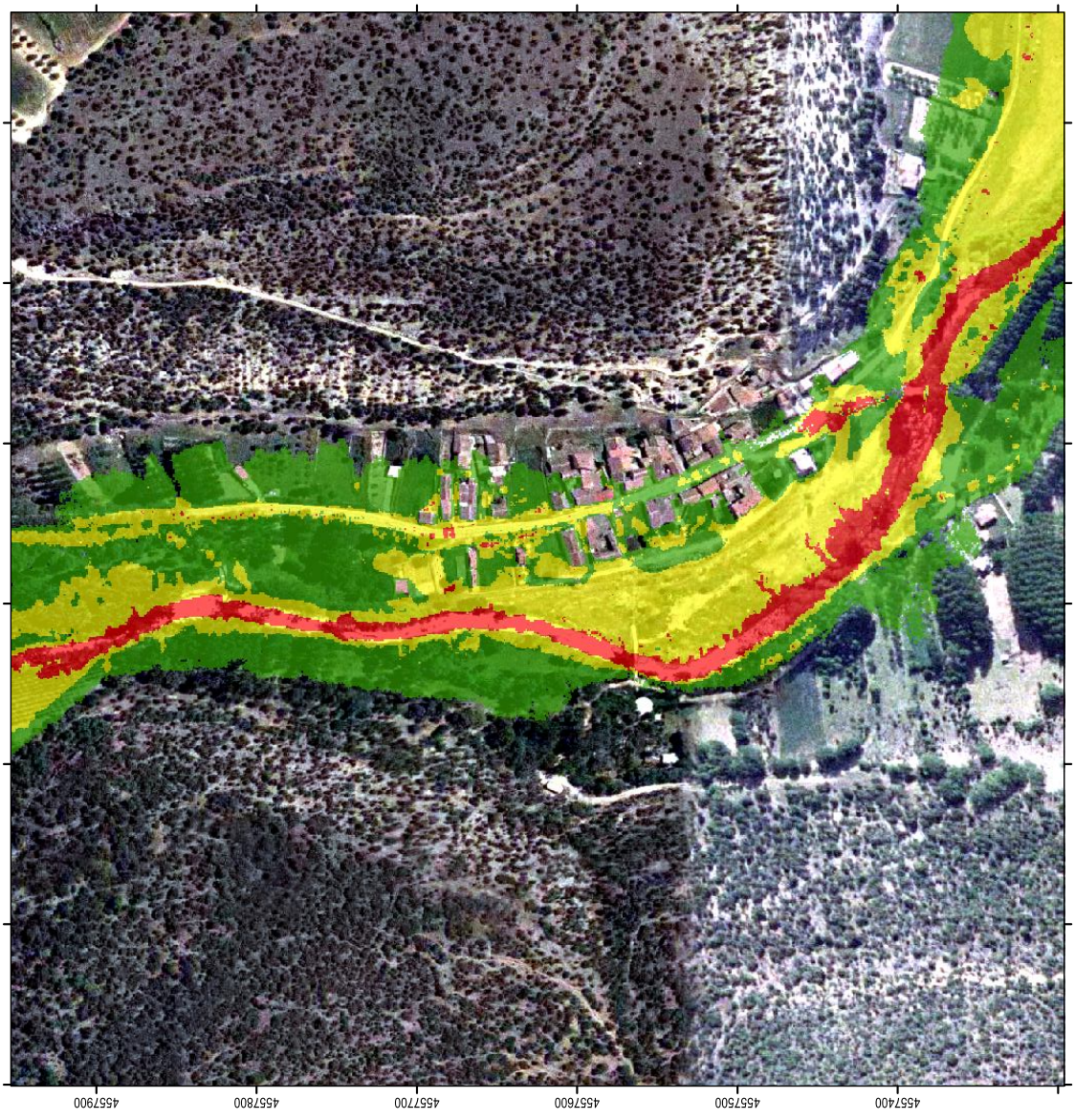
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE

LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0

ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua



PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 26

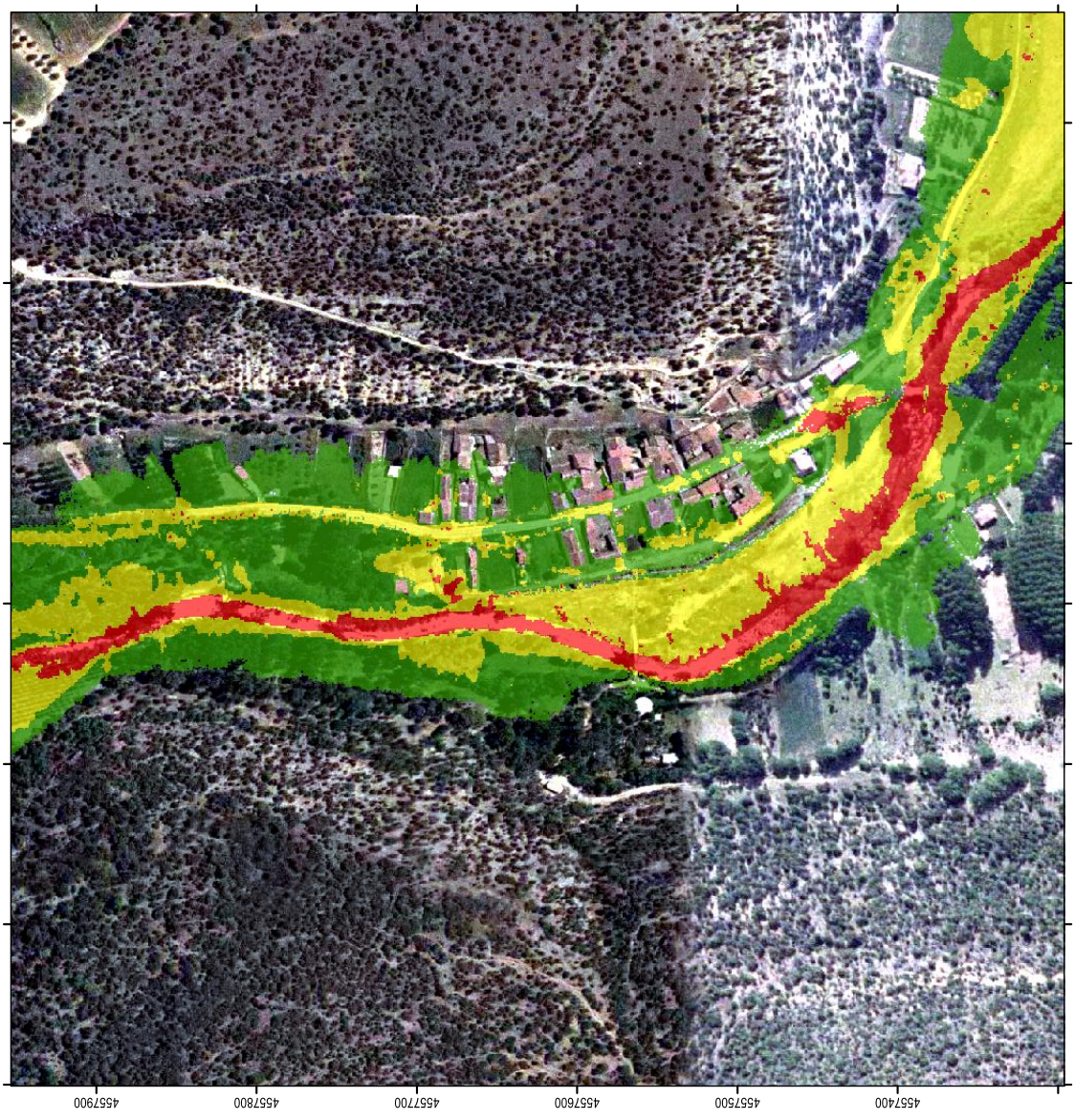
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)

LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0

ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua



PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 27

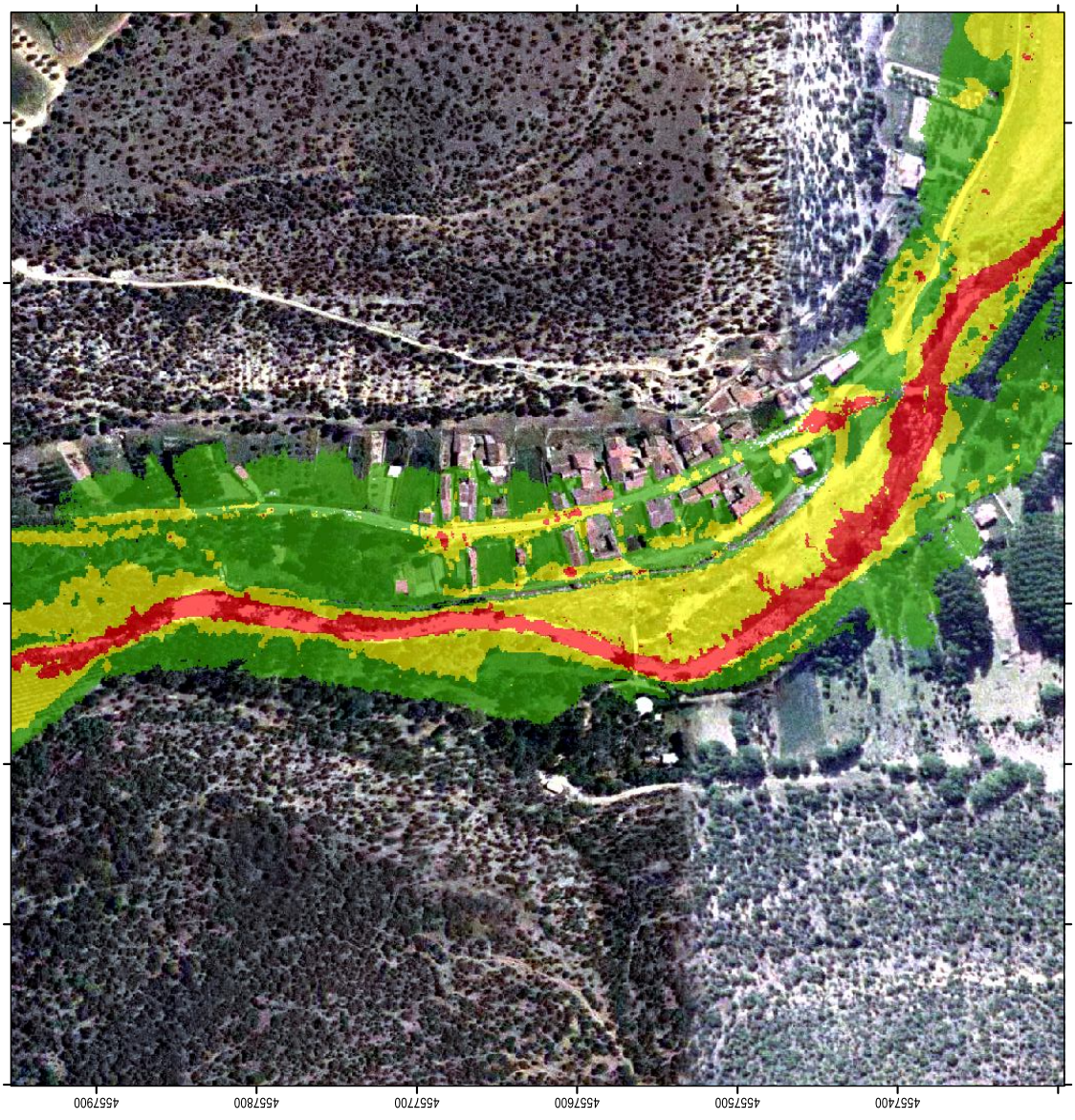
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)

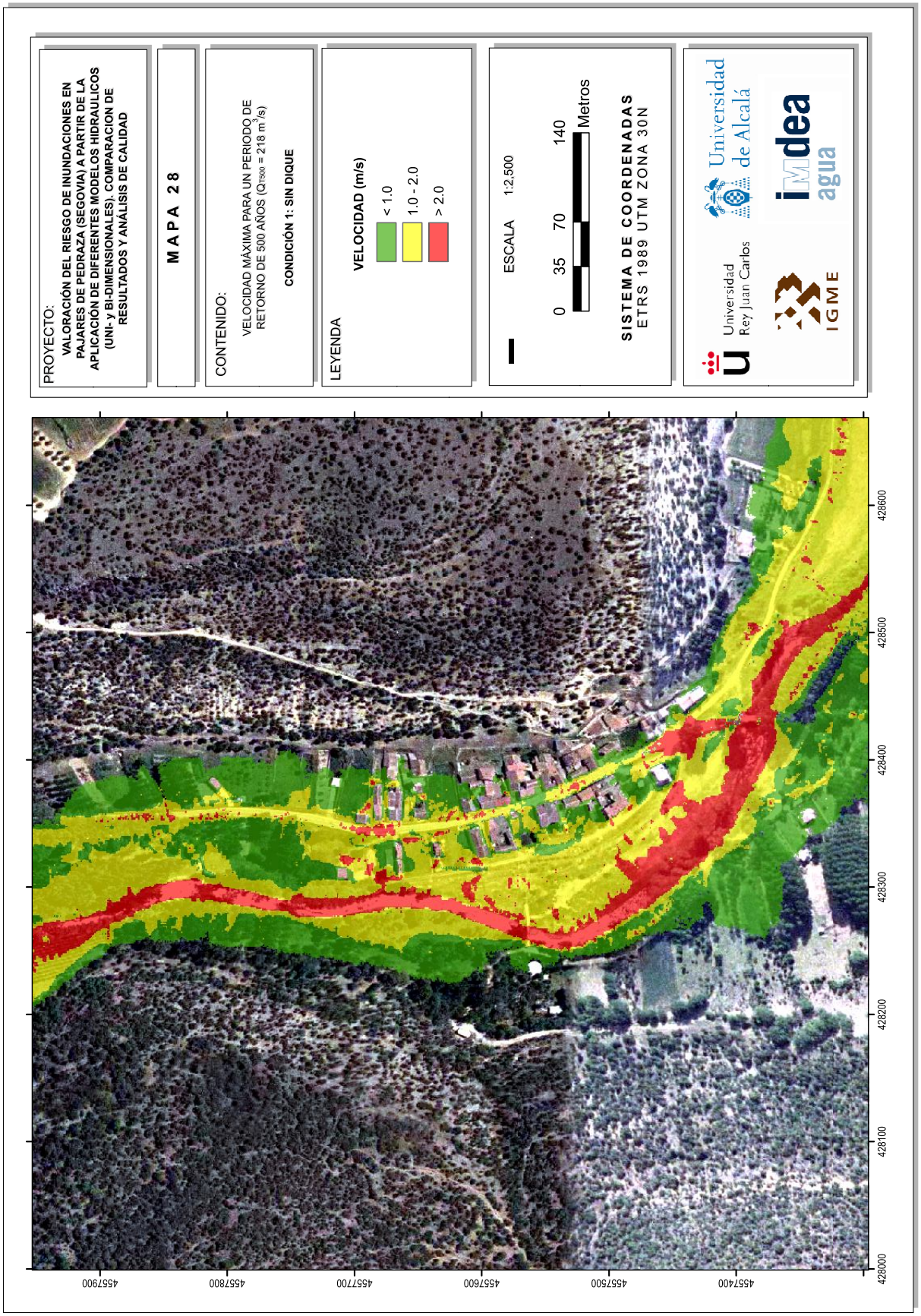
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0

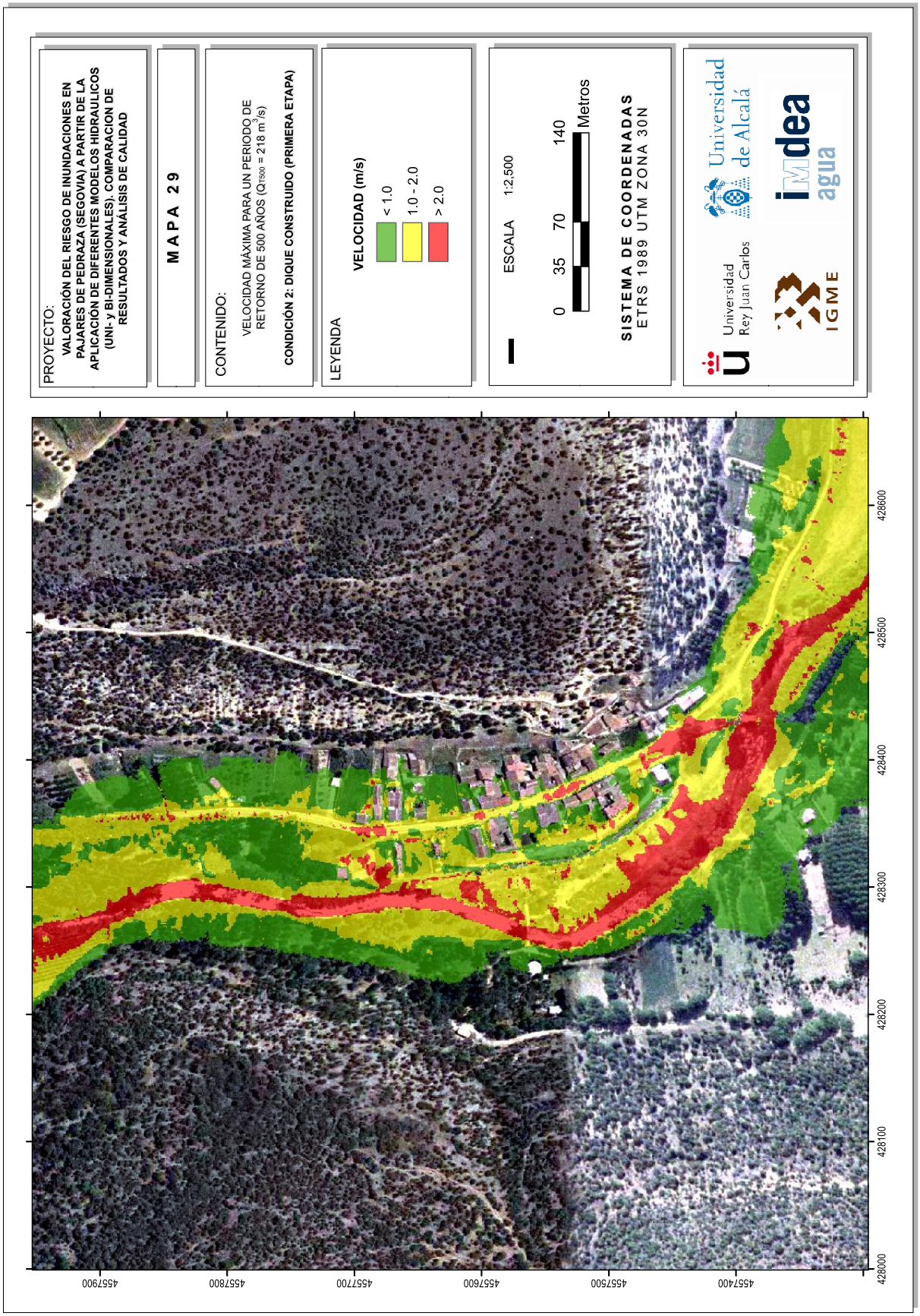
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros

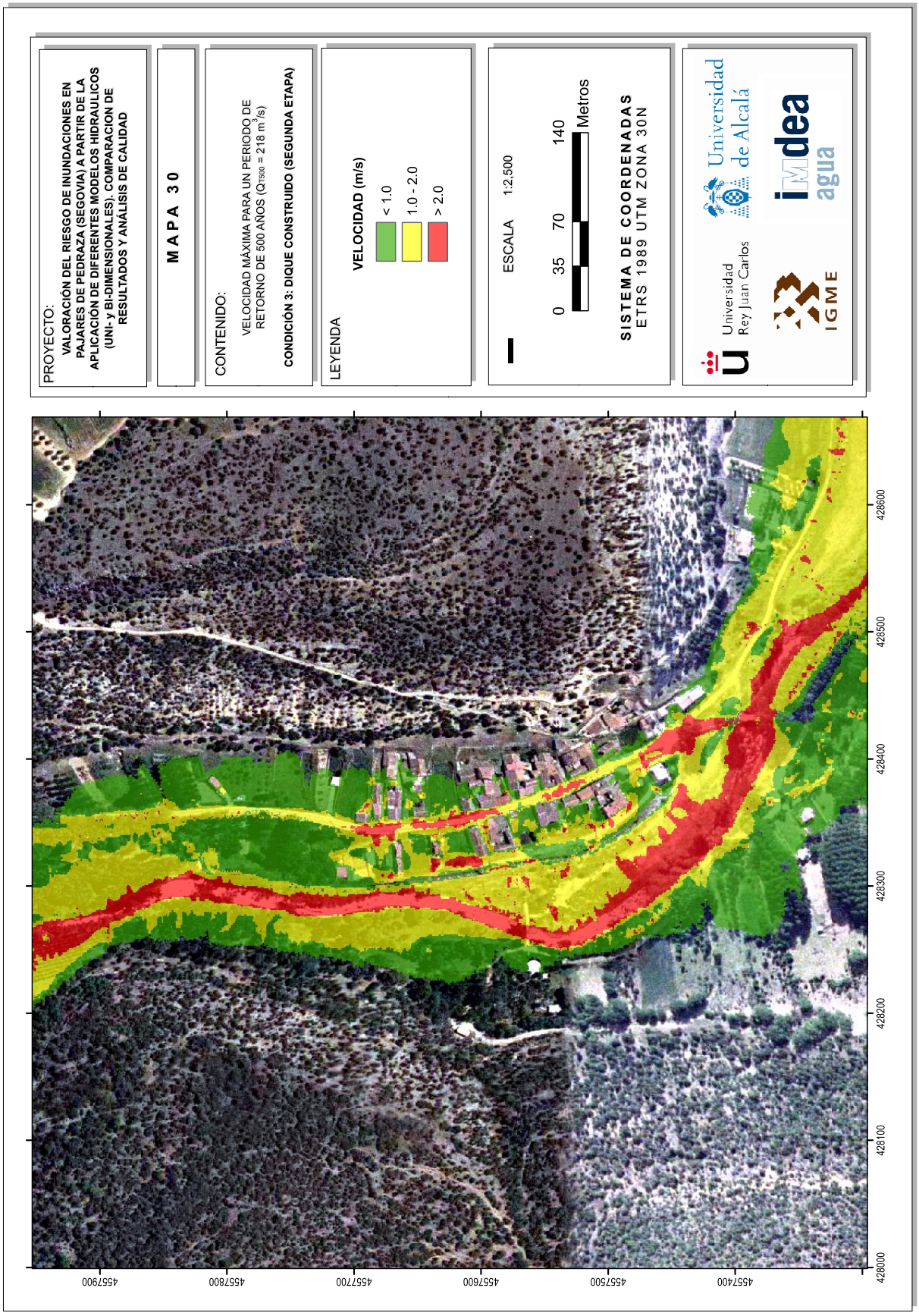
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

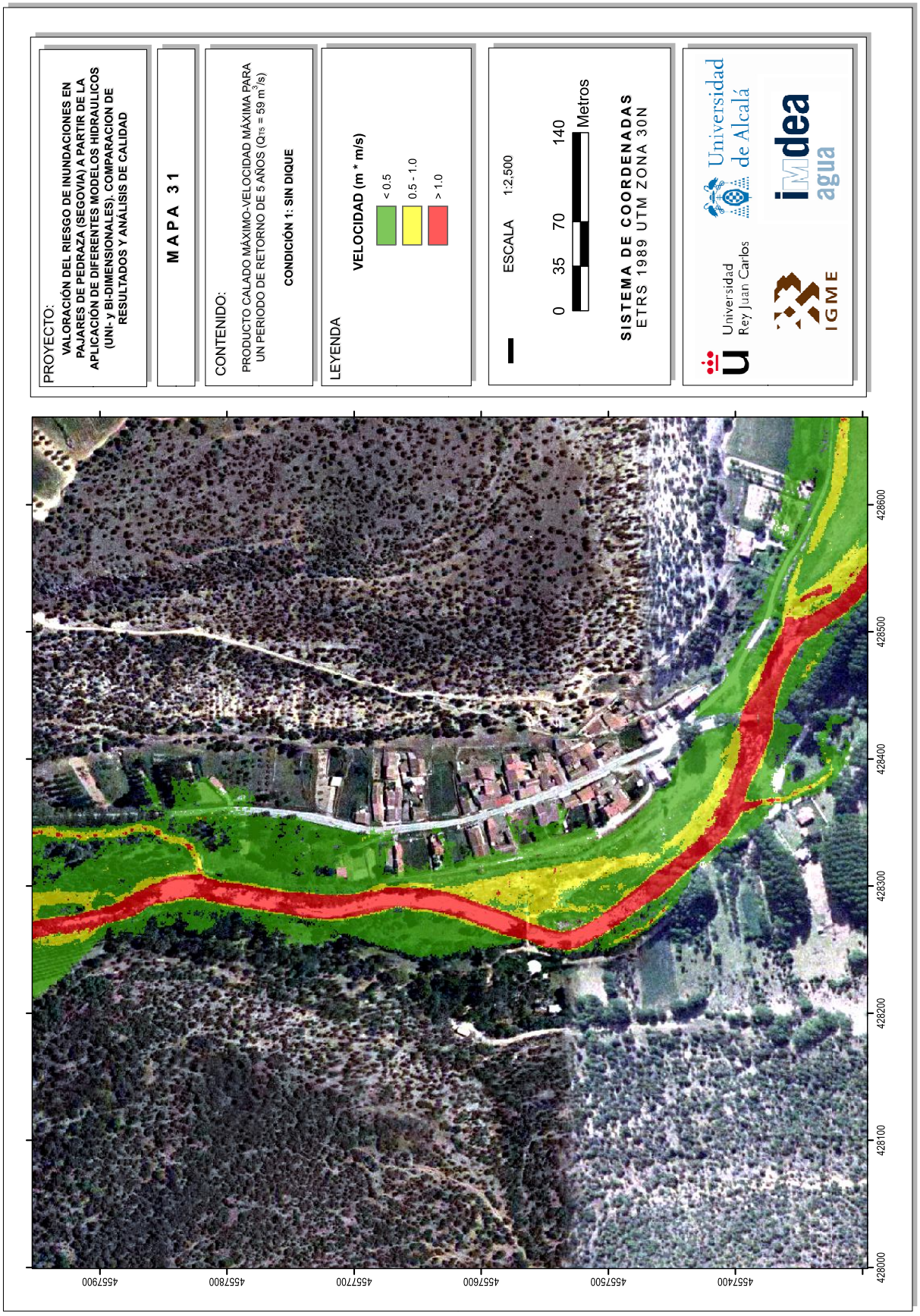
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua

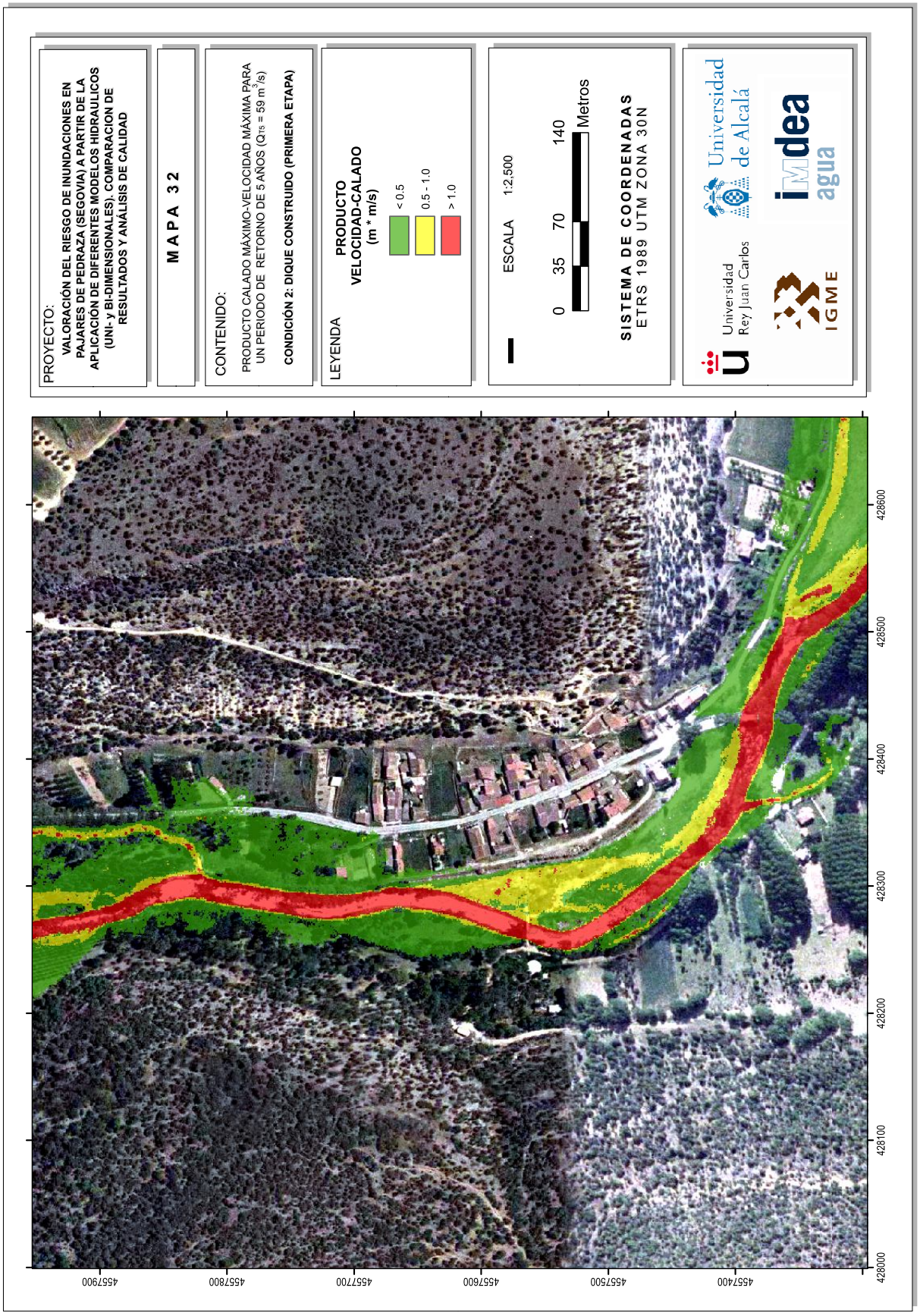


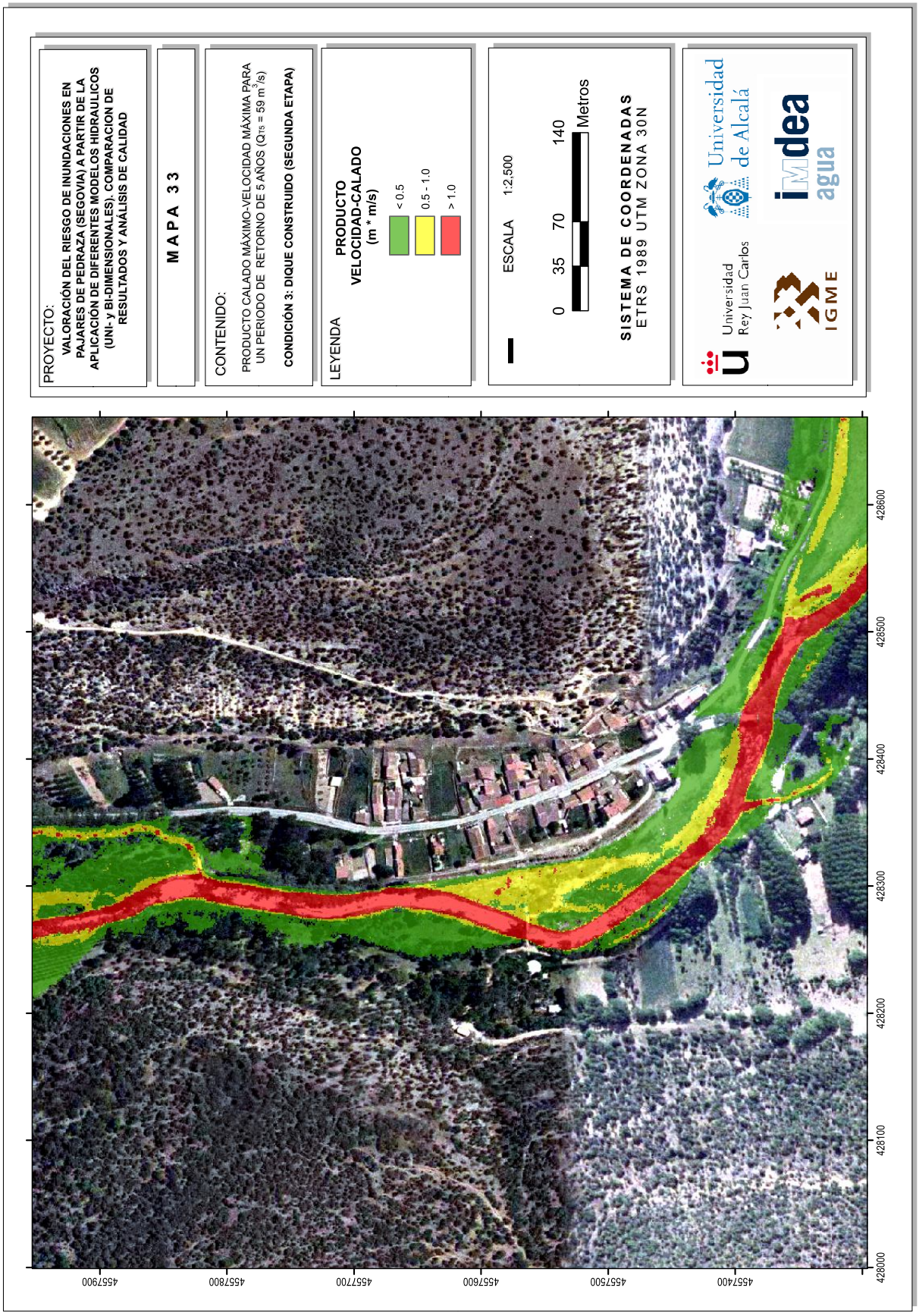

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 28
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

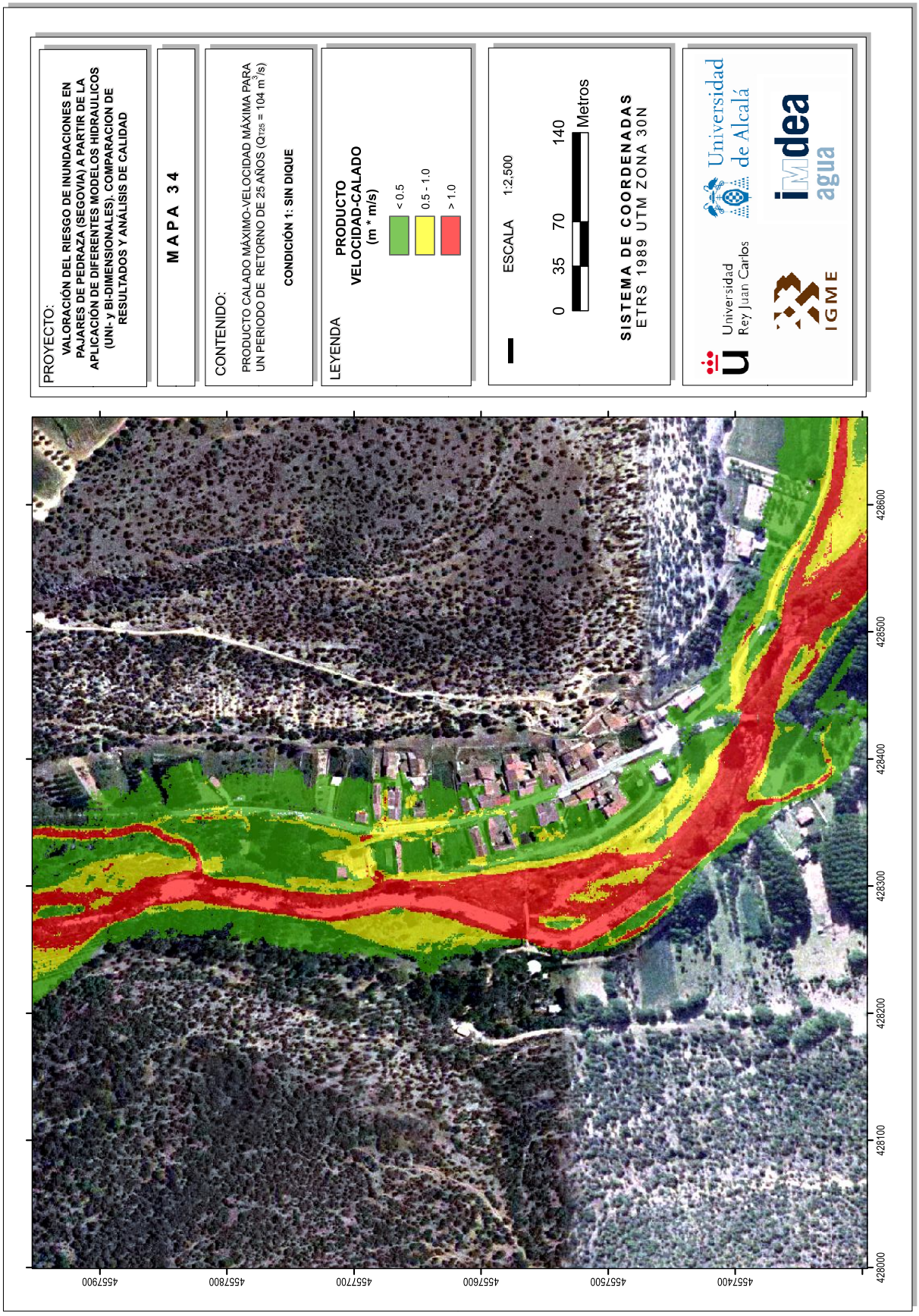

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 29
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

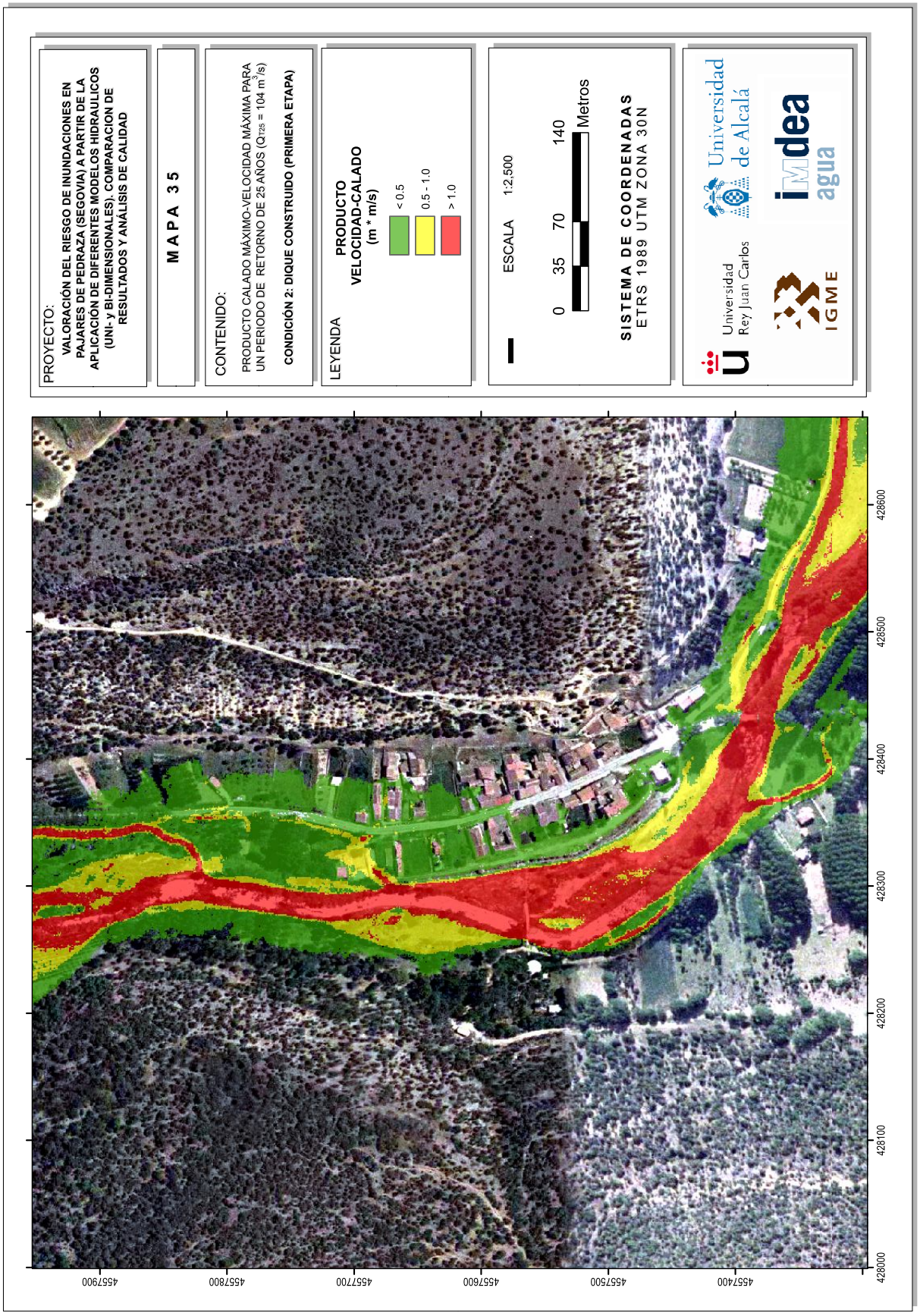

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 30
CONTENIDO:
VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
VELOCIDAD (m/s)
< 1.0
1.0 - 2.0
> 2.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

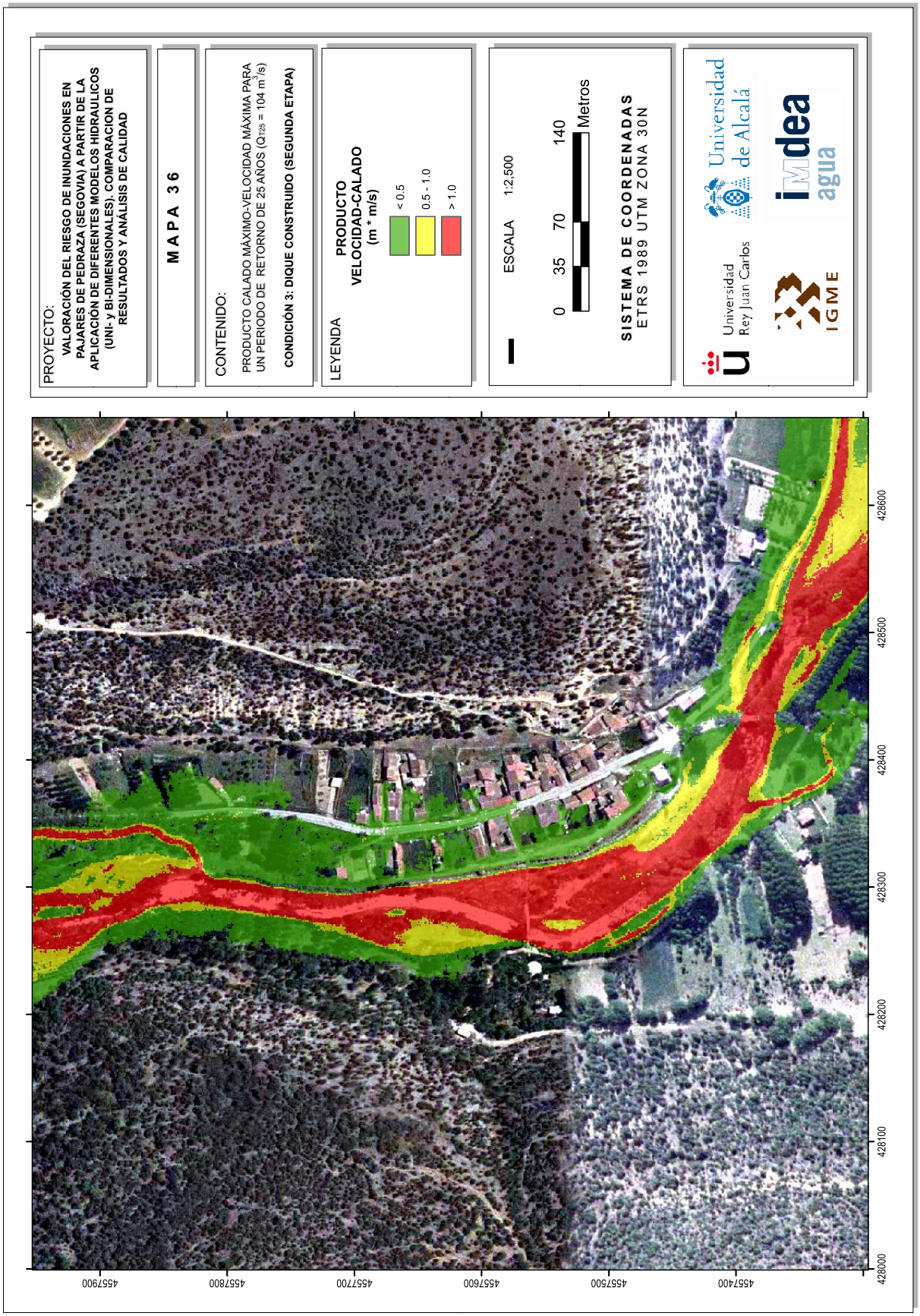

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 31
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
VELOCIDAD (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 32
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m2 * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
455900
455800
455700
455600
455500
455400

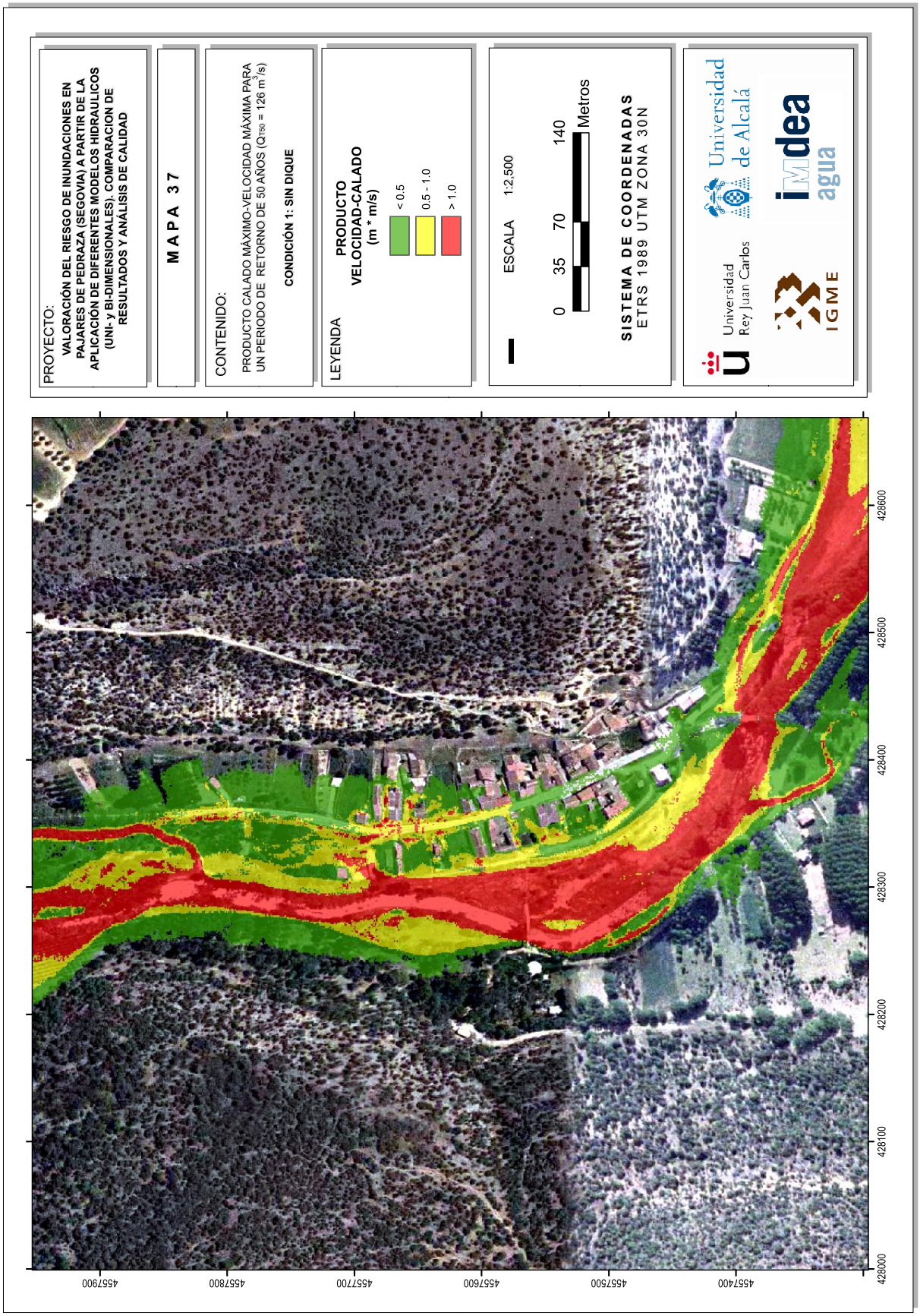

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 33
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Q5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

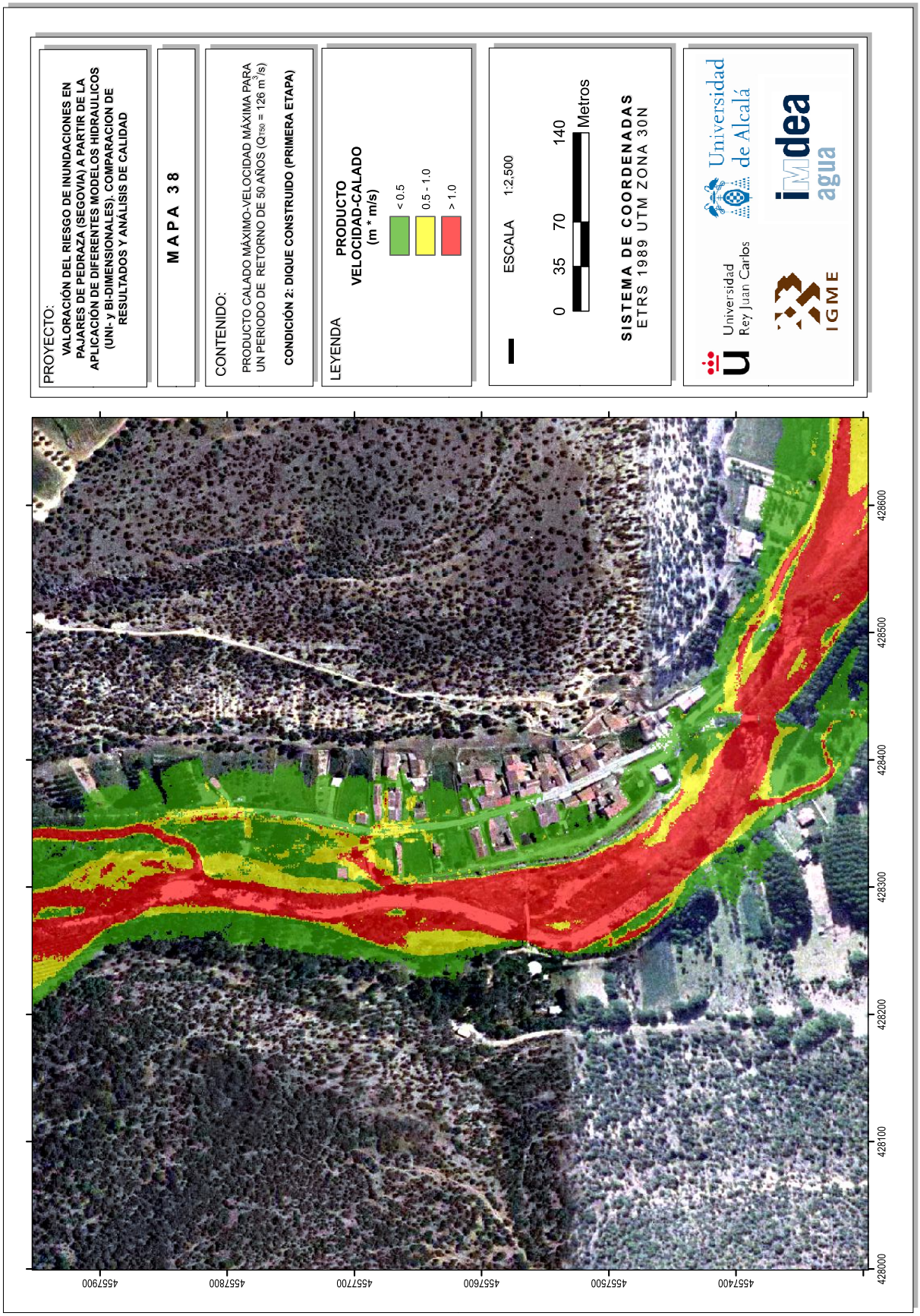

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 34
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

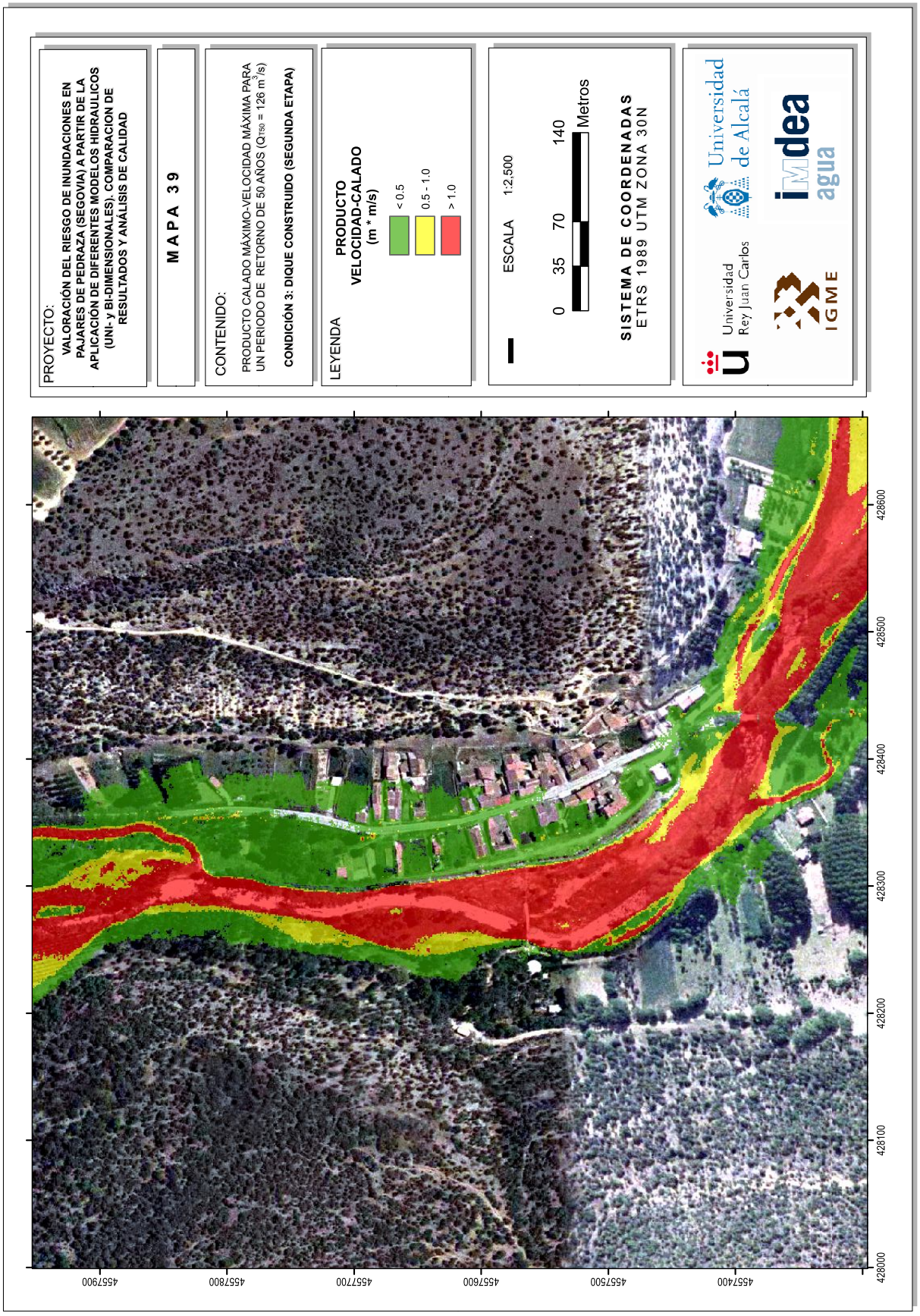

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 35
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS (Q25 = 104 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m2 * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

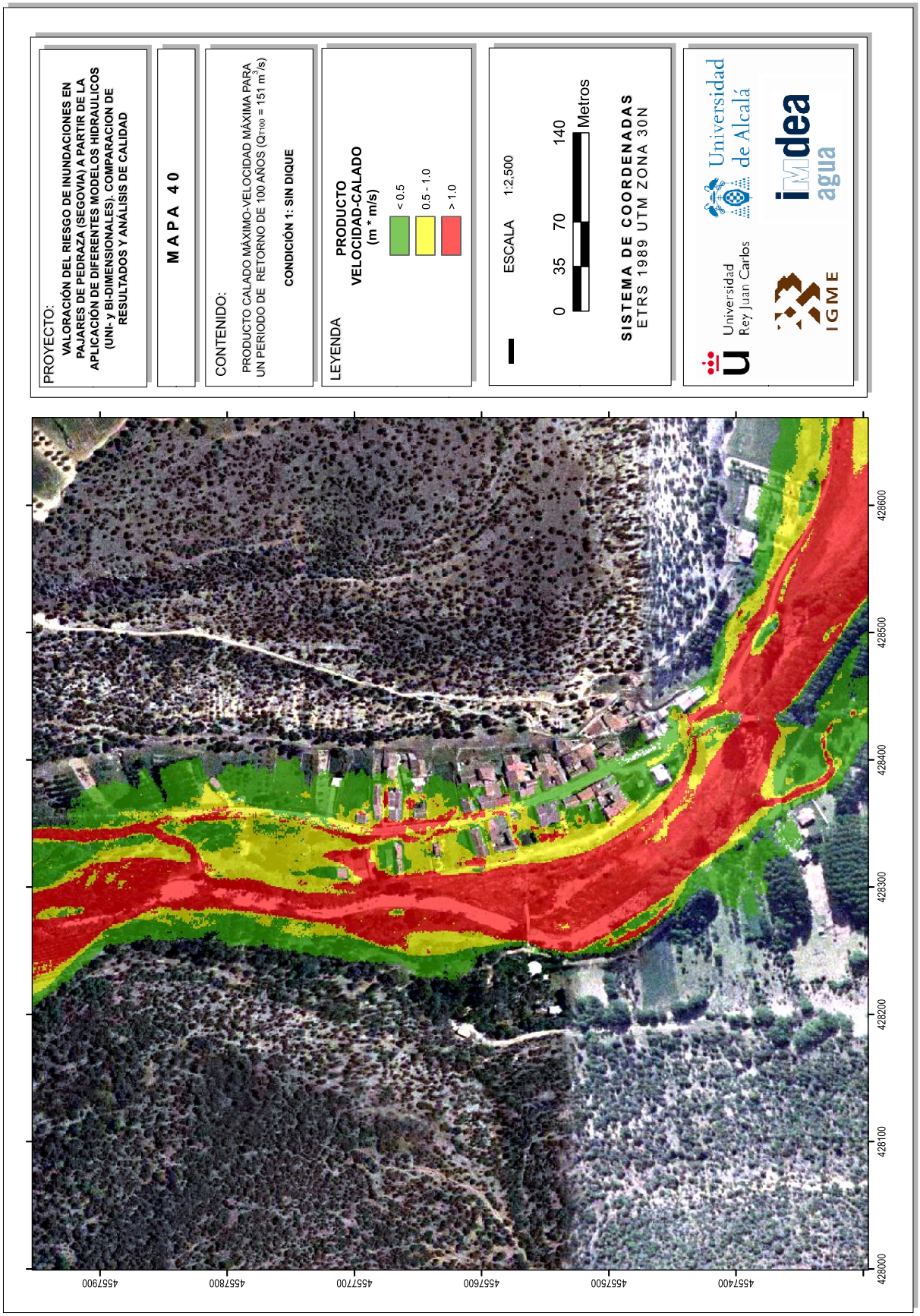


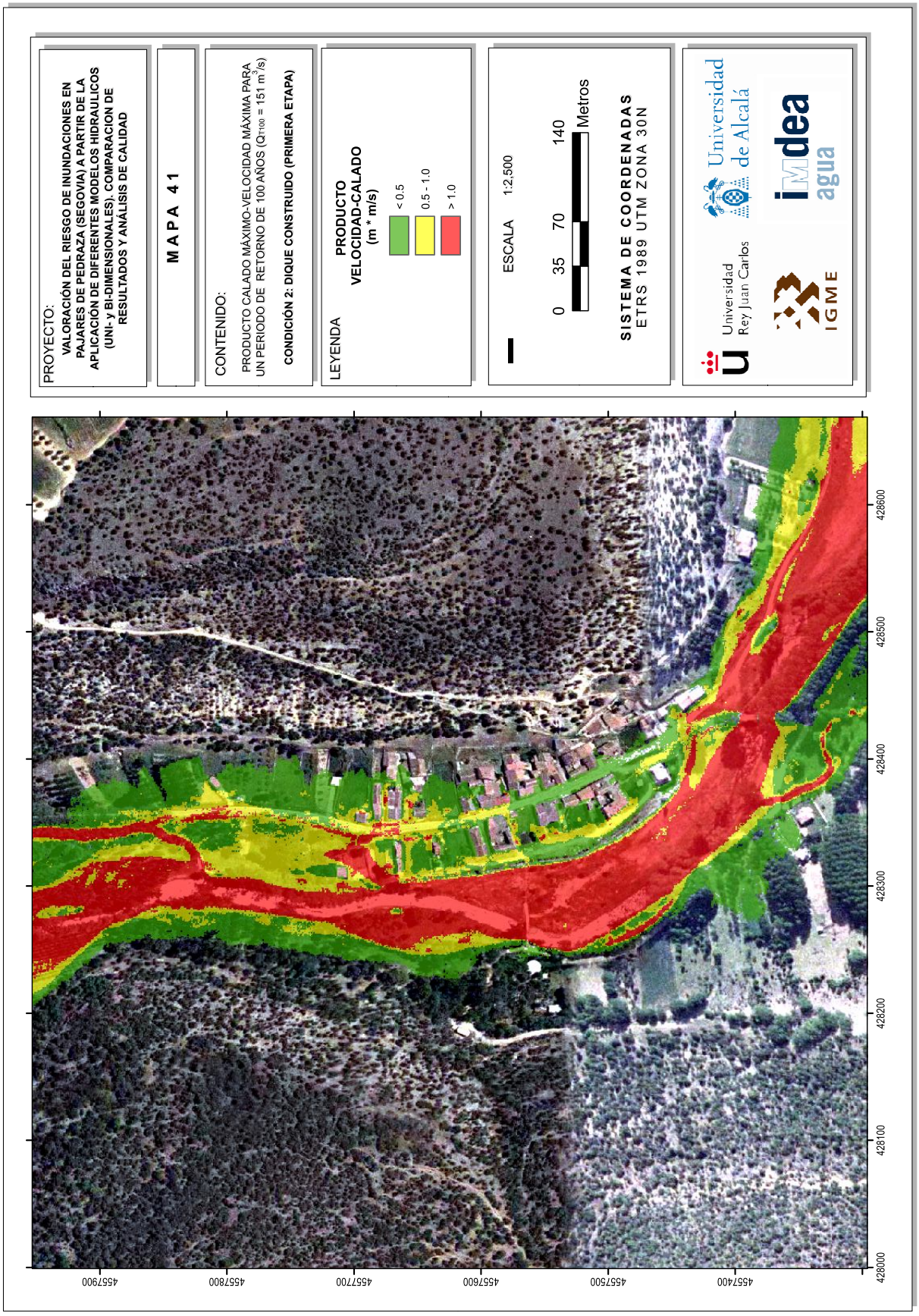
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 36
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140
Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IGME
imdea agua
428000
428100
428200
428300
428400
428500
428600
4557400
4557500
4557600
4557700
4557800
4557900

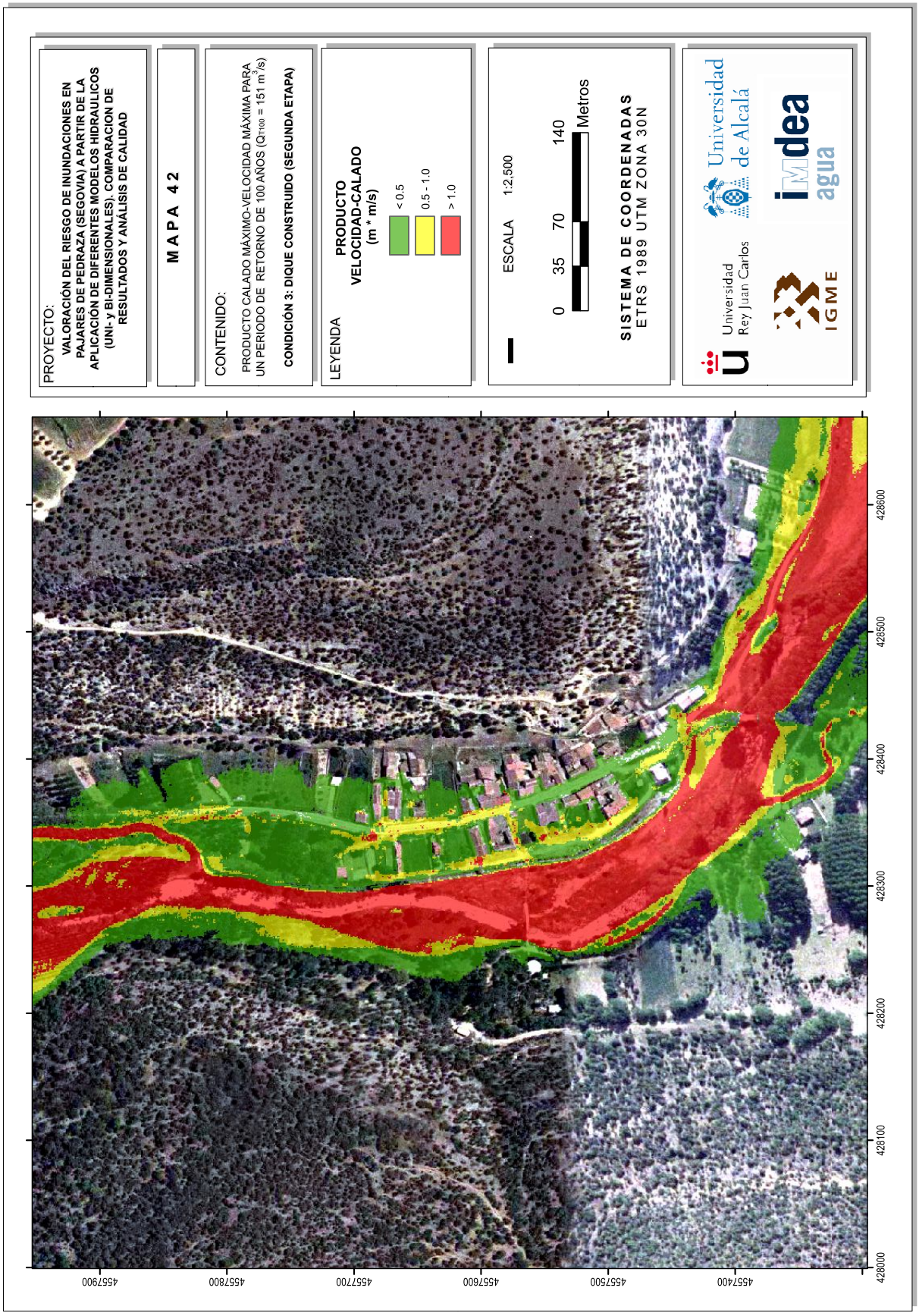

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 37
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

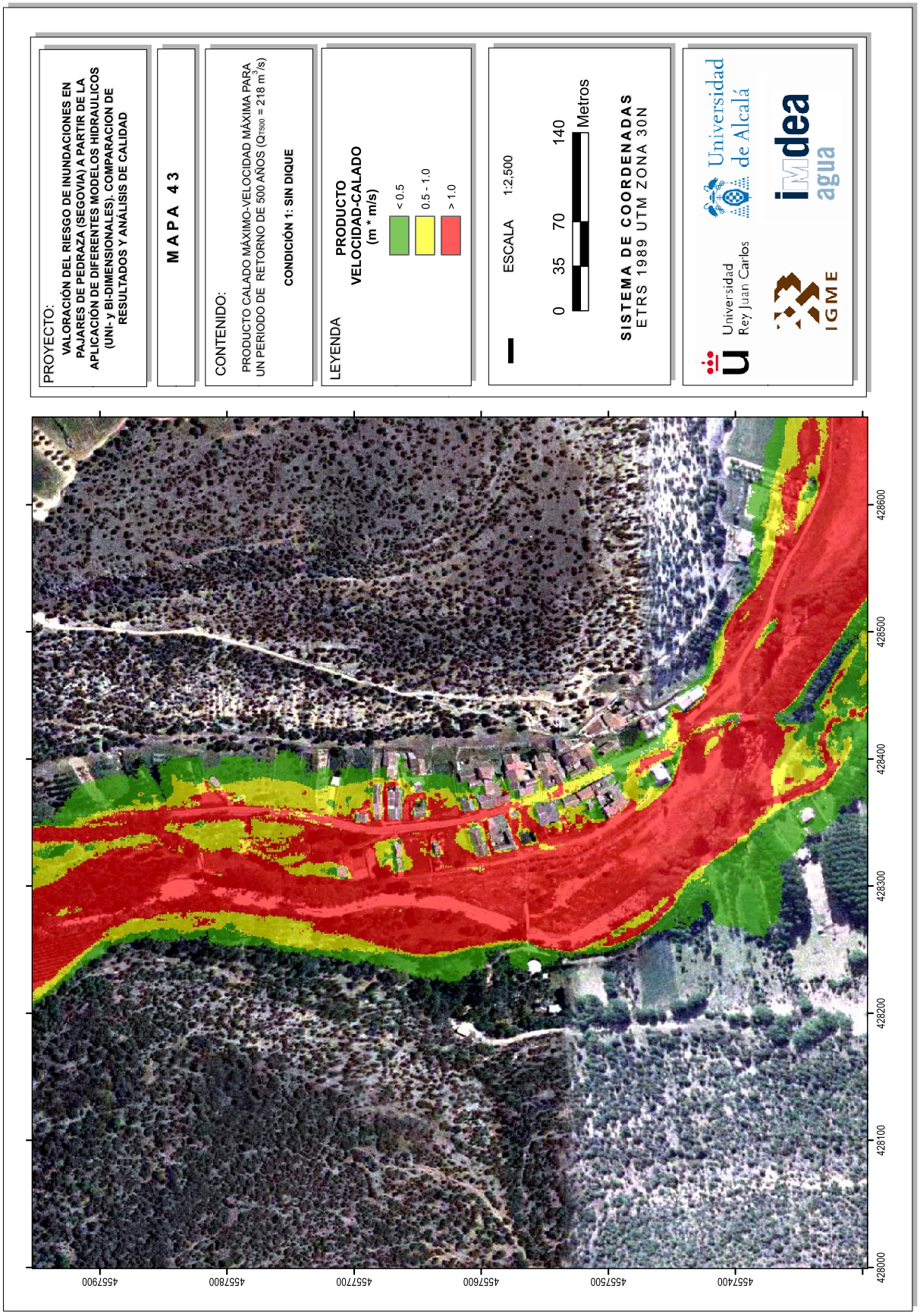

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 38
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

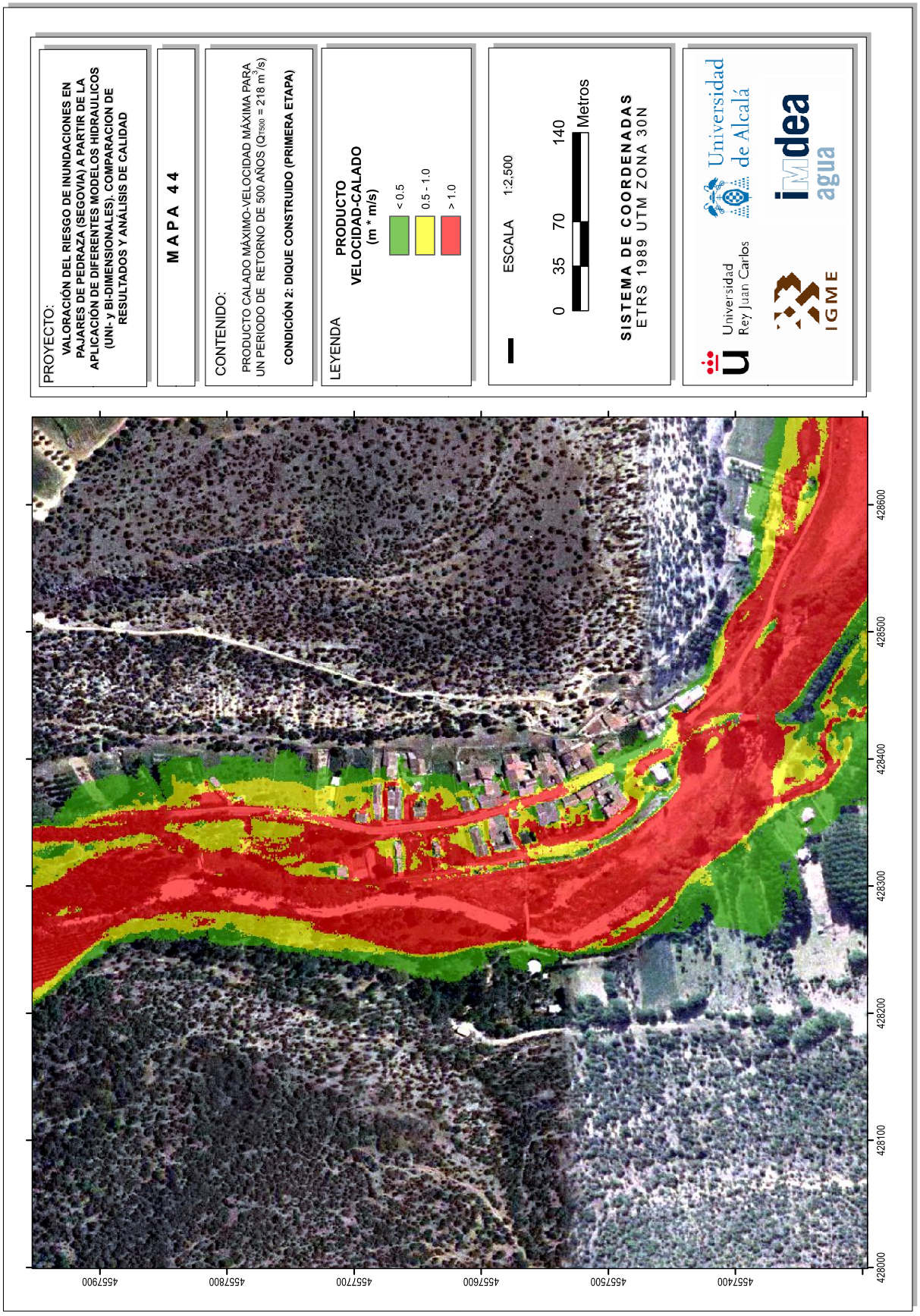

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 39
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

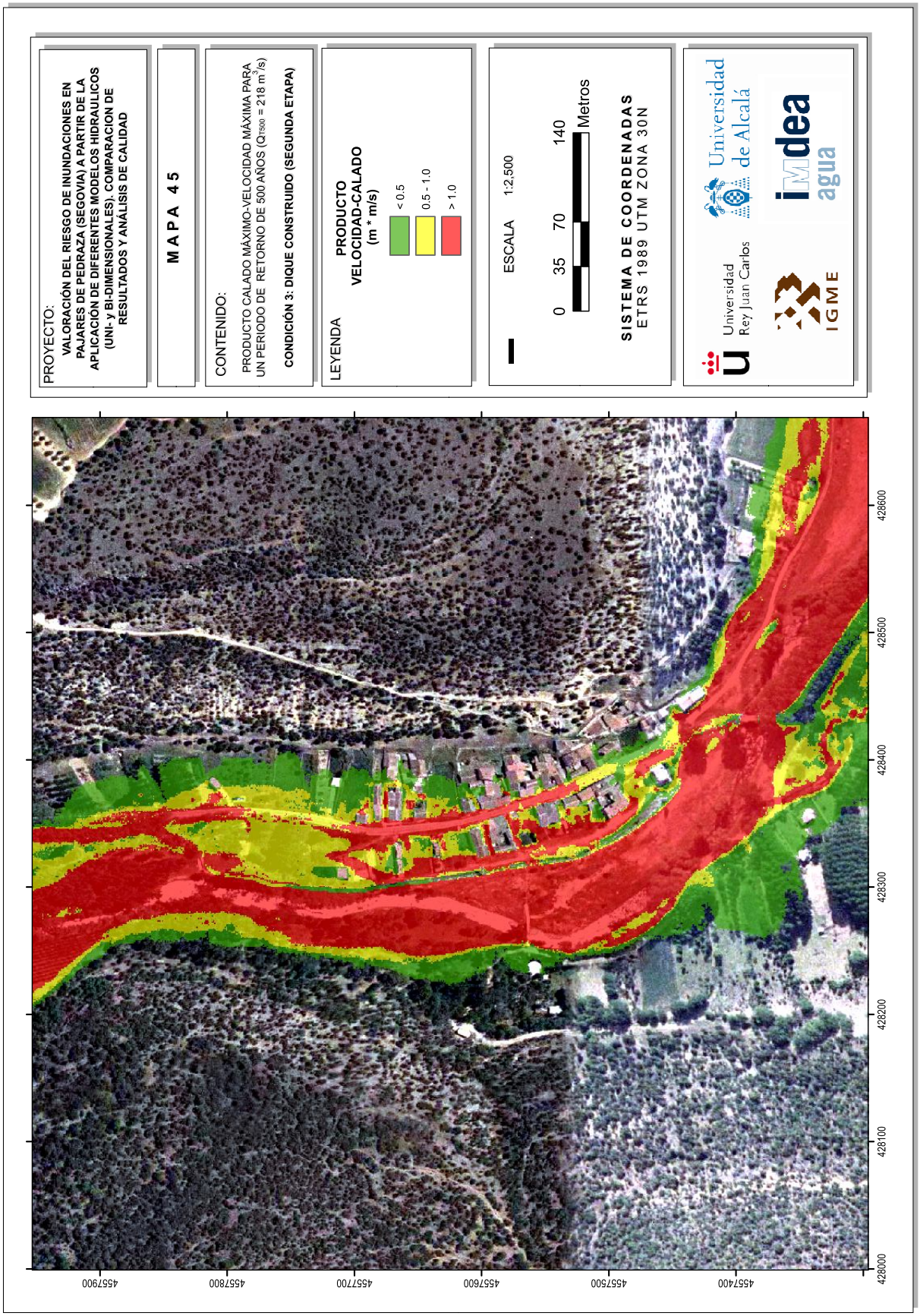

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 40
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS (QT100 = 151 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m2 * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
455900
455800
455700
455600
455500
455400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 41
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS (QT100 = 151 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

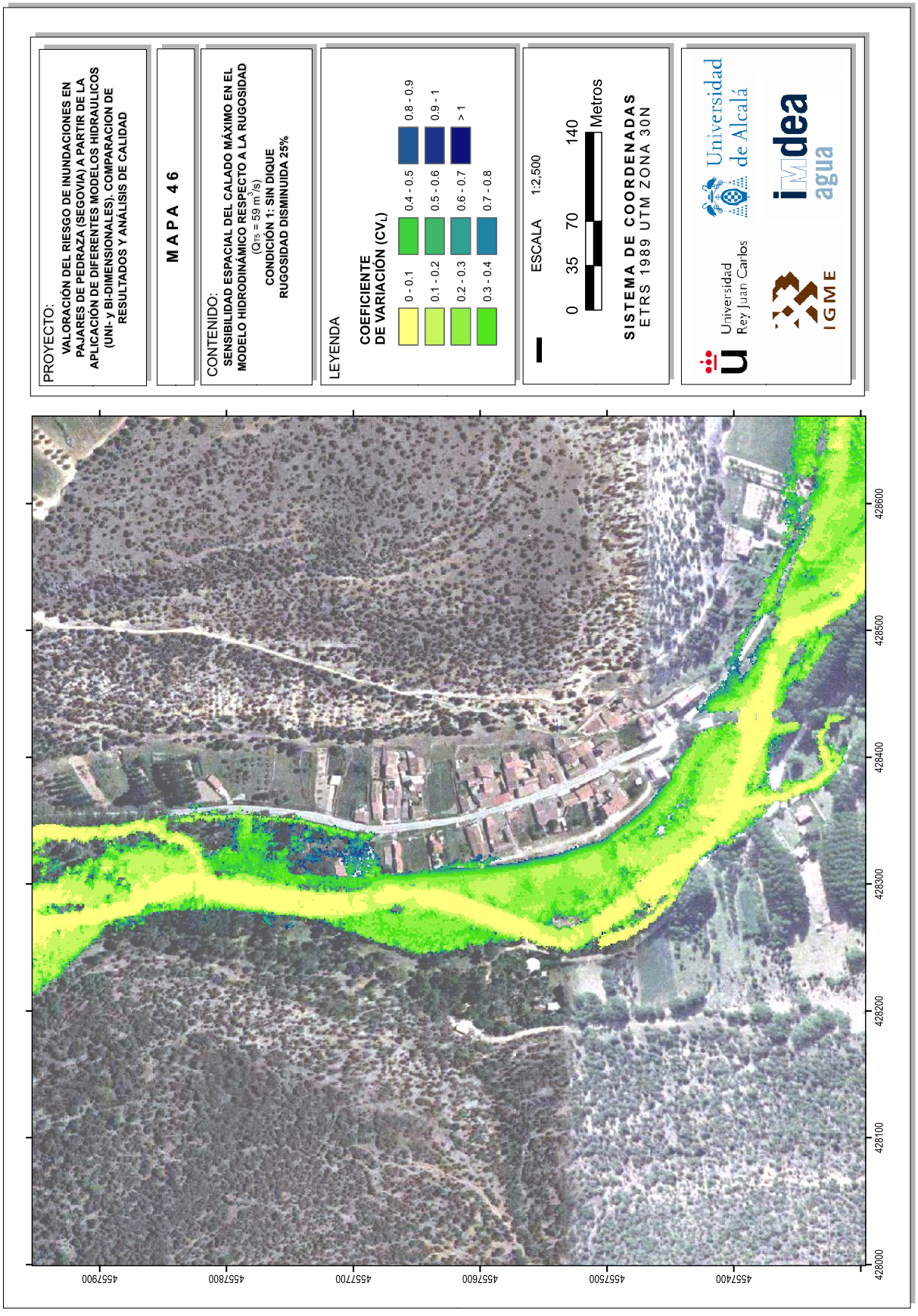

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 42
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS (Q100 = 151 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

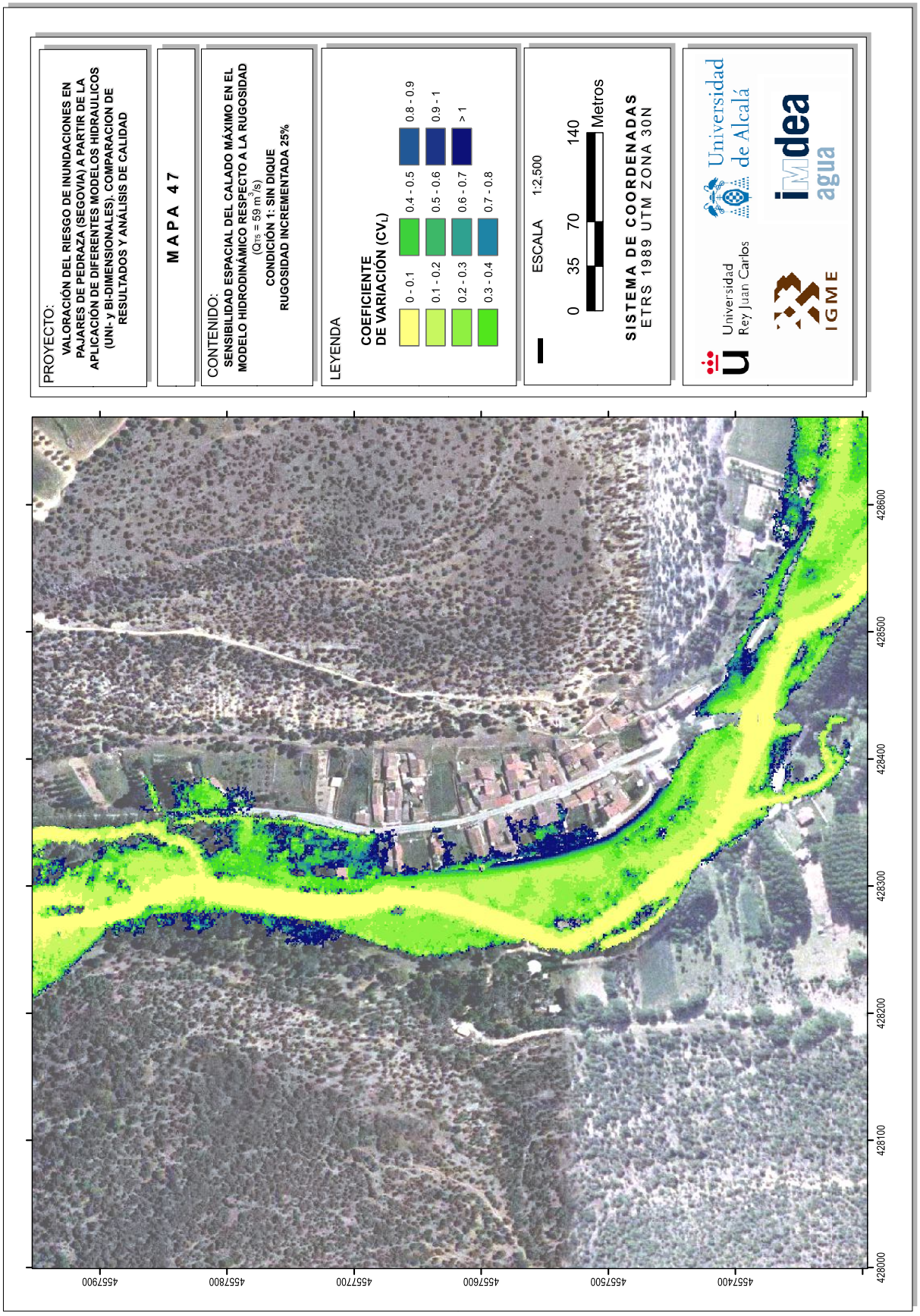

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 43
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS (Q500 = 218 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m2 * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
455900
455800
455700
455600
455500
455400

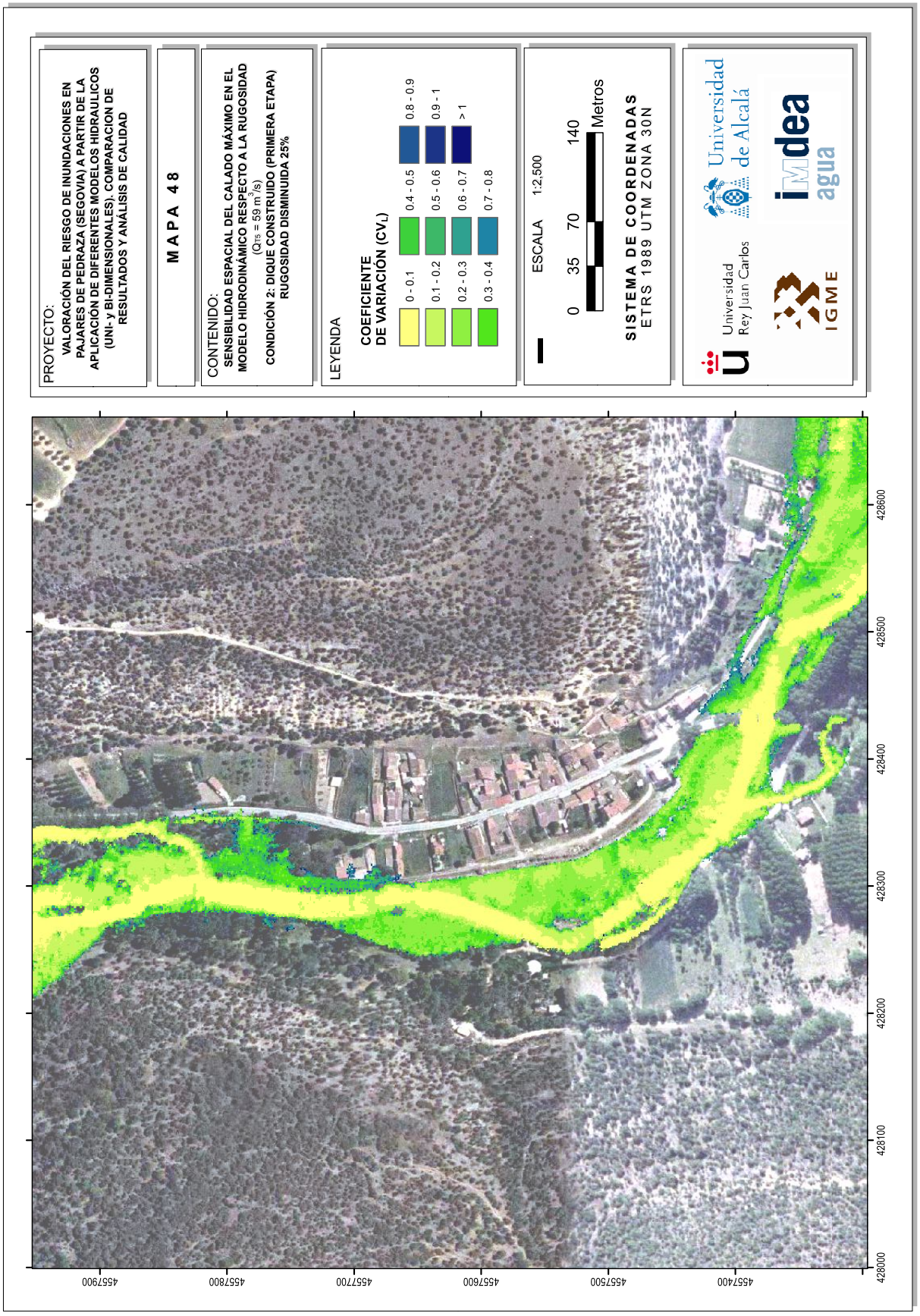

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 44
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
455900
455800
455700
455600
455500
455400

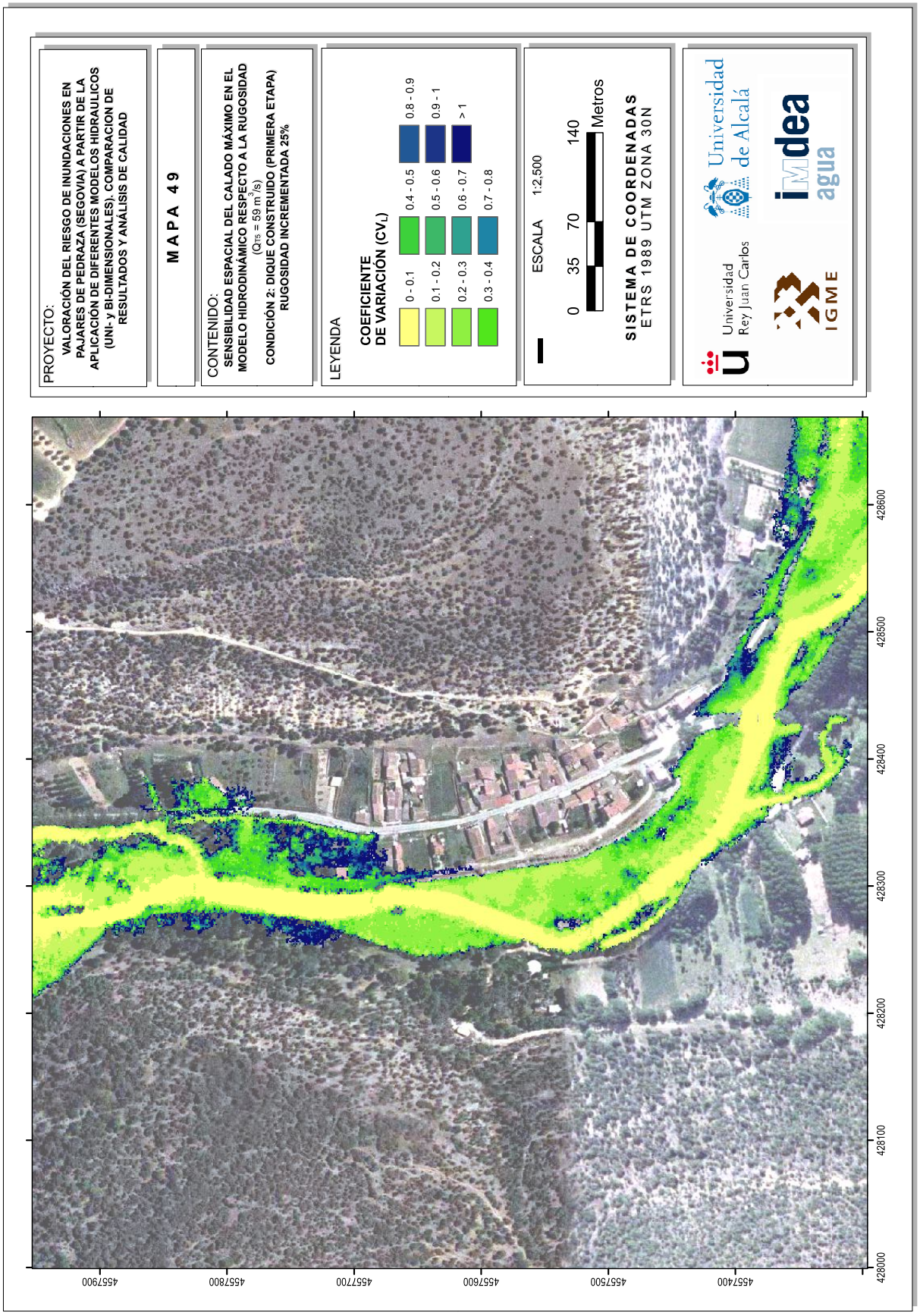

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 45
CONTENIDO:
PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS (Q500 = 218 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
PRODUCTO VELOCIDAD-CALADO (m * m/s)
< 0.5
0.5 - 1.0
> 1.0
ESCALA 1:2.500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
455900
455800
455700
455600
455500
455400

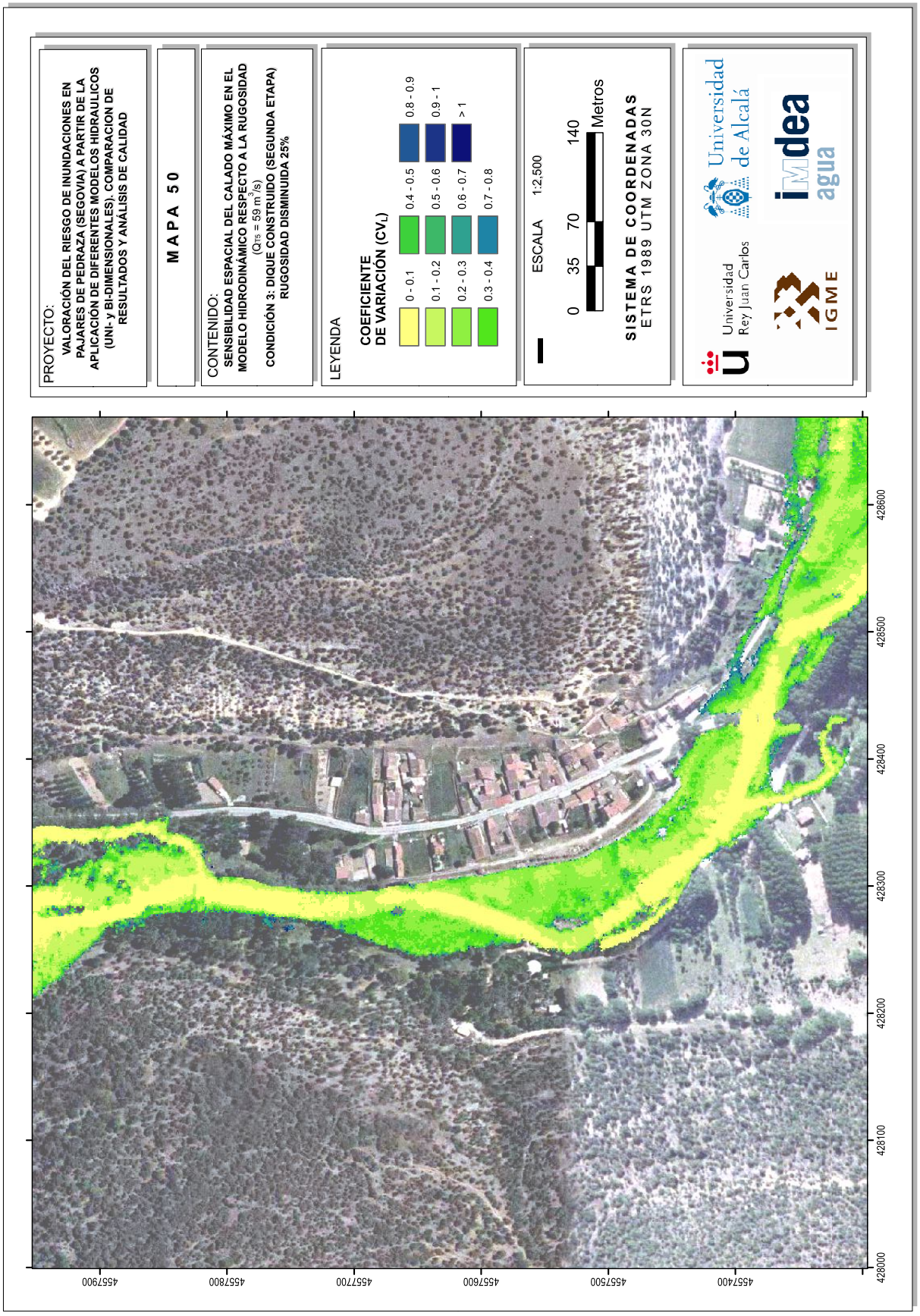
## 10.4. ANEXO 4. MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CALADO MÁXIMO, VELOCIDAD MÁXIMA Y PRODUCTO CALADO MÁXIMO-VELOCIDAD MÁXIMA, CORRESPONDIENTE AL PELIGRO DE INUNDACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS

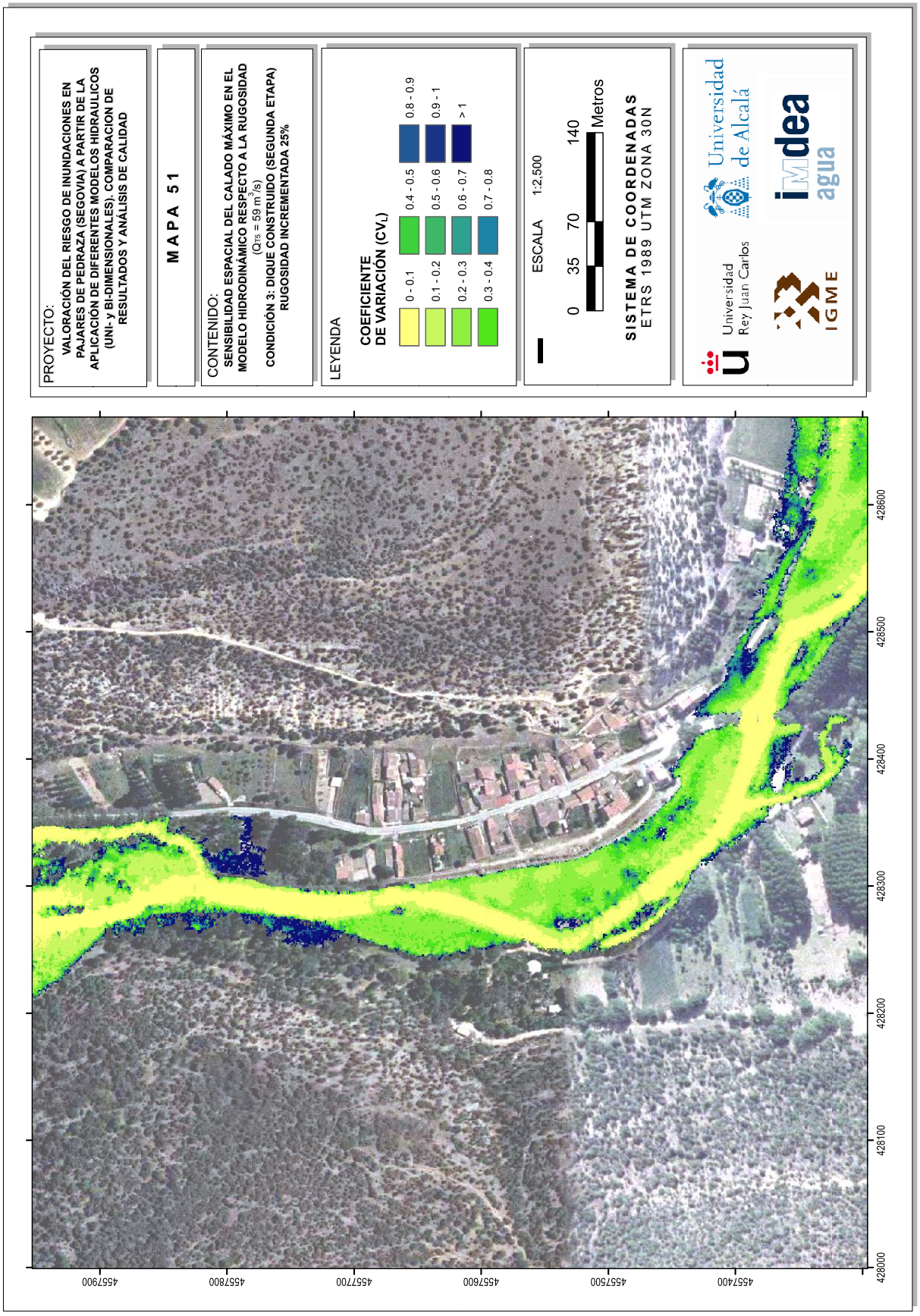


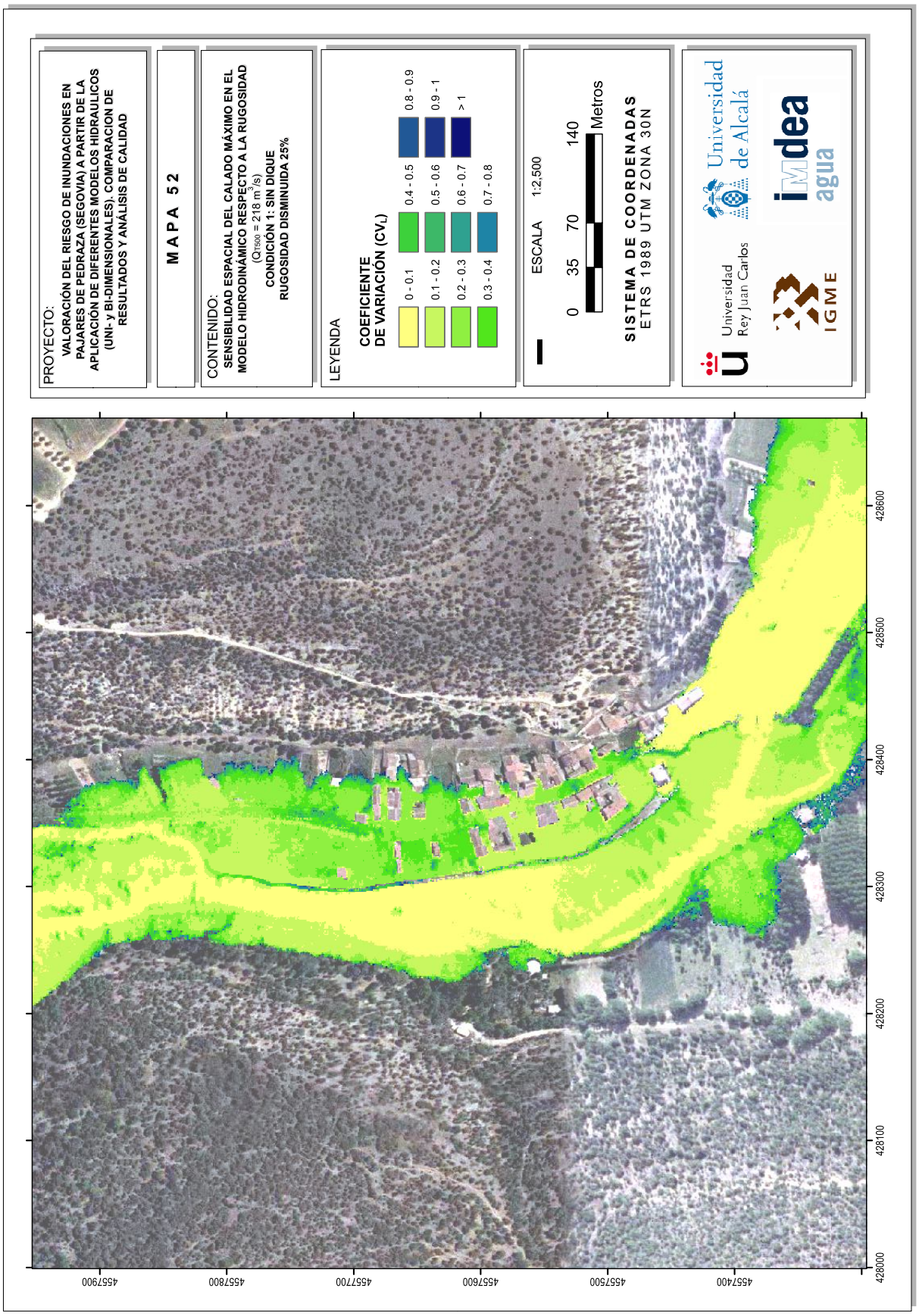

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 47
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

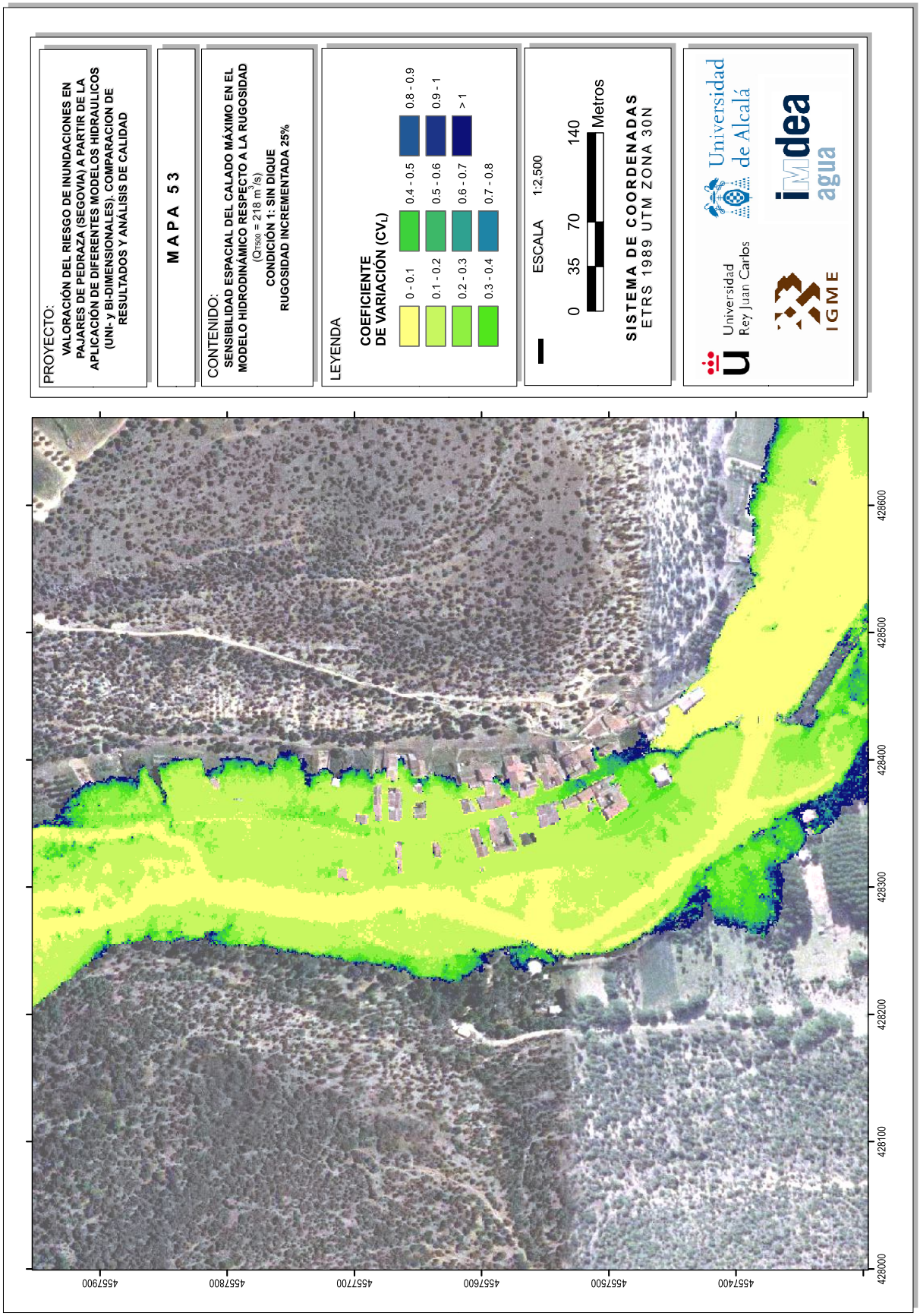

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 48
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

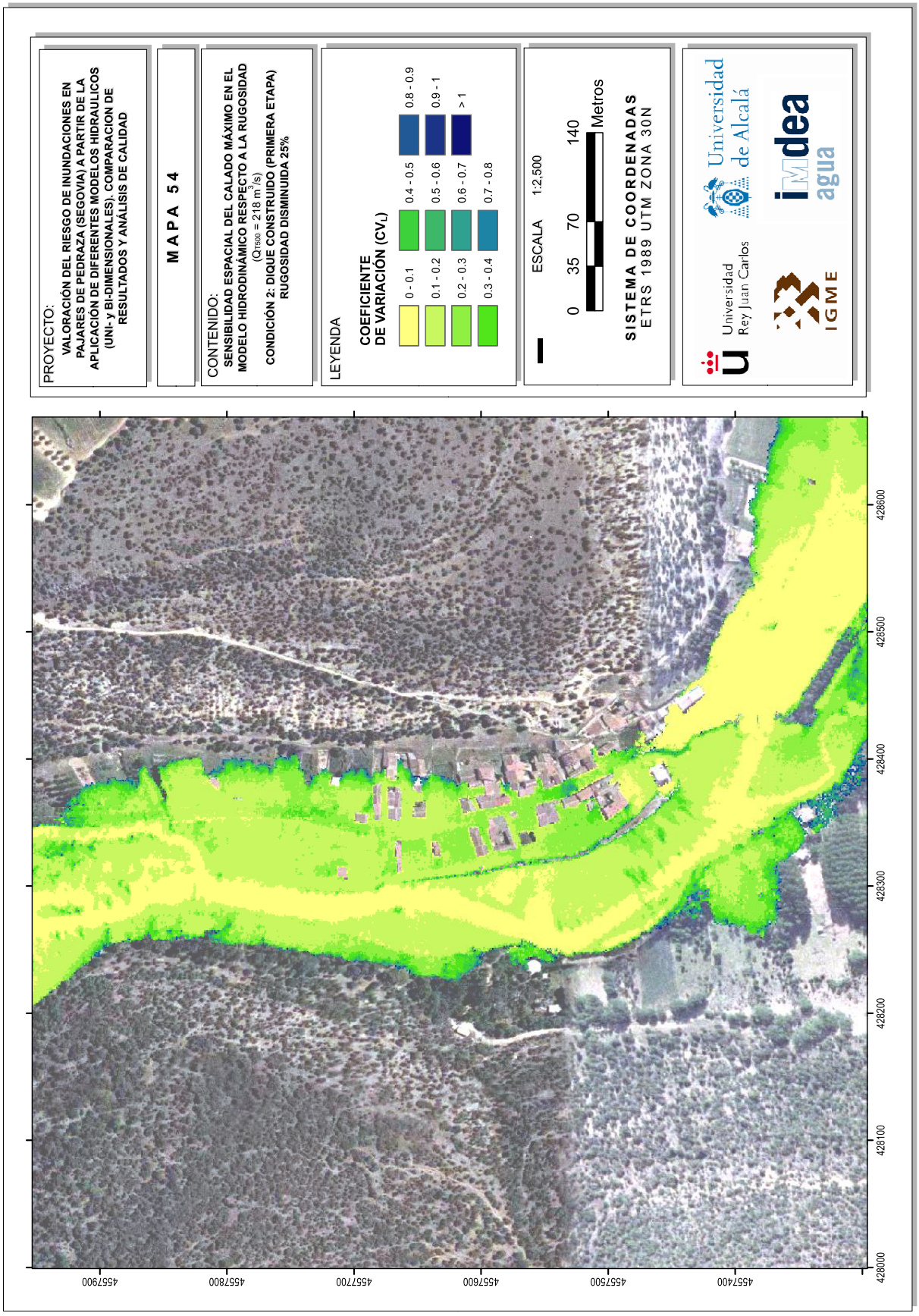

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 49
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

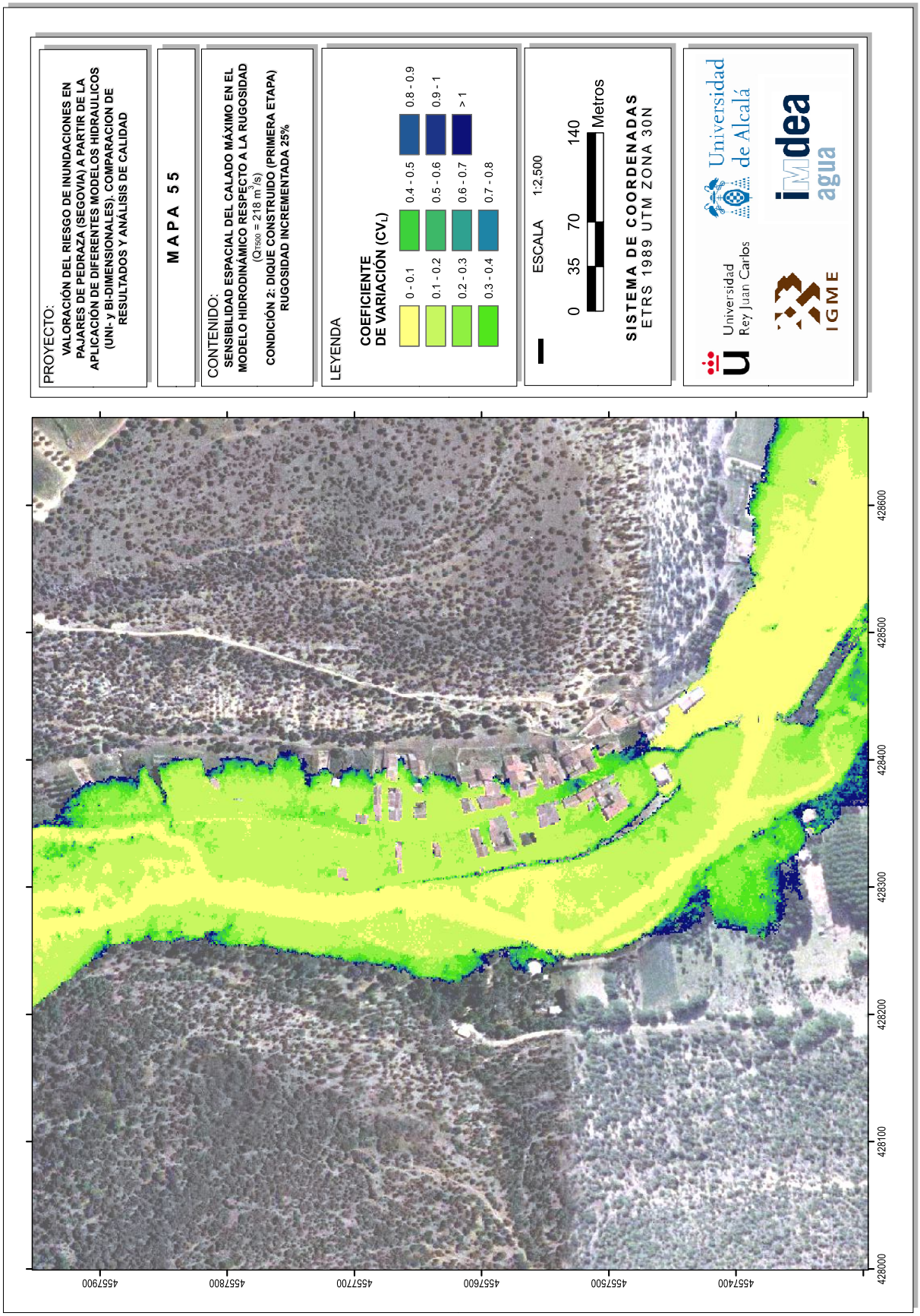

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 50
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

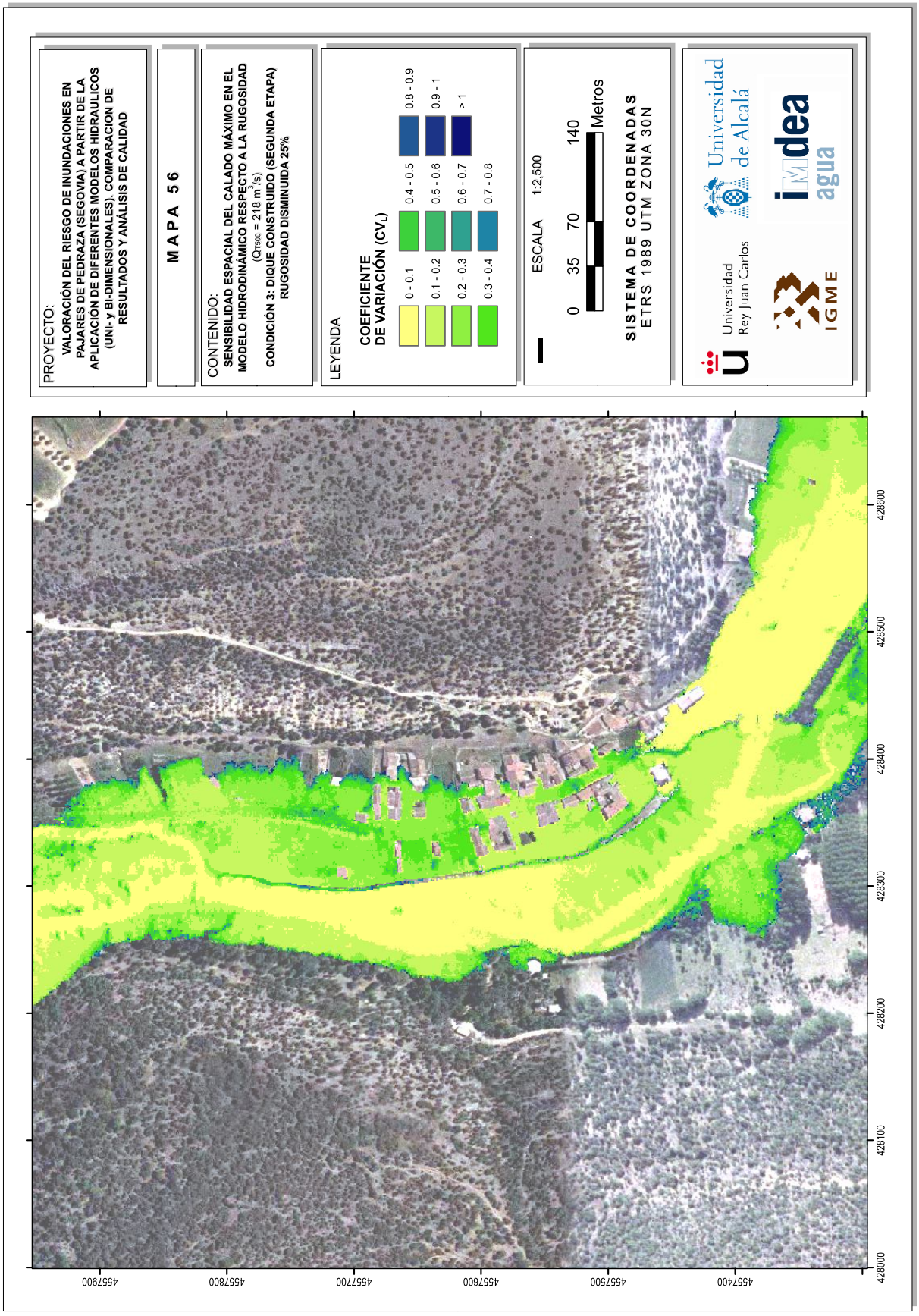

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 51
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

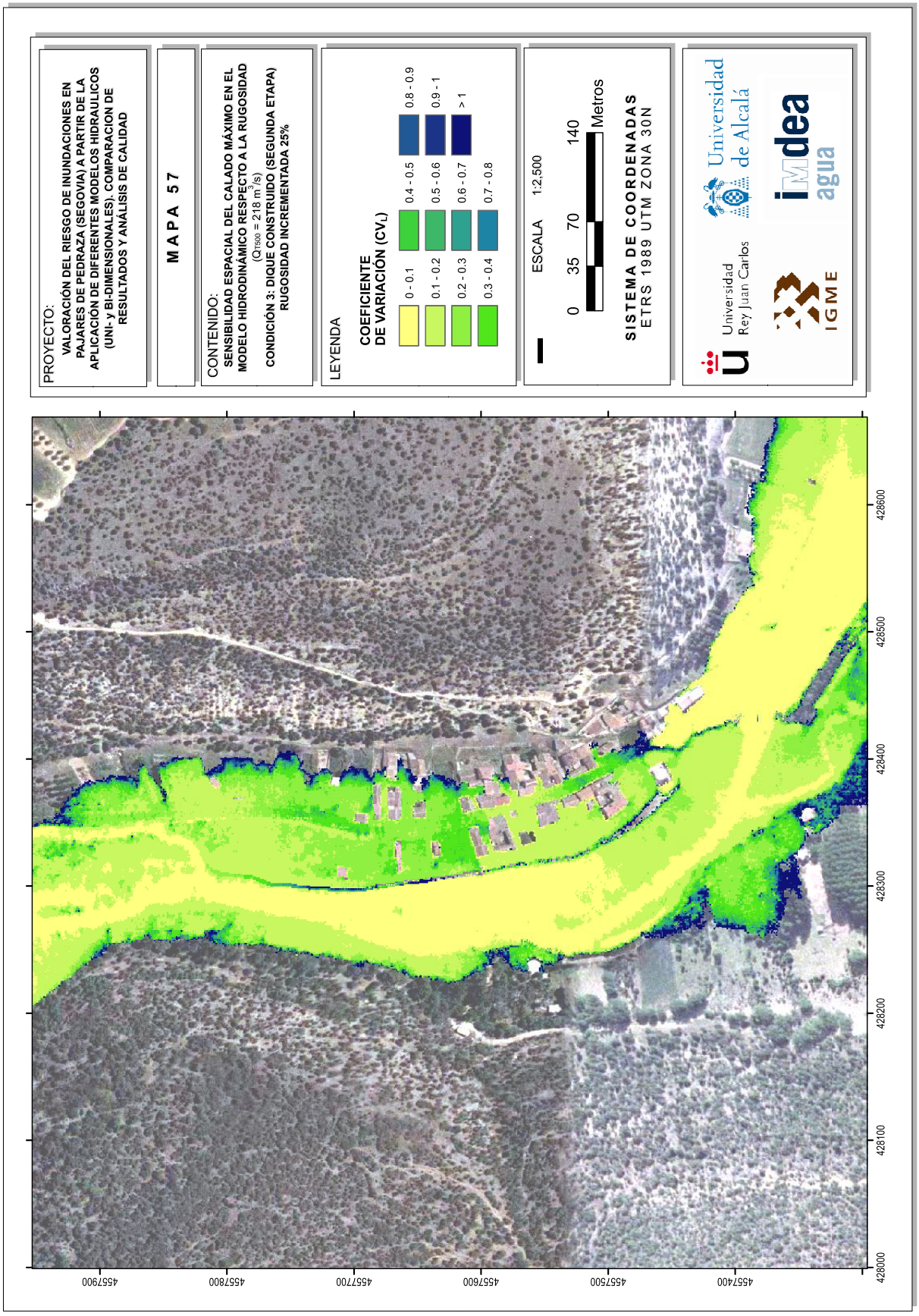

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 52
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q_T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV_L)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

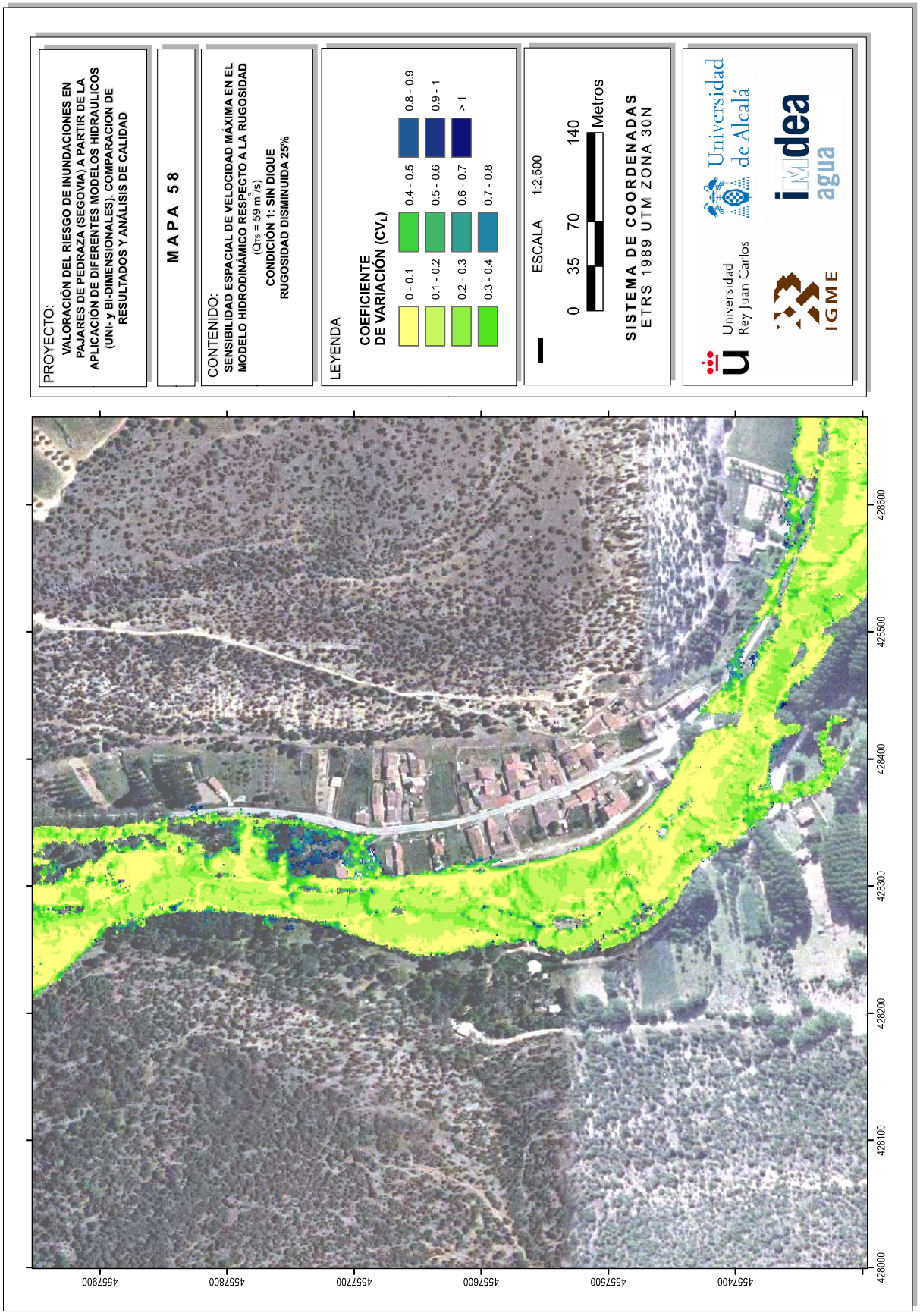

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 53
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q_T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV_L)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

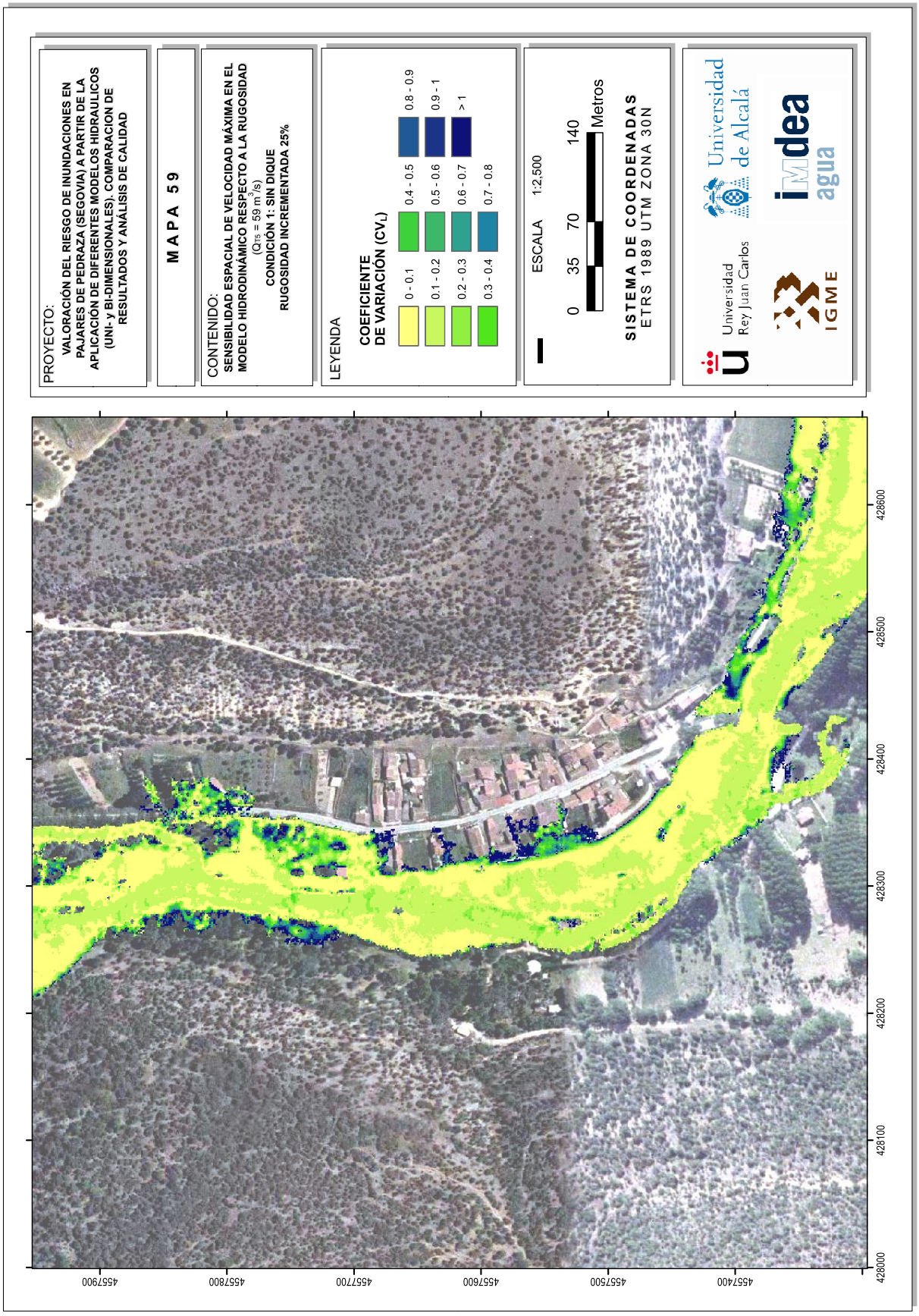

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 54
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
iMdea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

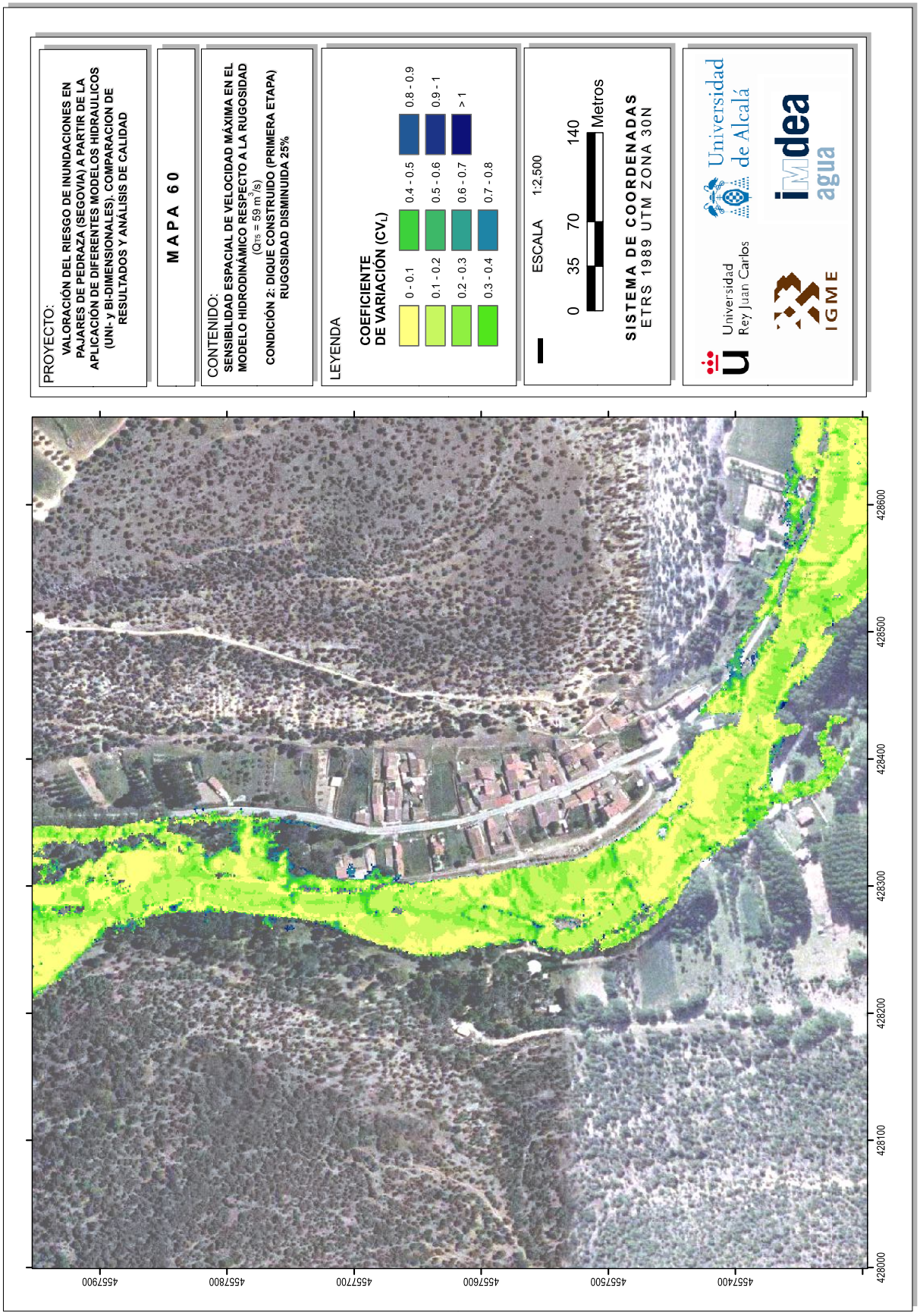

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 55
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q_T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV_L)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

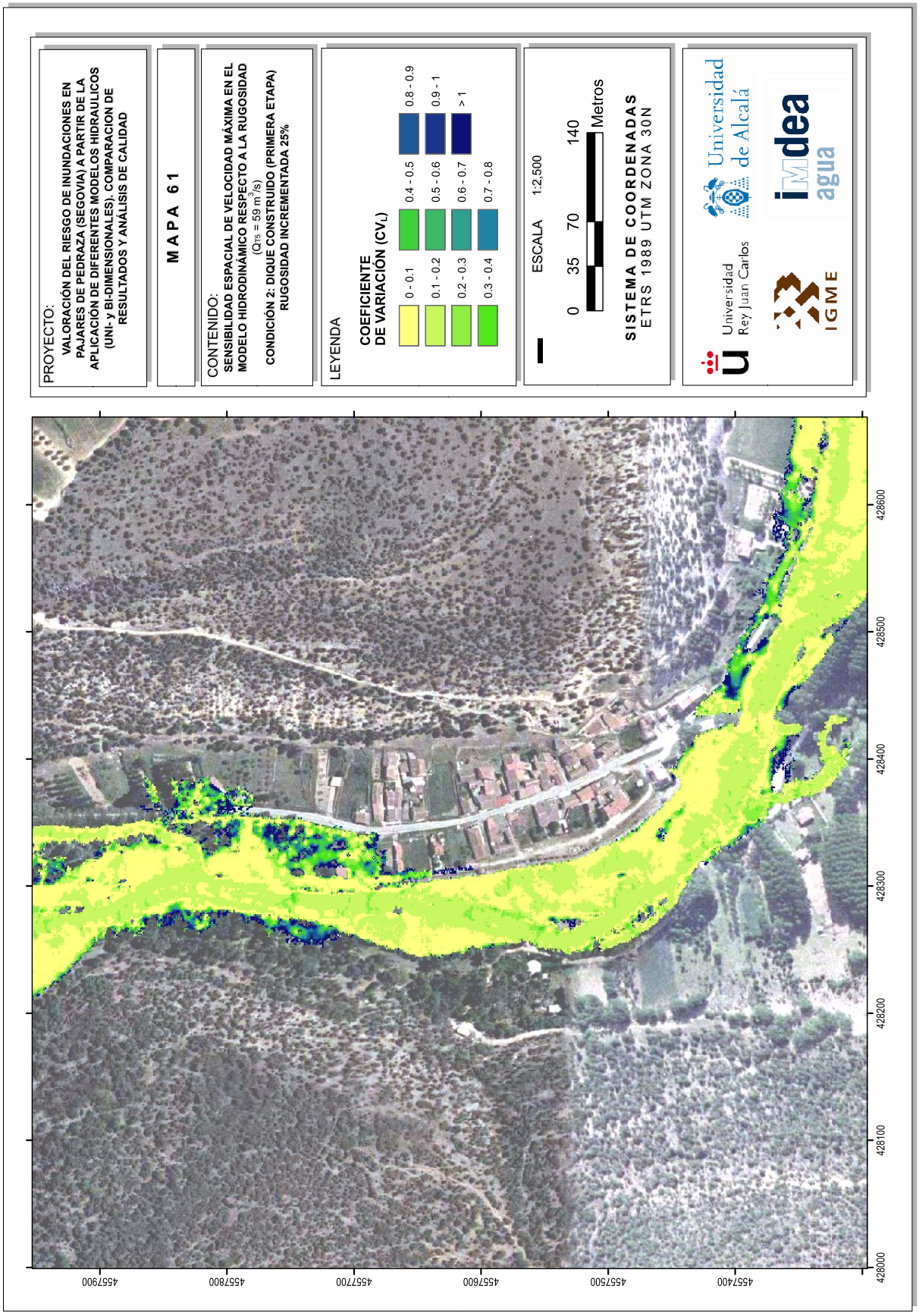

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 56
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T500}$ = 218 m³/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

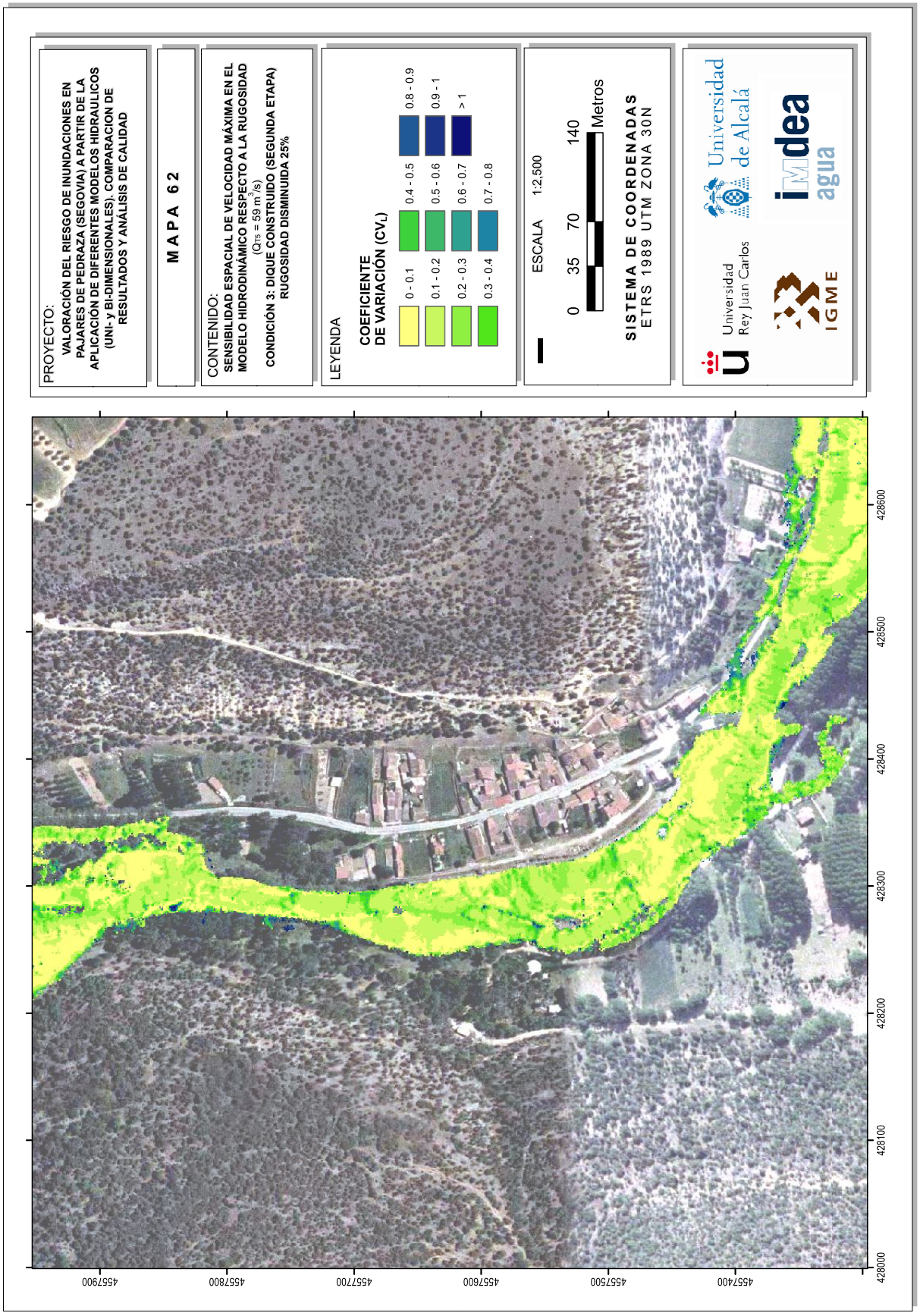

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 57
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DEL CALADO MÁXIMO EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T500}$ = 218 m³/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

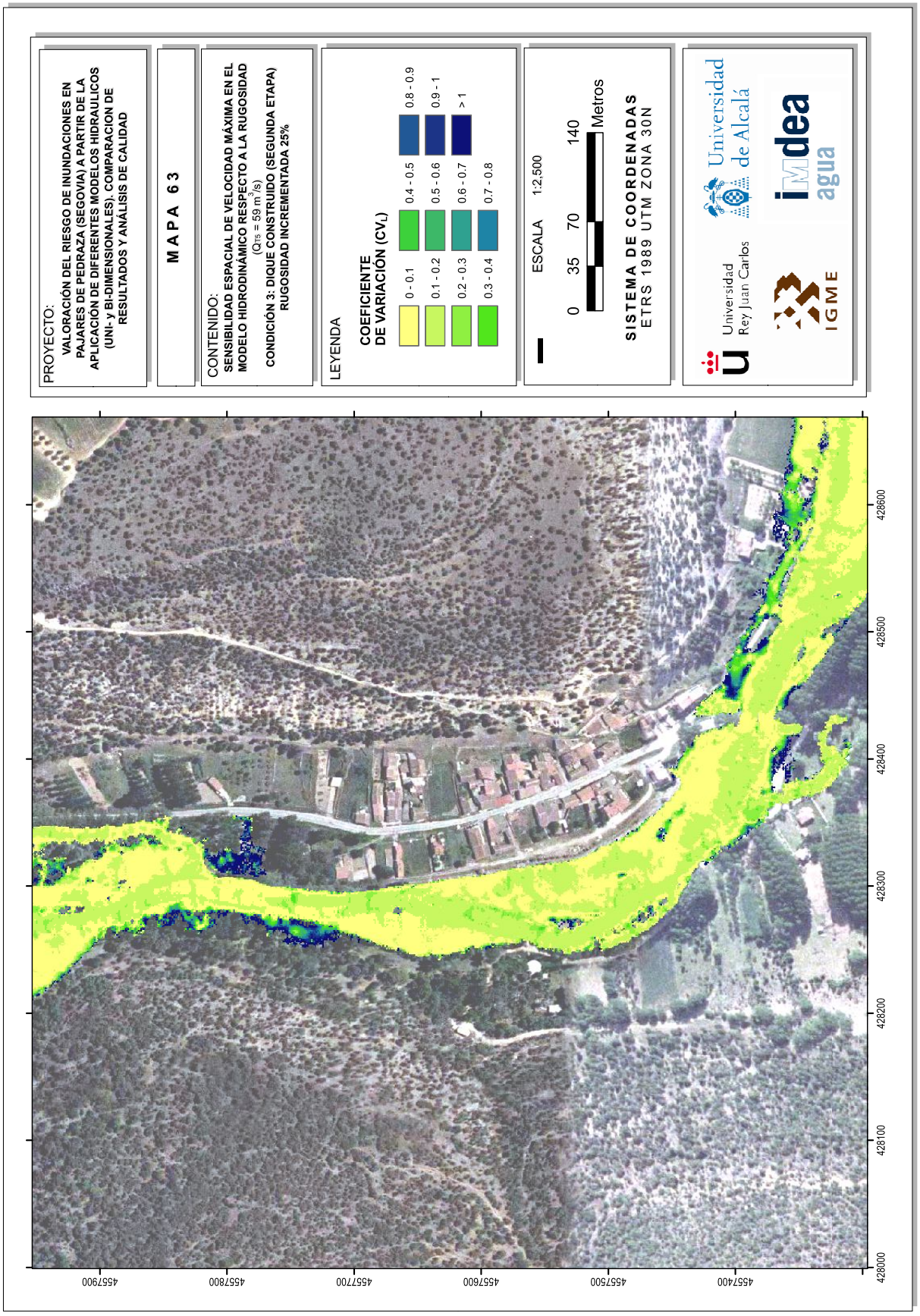

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 58
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

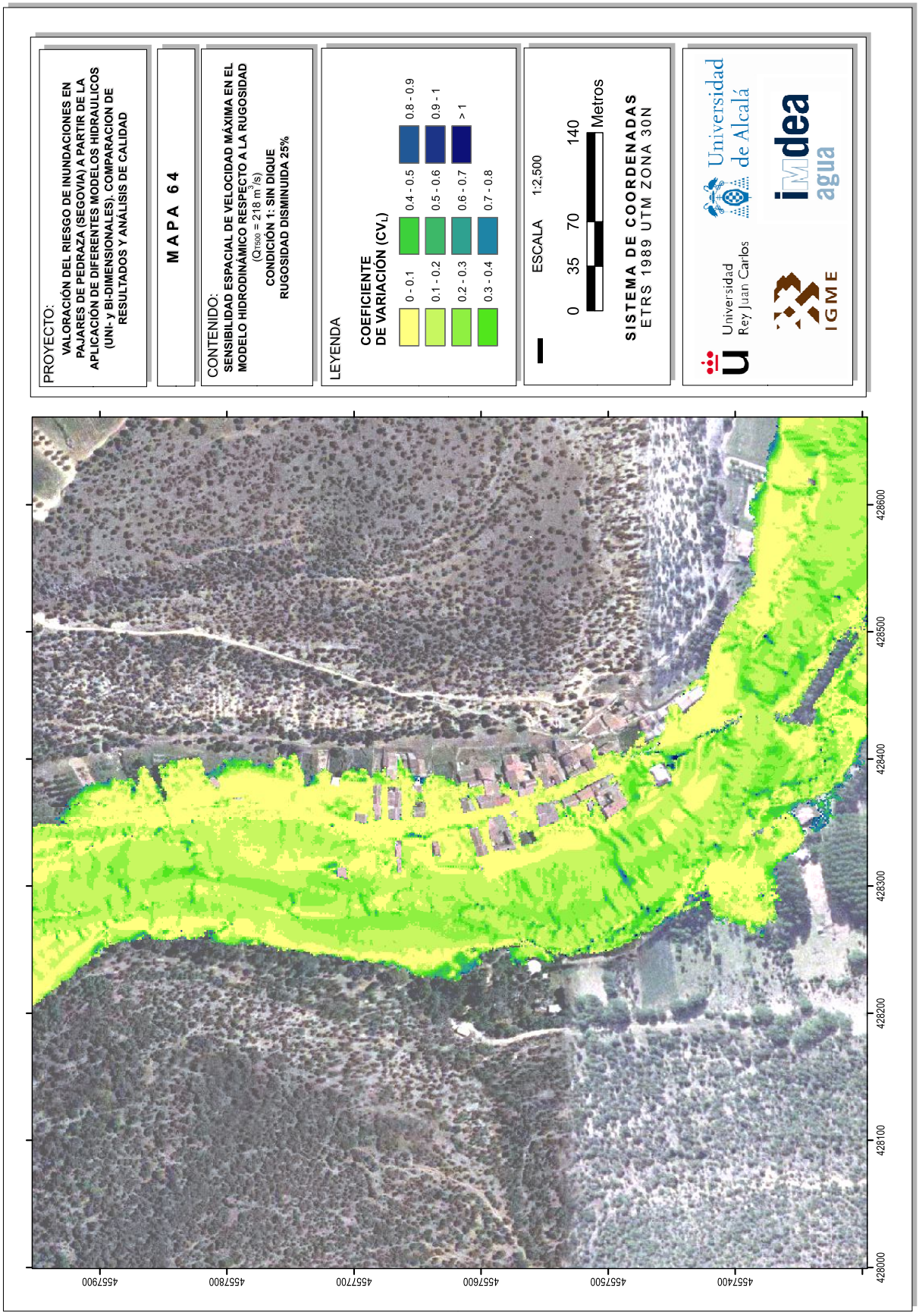

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 59
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(QTR5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

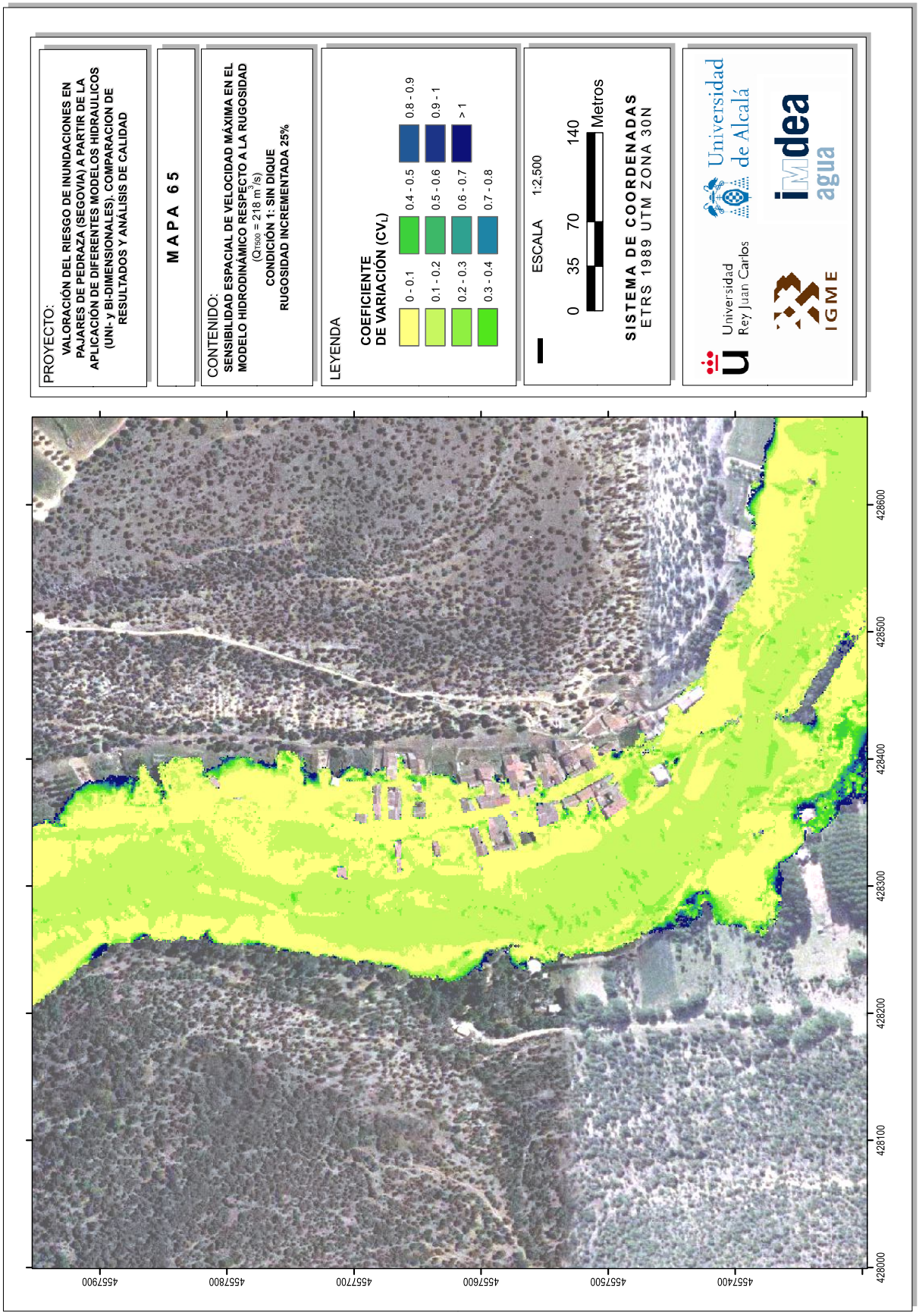

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 60
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
456900
456800
456700
456600
456500
456400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

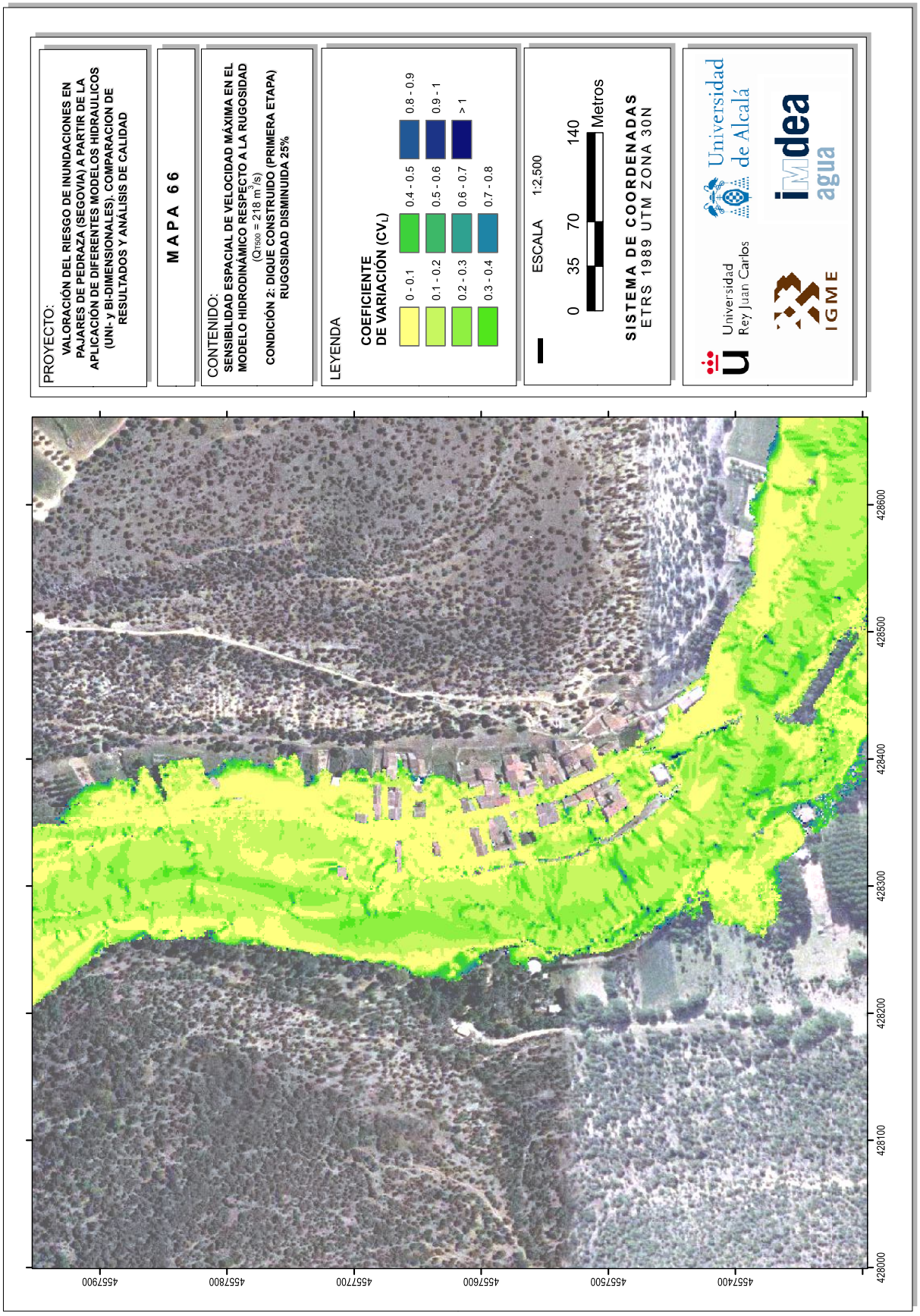

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 61
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

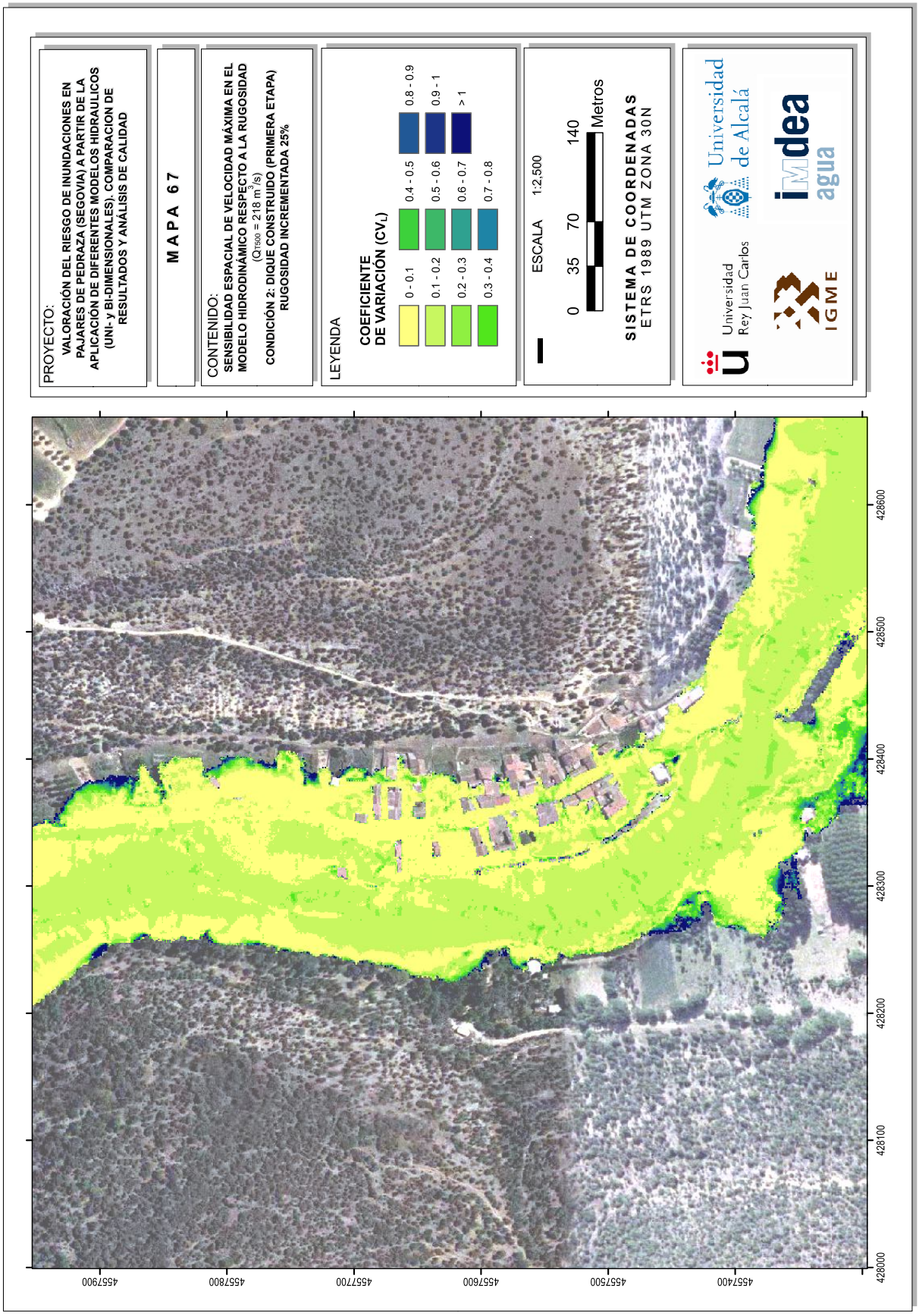

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 62
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q25 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

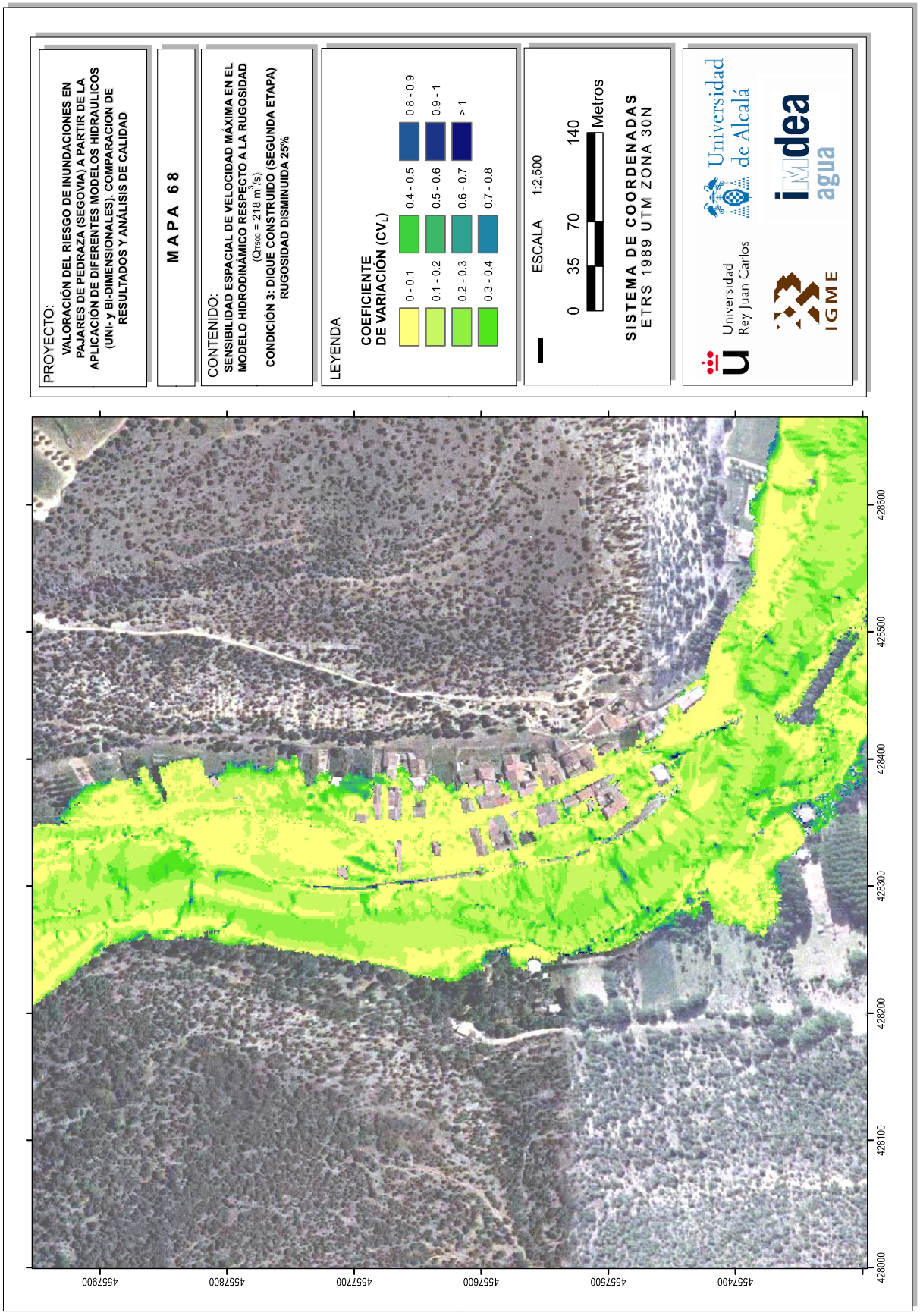

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 63
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

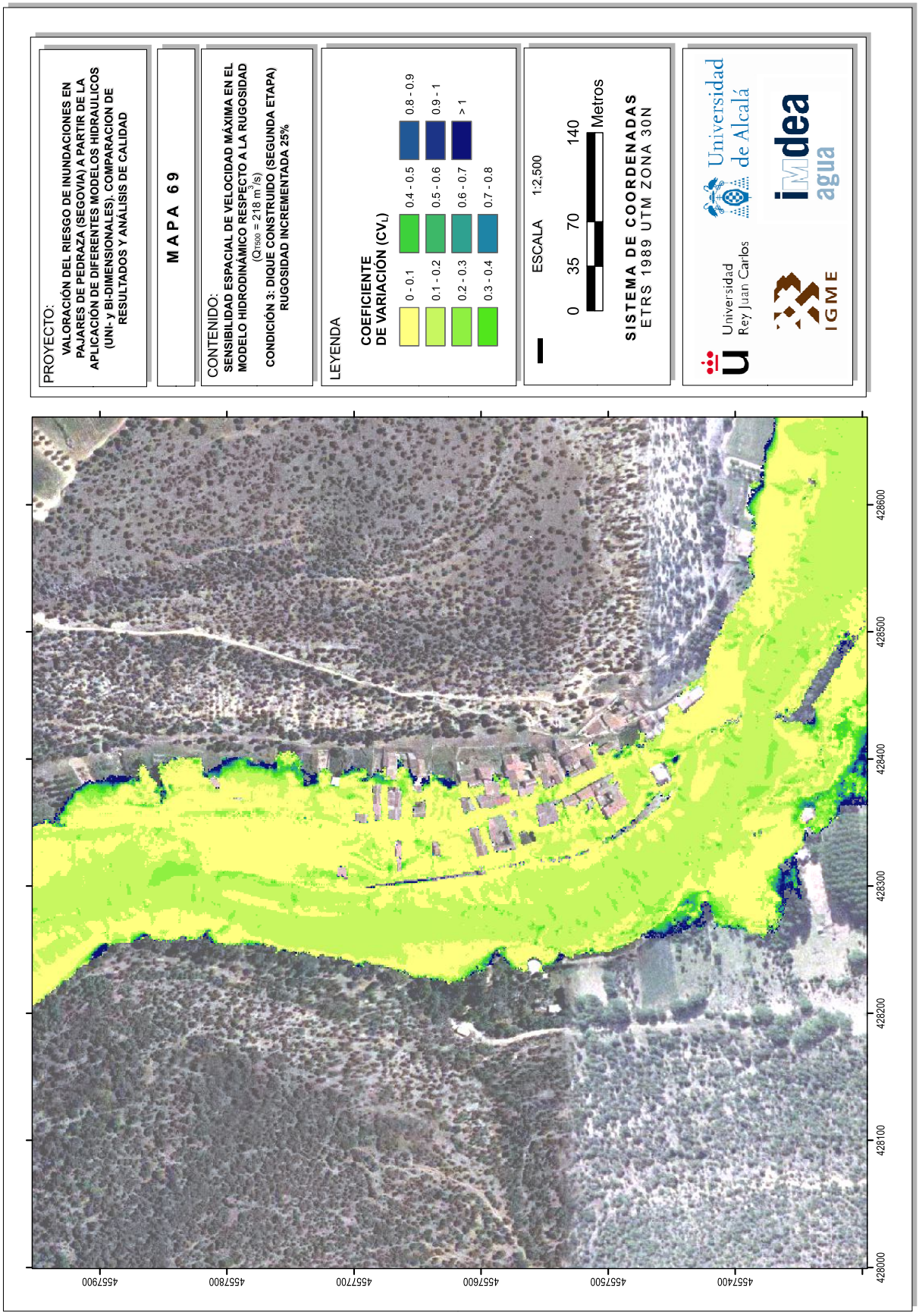

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 64
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
iMdea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 65
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 66
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q T500 = 218 m³/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 67
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
($Q_{T500}$ = 218 m³/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ($CV_L$)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 68
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q1500 = 218 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD DISMINUIDA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 69
CONTENIDO:
SENSIBILIDAD ESPACIAL DE VELOCIDAD MÁXIMA EN EL MODELO HIDRODINÁMICO RESPECTO A LA RUGOSIDAD
(Q1500 = 218 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
RUGOSIDAD INCREMENTADA 25%
LEYENDA
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CVL)
0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1
> 1
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

## 1. TABLAS INVENTARIO Y FUNCIONES CALADO DAÑO PARA ELEMENTOS EN ÁREAS DE OCUPACIÓN URBANA

***Tabla A5-1.*** *Inventario para la obtención de las funciones calado-daño para viviendas de una planta con ocupación permanente (V1P)*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| SALON | | | | | | | | | | | | | |
| | TV | 400 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | DVD/VIDEO | 200 | 0 | 0.15 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SOFA | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO | 500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | SILLAS (5x40€) | 200 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| COCINA | | | | | | | | | | | | | |
| | FRIGORIFICO | 500 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | LAVADORA | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | HORNO | 500 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | COCINA | 400 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | LAVAVAJILLAS | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (4x40E) | 160 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | PEQ. ELECTRO | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | UTIL. MENAJE | 80 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| | ARMARIOS | 250 | 0 | 0.25 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 1 | 1 |
| HABITACION | | | | | | | | | | | | | |
| | SOMIER (3x250€) | 750 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| | COLCHON (3x200€) | 600 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO (3x500€) | 1500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | MESILLAS (3x2x50€) | 300 | 0 | 0.35 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (3x2x40€) | 240 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ENSERES DOMESTICOS | | | | | | | | | | | | | |
| | COMESTIBLES | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ENSERES | 200 | 0 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| | DOCUMENTACION | 250 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| PRENDAS VESTIR Y AJUAR | | 900 | 0 | 0.25 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | | 600 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| INSTALACION ELECTRICA | | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PINTURA | | 350 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA EXTERIOR | | 400 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PUERTA INT. (6x70€) | | 420 | 0 | 0.15 | 0.3 | 0.4 | 0.75 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA GARAJE | | 600 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.25 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.65 |
| VENTANAS (6x250€) | | 1500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| ELEM. DECORA | | 100 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 2855.5 | 5554.5 | 7338 | 8782 | 10113 | 11206 | 11757 | 12069 | 12769 | 12799 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DAÑOS INDIRECTOS | 15% de pérdidas directas | | 0 | 428.33 | 833.18 | 1100.7 | 1317.3 | 1517 | 1680.8 | 1763.5 | 1810.4 | 1915.4 | 1919.9 |

***Figura A5-1.*** *Función calado-daño para viviendas de una planta con ocupación permanente (V1P).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 3283.83 |
| 40 | 6387.68 |
| 60 | 8438.70 |
| 80 | 10099.30 |
| 100 | 11629.95 |
| 120 | 12886.33 |
| 140 | 13519.98 |
| 160 | 13879.35 |
| 180 | 14684.35 |
| 200 | 14718.85 |

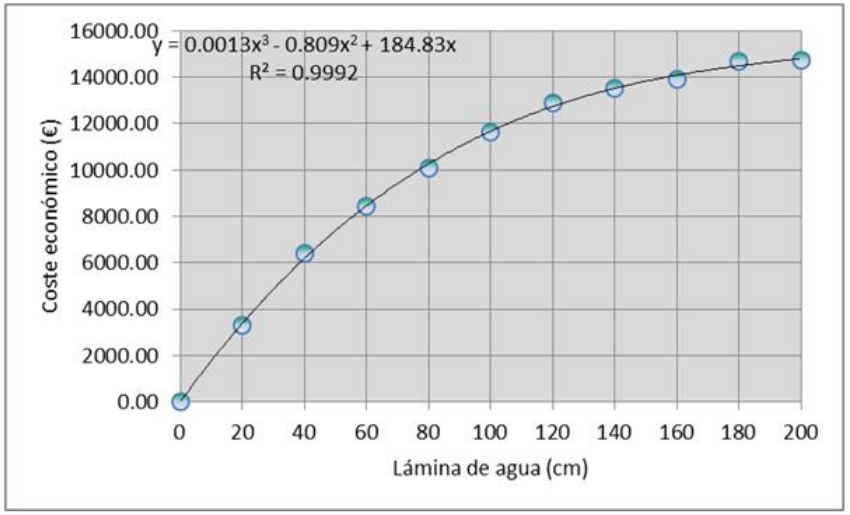



***Tabla A5-2.*** *Inventario para la obtención de las funciones calado-daño para viviendas de una planta con ocupación ocasional (V1O).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| SALON | | | | | | | | | | | | | |
| | TV | 400 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | DVD/VIDEO | 200 | 0 | 0.15 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SOFA | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO | 500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | SILLAS (5x40€) | 200 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| COCINA | | | | | | | | | | | | | |
| | FRIGORIFICO | 500 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | LAVADORA | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | COCINA | 400 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (4x40E) | 160 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | PEQ. ELECTRO | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | UTIL. MENAJE | 80 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| | ARMARIOS | 250 | 0 | 0.25 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 1 | 1 |
| HABITACION | | | | | | | | | | | | | |
| | SOMIER (3x250€) | 750 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| | COLCHON (3x200€) | 600 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO (3x500€) | 1500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | MESILLAS (3x2x50€) | 300 | 0 | 0.35 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (3x2x40€) | 240 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ENSERES DOMESTICOS | | | | | | | | | | | | | |
| | COMESTIBLES | 100 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ENSERES | 200 | 0 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| | DOCUMENTACION | 50 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| PRENDAS VESTIR Y AJUAR | | 400 | 0 | 0.25 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | | 600 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| INSTALACION ELECTRICA | | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PINTURA | | 350 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA EXTERIOR | | 400 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| PUERTA INT. (6x70€) | | 420 | 0 | 0.15 | 0.3 | 0.4 | 0.75 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA GARAJE | | 600 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.25 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.65 |
| VENTANAS (6x250€) | | 1500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| ELEM. DECORA | | 100 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 2250.5 | 4439.5 | 5838 | 7182 | 8438 | 9355.5 | 9906.5 | 10169 | 10869 | 10899 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 15% de pérdidas directas | | 0 | 337.58 | 665.93 | 875.7 | 1077.3 | 1265.7 | 1403.3 | 1486 | 1525.4 | 1630.4 | 1634.9 |

***Figura A5-2.*** *Función calado-daño para viviendas de una planta con ocupación ocasional (V1O).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 2588.08 |
| 40 | 5105.43 |
| 60 | 6713.70 |
| 80 | 8259.30 |
| 100 | 9703.70 |
| 120 | 10758.83 |
| 140 | 11392.48 |
| 160 | 11694.35 |
| 180 | 12499.35 |
| 200 | 12533.85 |

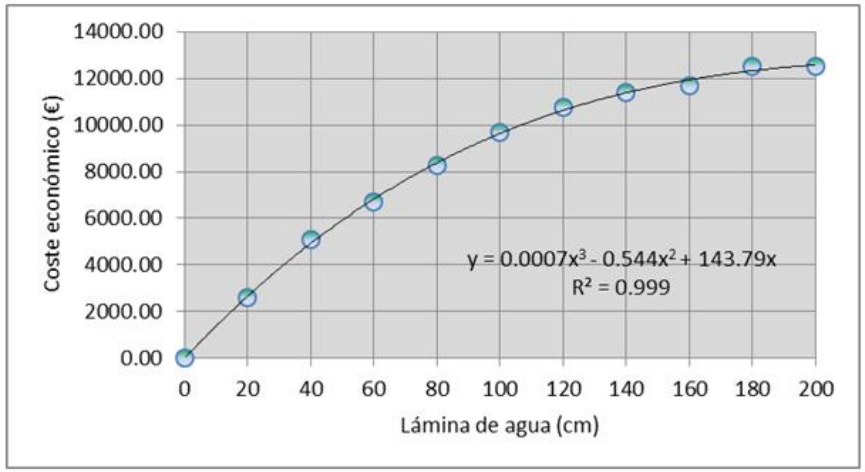


***Tabla A5-3.*** *Inventario para la obtención de las funciones calado-daño para viviendas de dos plantas con ocupación permanente (V2P).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| SALON | | | | | | | | | | | | | |
| | TV | 400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.25 |
| | DVD/VIDEO | 200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.25 |
| | SOFA | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO | 500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | SILLAS (5x40€) | 200 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| COCINA | | | | | | | | | | | | | |
| | FRIGORIFICO | 500 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | LAVADORA | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | HORNO | 500 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | COCINA | 400 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | LAVAVAJILLAS | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (4x40E) | 160 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | PEQ. ELECTRO | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | UTIL. MENAJE | 80 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| | ARMARIOS | 250 | 0 | 0.25 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 1 | 1 |
| HABITACION | | | | | | | | | | | | | |
| | SOMIER | 250 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| | COLCHON | 200 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO | 500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | MESILLAS (2x50€) | 100 | 0 | 0.35 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| | SILLAS (2x40€) | 80 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ENSERES DOMESTICOS | | | | | | | | | | | | | |
| | COMESTIBLES | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ENSERES | 200 | 0 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| | DOCUMENTACION | 250 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| PRENDAS VESTIR Y AJUAR | | 900 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.15 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | | 600 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| INSTALACION ELECTRICA | | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PINTURA | | 350 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA EXTERIOR | | 400 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PUERTA INT. (4x70€) | | 280 | 0 | 0.15 | 0.3 | 0.4 | 0.75 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA GARAJE | | 600 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.25 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.65 |
| VENTANAS (4x250€) | | 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| ELEM. DECORA | | 100 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 2293.5 | 4179.5 | 5462.5 | 6211 | 7150 | 7787.5 | 8156.5 | 8524 | 9164 | 9194 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DAÑOS INDIRECTOS | 15% de pérdidas directas | | 0 | 344.03 | 626.93 | 819.38 | 931.65 | 1072.5 | 1168.1 | 1223.5 | 1278.6 | 1374.6 | 1379.1 |

***Figura A5-3**. Función calado-daño para viviendas de dos plantas con ocupación permanente (V2P).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 20 | 2637.525 |
| 40 | 4806.425 |
| 60 | 6281.875 |
| 80 | 7142.65 |
| 100 | 8222.5 |
| 120 | 8955.625 |
| 140 | 9379.975 |
| 160 | 9802.6 |
| 180 | 10538.6 |
| 200 | 10573.1 |

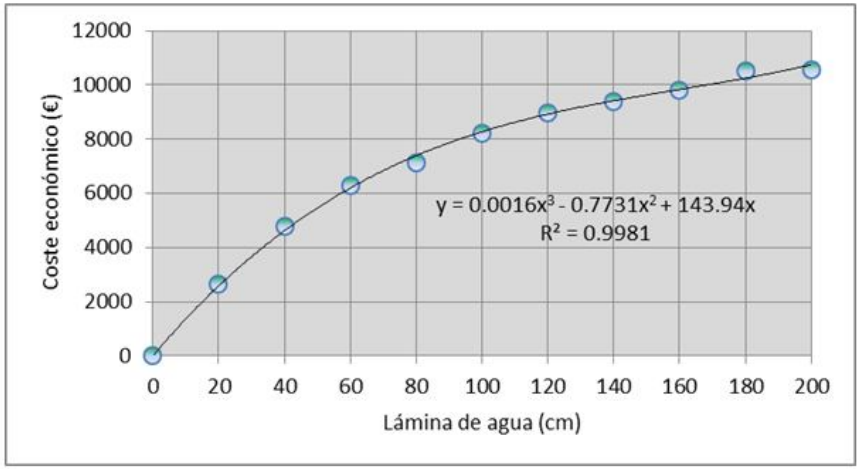



***Tabla A5-4.** Tabla inventario para la obtención de las funciones calado-daño para viviendas de dos plantas con ocupación ocasional (V2O)*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| SALON | | | | | | | | | | | | | |
| | TV | 400 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | DVD/VIDEO | 200 | 0 | 0.15 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SOFA | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO | 500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | SILLAS (5x40€) | 200 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| COCINA | | | | | | | | | | | | | |

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| | FRIGORIFICO | 500 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | LAVADORA | 400 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | COCINA | 400 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | MESA | 150 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (4x40E) | 160 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | PEQ. ELECTRO | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | UTIL. MENAJE | 80 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| | ARMARIOS | 250 | 0 | 0.25 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 1 | 1 |
| HABITACION | | | | | | | | | | | | | |
| | SOMIER | 250 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| | COLCHON | 200 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ARMARIO | 500 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.9 | 1 | 1 |
| | MESILLAS (2x50€) | 100 | 0 | 0.35 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | SILLAS (2x40€) | 80 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.85 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ENSERES DOMESTICOS | | | | | | | | | | | | | |
| | COMESTIBLES | 100 | 0 | 0.4 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | ENSERES | 200 | 0 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| | DOCUMENTACION | 50 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 |
| PRENDAS VESTIR Y AJUAR | | 900 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.15 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | | 600 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| INSTALACION ELECTRICA | | 400 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PINTURA | | 350 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA EXTERIOR | | 400 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| PUERTA INT. (4x70€) | | 280 | 0 | 0.15 | 0.3 | 0.4 | 0.75 | 0.9 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA GARAJE | | 600 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.25 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.65 |

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| VENTANAS (4x250€) | | 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| ELEM. DECORA | | 100 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 1843.5 | 3549.5 | 4635 | 5636 | 6575 | 7162.5 | 7531.5 | 7789 | 8339 | 8369 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 15% de pérdidas directas | | 0 | 276.53 | 532.43 | 695.25 | 845.4 | 986.25 | 1074.4 | 1129.7 | 1168.4 | 1250.9 | 1255.4 |

***Figura A5-4.*** *Función calado-daño para viviendas de dos plantas con ocupación ocasional (V2O)*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 2120.03 |
| 40 | 4081.93 |
| 60 | 5330.25 |
| 80 | 6481.40 |
| 100 | 7561.25 |
| 120 | 8236.88 |
| 140 | 8661.23 |
| 160 | 8957.35 |
| 180 | 9589.85 |
| 200 | 9624.35 |

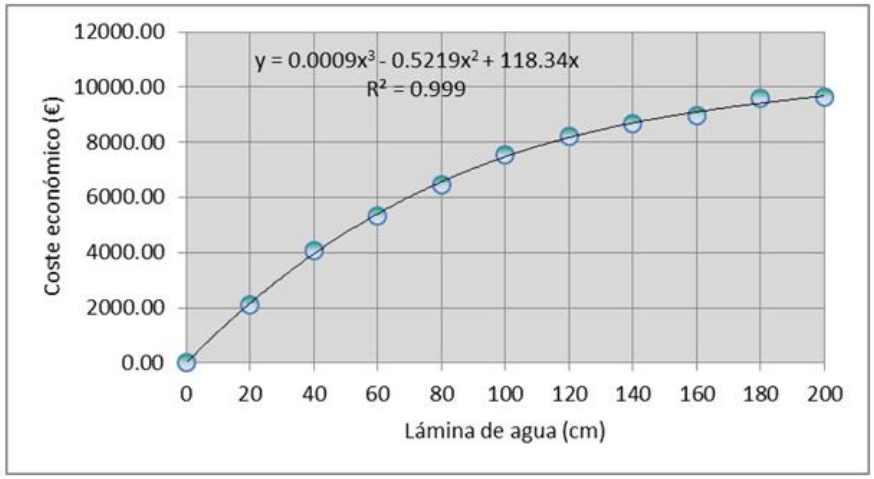


***Tabla A5-5.*** *Inventario para la obtención de las funciones calado-daño para edificios singulares: iglesia (ES_I).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| IGLESIA | | | | | | | | | | | | | |
| | BANCOS (20x250€) | 5000 | 0 | 0.15 | 0.4 | 0.6 | 0.75 | 0.85 | 0.95 | 0.95 | 1 | 1 | 1 |
| | ORNAMENTOS | 2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.5 | 0.75 |
| | ALTAR | 3000 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | PINTURA | 2000 | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | 0.35 | 0.4 | 0.5 | 0.65 | 0.75 |
| | INSTALACION ELECTRICA | 350 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 | 0.9 | 0.9 |
| | PUERTA EXTERIOR | 850 | 0 | 0.1 | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| | CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | 1000 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 1972.5 | 4302.5 | 6437.5 | 7672.5 | 9400 | 10285 | 10623 | 11373 | 12253 | 12953 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 20% de pérdidas directas | | 0 | 394.5 | 860.5 | 1287.5 | 1534.5 | 1880 | 2057 | 2124.5 | 2274.5 | 2450.5 | 2590.5 |

***Figura A5-5.*** *Funciones calado-daño para edificios singulares: iglesia (ES_I).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 2367.00 |
| 40 | 5163.00 |
| 60 | 7725.00 |
| 80 | 9207.00 |
| 100 | 11280.00 |
| 120 | 12342.00 |
| 140 | 12747.00 |
| 160 | 13647.00 |
| 180 | 14703.00 |
| 200 | 15543.00 |

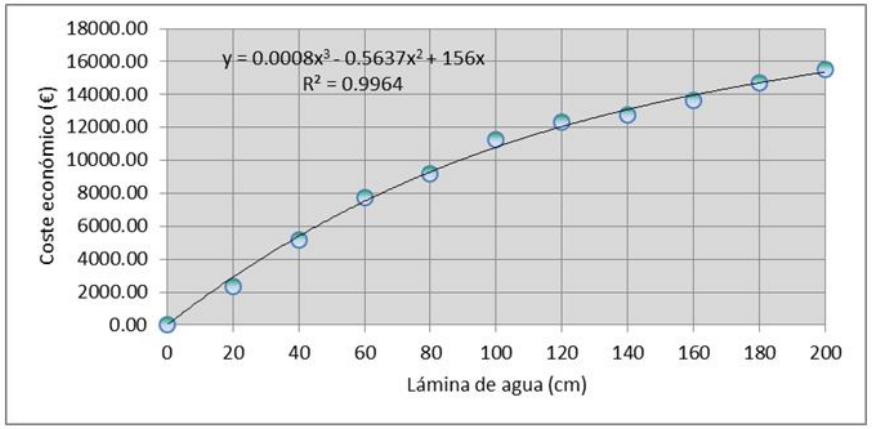
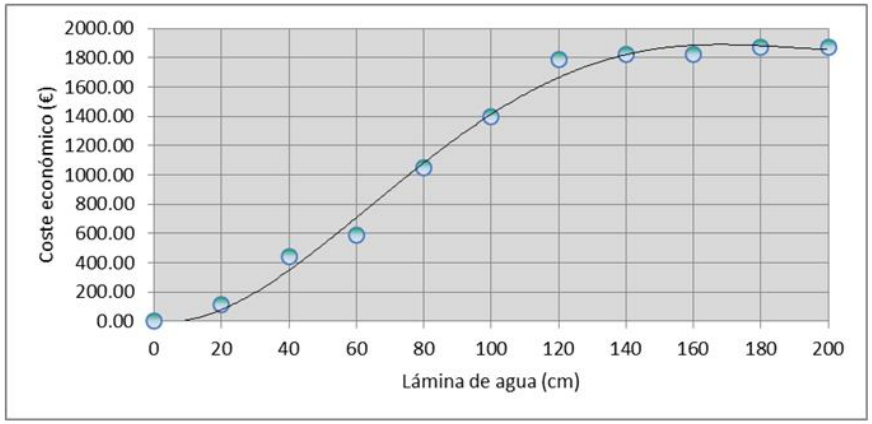


***Tabla A5-6.*** *Inventario para la obtención de las funciones calado-daño para edificios singulares: casas de labranza (ES_L).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| CASETAS | | | | | | | | | | | | | |
| | MAQUINARIA AGRICOLA | 1000 | 0 | 0 | 0.15 | 0.25 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| | PUERTA EXTERIOR | 250 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | 0.35 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.75 | 0.75 |
| | CARPINT. Y ALBAÑ. MENOR | 600 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 85 | 325 | 437.5 | 775 | 1037.5 | 1325 | 1350 | 1350 | 1387.5 | 1387.5 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| DAÑOS INDIRECTOS | 35% de pérdidas directas | | 0 | 29.75 | 113.75 | 153.13 | 271.25 | 363.13 | 463.75 | 472.5 | 472.5 | 485.63 | 485.63 |

***Figura A5-6.*** *Función calado-daño para edificios singulares: casas de labranza (ES_L).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 114.75 |
| 40 | 438.75 |
| 60 | 590.63 |
| 80 | 1046.25 |
| 100 | 1400.63 |
| 120 | 1788.75 |
| 140 | 1822.50 |
| 160 | 1822.50 |
| 180 | 1873.13 |
| 200 | 1873.13 |



## 2. FUNCIONES CALADO DAÑO PARA ELEMENTOS EN ÁREAS DE OCUPACIÓN RÚSTICA

***Tabla A5-7.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño para cultivos de secano (SEC)*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| RUSTICO AGRICOLA | | | | | | | | | | | | | |
| | SECANO ($m^2$) | 1 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 10% de pérdidas directas | | 0 | 0.025 | 0.05 | 0.075 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

***Figura A5-7.*** *Función calado-daño para cultivos de secano (SEC)*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/$m^2$) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 0.28 |
| 40 | 0.55 |
| 60 | 0.83 |
| 80 | 1.10 |
| 100 | 1.10 |
| 120 | 1.10 |
| 140 | 1.10 |
| 160 | 1.10 |
| 180 | 1.10 |
| 200 | 1.10 |

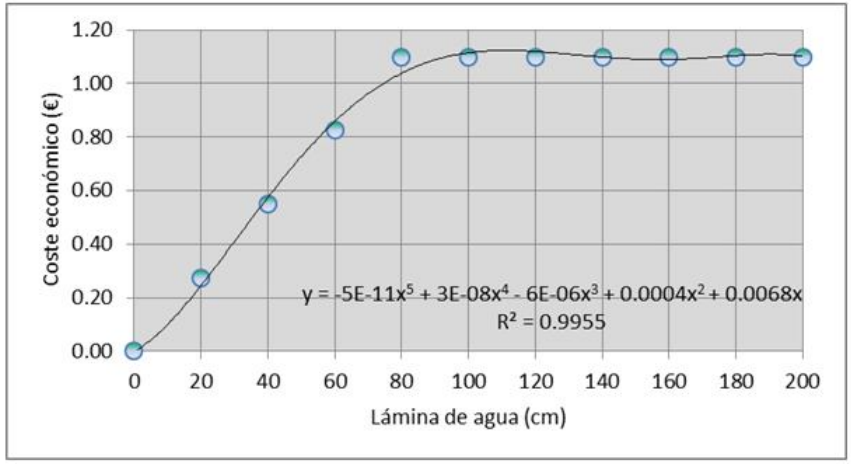


***Tabla A5-8.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño para pastos (PASTO).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| RUSTICO AGRICOLA | | | | | | | | | | | | | |
| | PASTOS ($m^2$) | 0.5 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 0.125 | 0.25 | 0.375 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 10% de pérdidas directas | | 0 | 0.0125 | 0.025 | 0.0375 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

***Figura A5-8.*** *Función calado-daño para pastos (PASTO).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/$m^2$) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 0.14 |
| 40 | 0.28 |
| 60 | 0.41 |
| 80 | 0.55 |
| 100 | 0.55 |
| 120 | 0.55 |
| 140 | 0.55 |
| 160 | 0.55 |
| 180 | 0.55 |
| 200 | 0.55 |

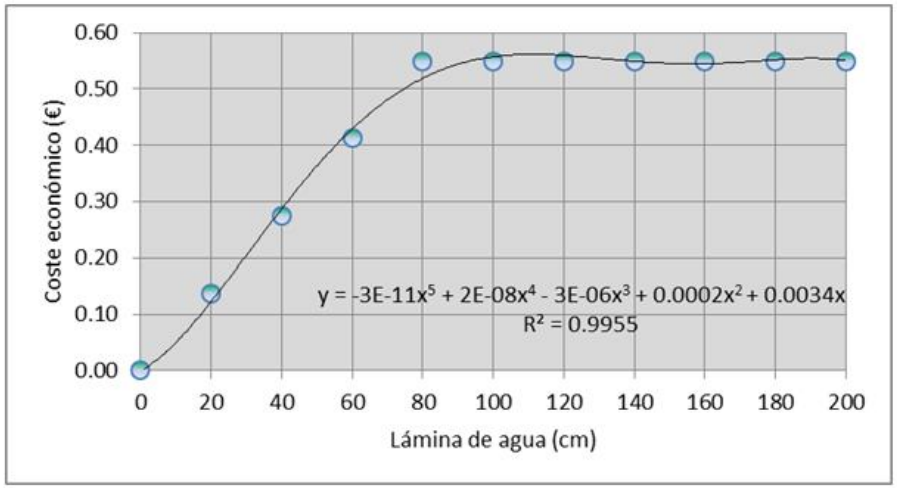


***Tabla A5-9.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño para monte bajo (M_BAJO).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| RUSTICO AGRICOLA | | | | | | | | | | | | | |
| | MONTE BAJO ($m^2$) | 0.5 | 0 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 |
| TOTALES | | | 0 | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0.125 | 0.15 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.25 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 10% de pérdidas directas | | 0 | 0 | 0.005 | 0.01 | 0.01 | 0.0125 | 0.015 | 0.02 | 0.02 | 0.025 | 0.025 |

***Figura A5-9.*** *Función calado-daño para monte bajo (M_BAJO).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/$m^2$) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 0.00 |
| 40 | 0.06 |
| 60 | 0.11 |
| 80 | 0.11 |
| 100 | 0.14 |
| 120 | 0.17 |
| 140 | 0.22 |
| 160 | 0.22 |
| 180 | 0.28 |
| 200 | 0.28 |

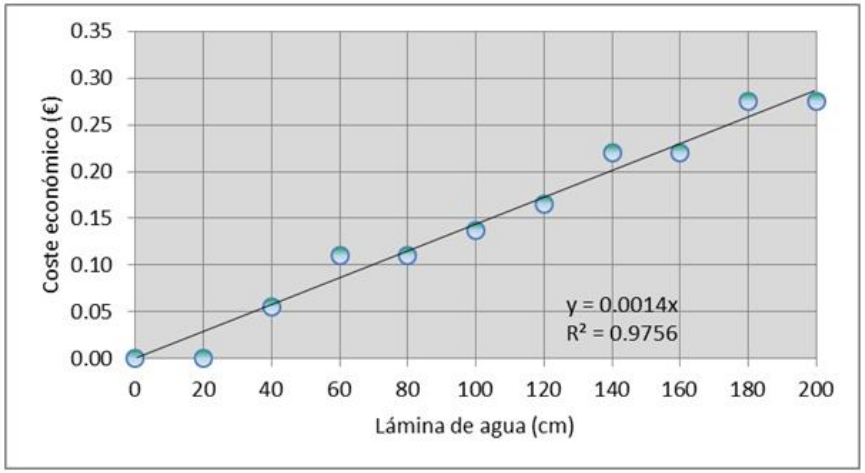


***Tabla A5-10.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño para infraestructuras (carreteras, INF_CAR)*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 10 | 15 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 150 | 200 |
| INF. VIARIAS | | | | | | | | | | | | | |
| | CARRETERAS ($M^2$) | 9.2 | 0 | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 0 | 0.46 | 0.92 | 1.84 | 2.76 | 4.6 | 6.9 | 8.28 | 9.2 | 9.2 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 25% de pérdidas directas | | 0 | 0 | 0.115 | 0.23 | 0.46 | 0.69 | 1.15 | 1.725 | 2.07 | 2.3 | 2.3 |

***Figura A5-10.*** *Función calado-daño para infraestructuras (carreteras, INF_CAR).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/$m^2$) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 10 | 0.00 |
| 15 | 0.58 |
| 20 | 1.15 |
| 40 | 2.30 |
| 60 | 3.45 |
| 80 | 5.75 |
| 100 | 8.63 |
| 120 | 10.35 |
| 150 | 11.50 |
| 200 | 11.50 |

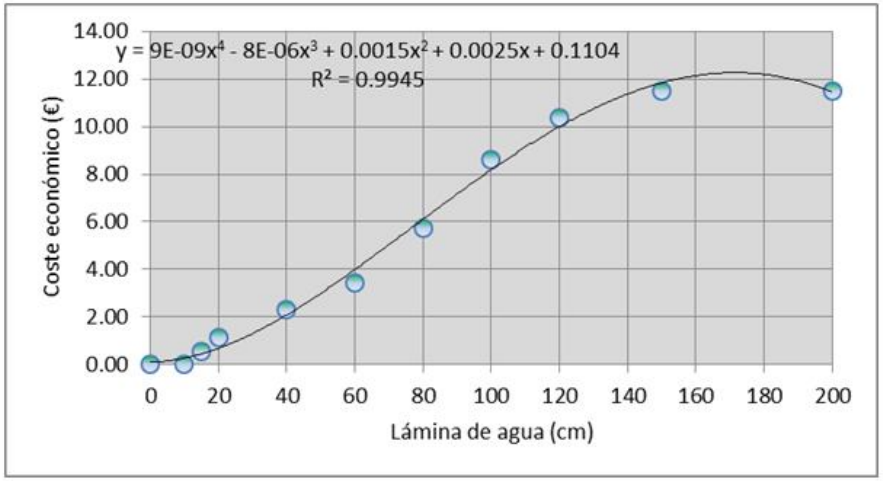


***Tabla A5-11.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño para infraestructuras (caminos de tierra, INF_CAM).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| INF. VIARIAS | | | | | | | | | | | | | |
| | CAMINOS ($M^2$) | 0.85 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 0.2125 | 0.425 | 0.6375 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| DAÑOS INDIRECTOS | 25% de pérdidas directas | | 0 | 0.0531 | 0.1063 | 0.1594 | 0.2125 | 0.2125 | 0.2125 | 0.2125 | 0.2125 | 0.2125 | 0.2125 |

***Figura A5-11.*** *Función calado-daño para infraestructuras (caminos de tierra, INF_CAM).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/$m^2$) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 0.27 |
| 40 | 0.53 |
| 60 | 0.80 |
| 80 | 1.06 |
| 100 | 1.06 |
| 120 | 1.06 |
| 140 | 1.06 |
| 160 | 1.06 |
| 180 | 1.06 |
| 200 | 1.06 |

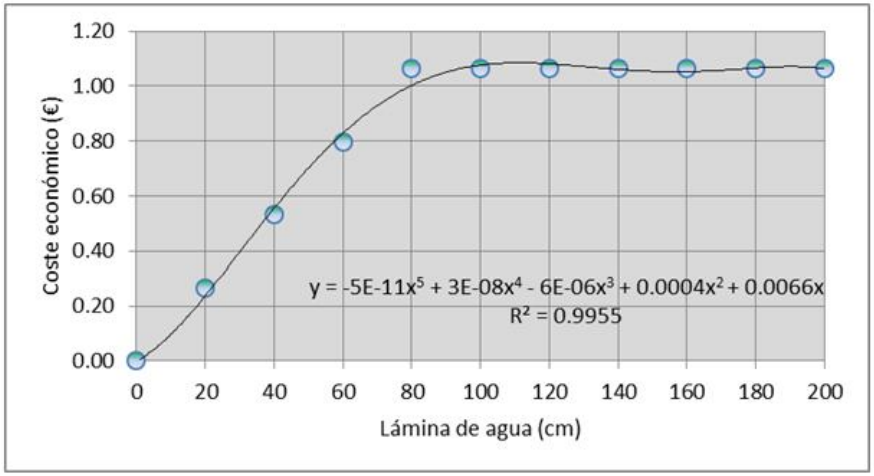


***Tabla A5-12.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño estructuras fijas (puente vehicular, ESTRUC_FIJAS).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 180 | 200 | 235 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| DAÑOS ESTRUCTURAS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | PUENTES | 223330 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 | 1 |
| | PERITAJE | 600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22933 | 56433 | 112265 | 168098 | 201597 | 223930 | 223930 | 223930 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DAÑOS INDIRECTOS | 25% de pérdidas directas | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5733.3 | 14108 | 28066 | 42024 | 50399 | 55983 | 55983 | 55983 |

***Figura A5-12.*** *Función calado-daño para estructuras fijas (puente vehicular, ESTRUC_FIJAS).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/m²) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 0.00 |
| 40 | 0.00 |
| 60 | 0.00 |
| 80 | 0.00 |
| 100 | 0.00 |
| 150 | 0.00 |
| 180 | 130.30 |
| 200 | 320.64 |
| 235 | 637.87 |
| 250 | 955.10 |
| 300 | 1145.44 |
| 350 | 1272.33 |
| 400 | 1272.33 |
| 450 | 1272.33 |

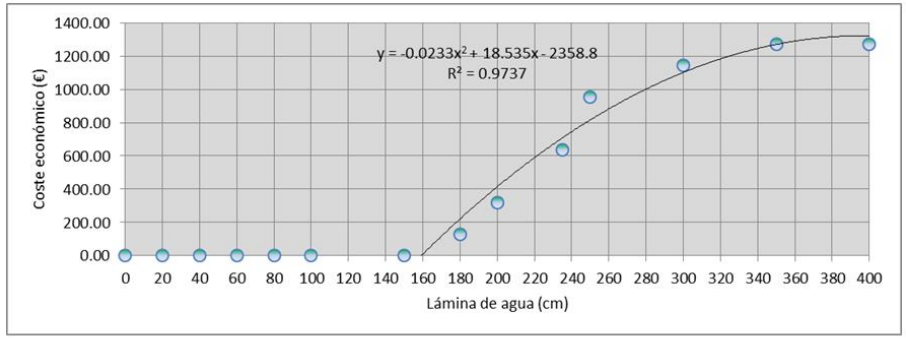
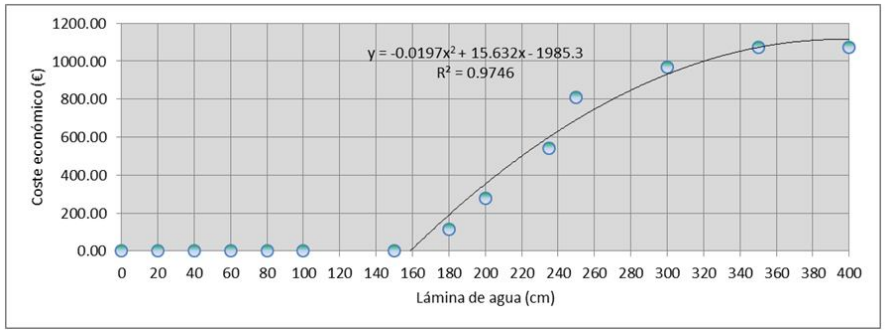


***Tabla A5-13.*** *Datos para la obtención de la función calado-daño estructuras fijas (puente peatonal, ESTRUC_FIJAS).*

| | | | % DAÑOS SEGÚN ALTURA LAMINA DE AGUA (cm) | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOCALIZACION | ELEMENTOS | COSTE (€) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 180 | 200 | 235 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| DAÑOS ESTRUCTURAS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | PUENTES | 63792 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 0.9 | 1 | 1 | 1 |
| | PERITAJE | 600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TOTALES | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6979.2 | 16548 | 32496 | 48444 | 58013 | 64392 | 64392 | 64392 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DAÑOS INDIRECTOS | 25% de pérdidas directas | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1744.8 | 4137 | 8124 | 12111 | 14503 | 16098 | 16098 | 16098 |

***Figura A5-13.*** *Función calado-daño para estructuras fijas (puente peatonal, ESTRUC_FIJAS).*

| LAMINA AGUA (cm) | COSTE ECONOMICO (€/m²) |
|---|---|
| 0 | 0.00 |
| 20 | 0.00 |
| 40 | 0.00 |
| 60 | 0.00 |
| 80 | 0.00 |
| 100 | 0.00 |
| 150 | 0.00 |
| 180 | 116.32 |
| 200 | 275.80 |
| 235 | 541.60 |
| 250 | 807.40 |
| 300 | 966.88 |
| 350 | 1073.20 |
| 400 | 1073.20 |
| 450 | 1073.20 |



## 2.1. MEMORIA DE CÁLCULO DE ESTRUCTURAS FIJAS

### 2.1.1. DIMENSIONES DE LAS ESTRUCTURAS FIJAS

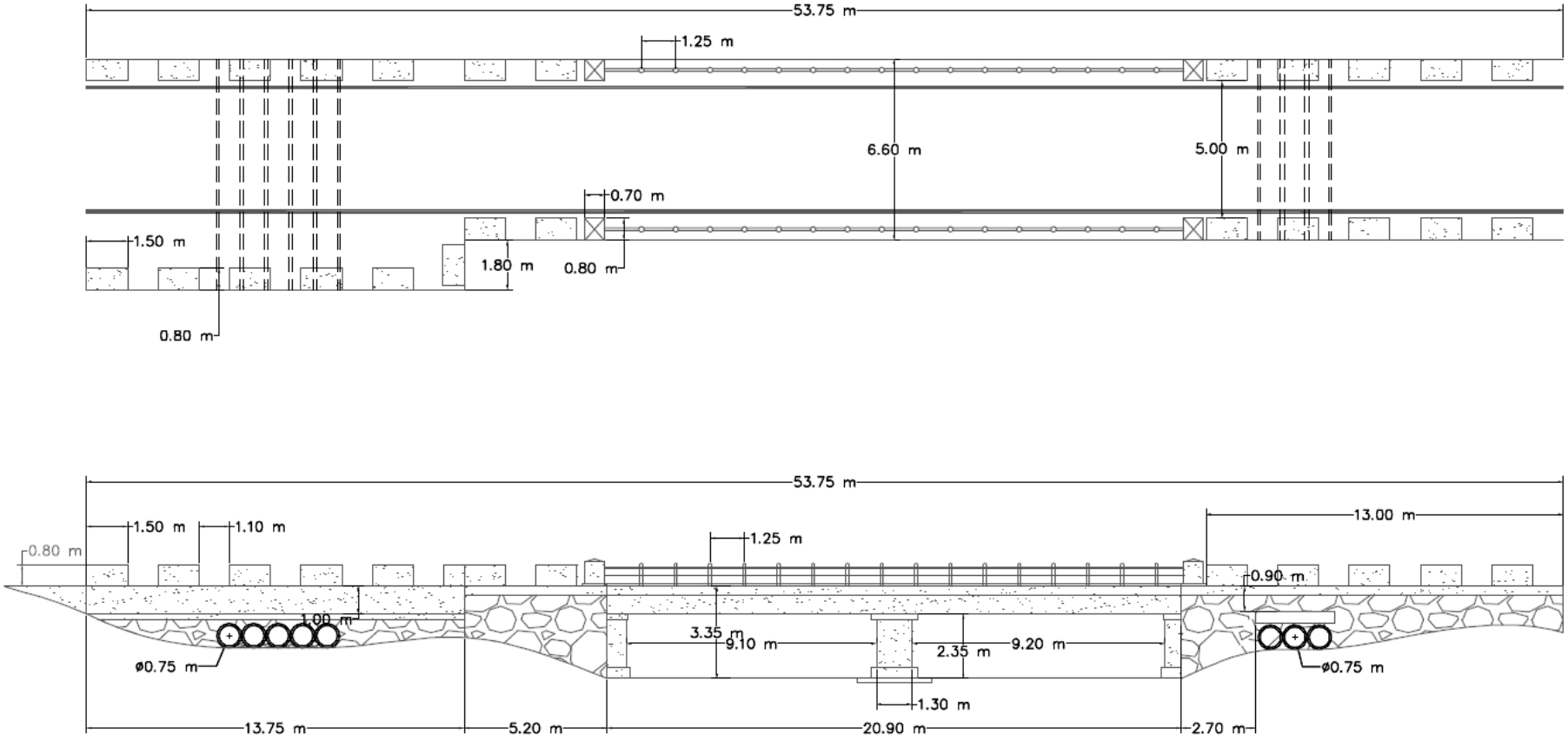



***Figura A5-1.*** *Dimensiones del Puente Pajares (Puente Vehicular).*

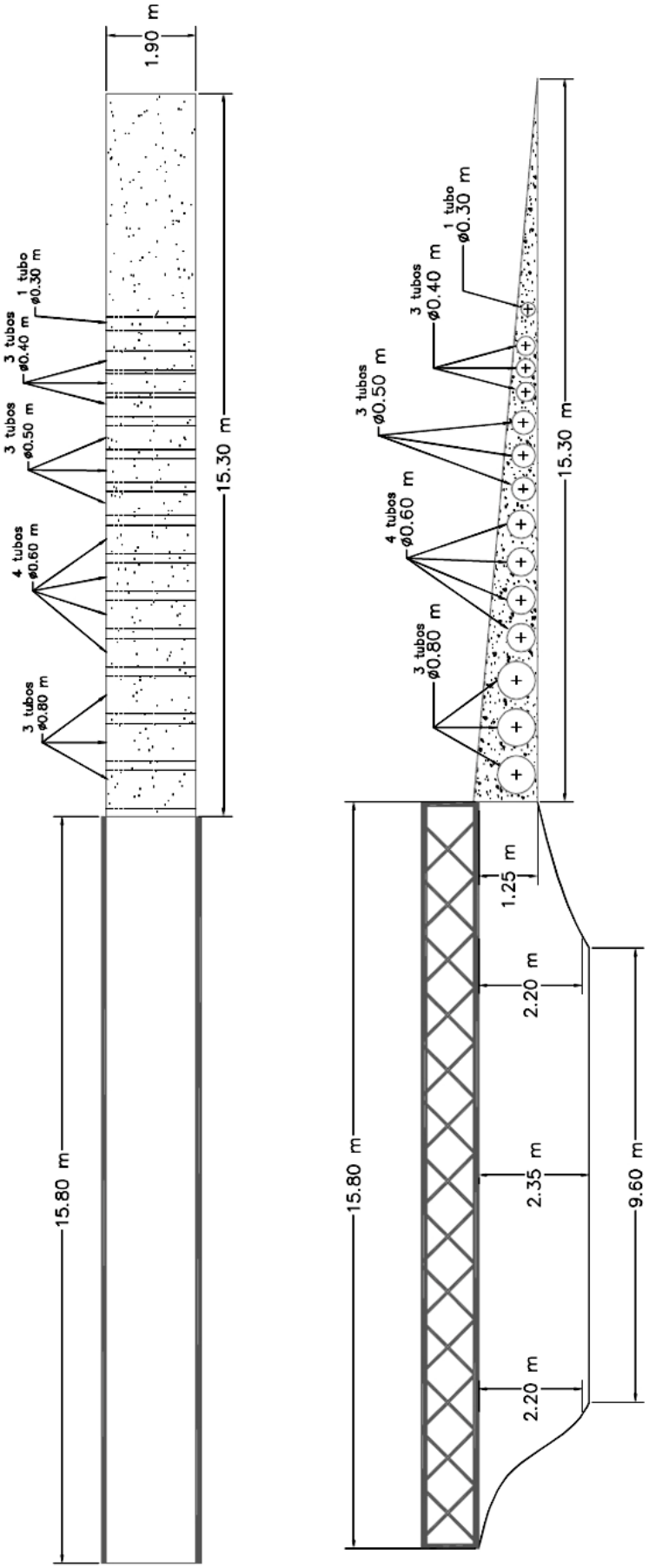



***Figura A5-2.*** *Dimensiones del puente peatonal.*

## 2.1.2. TABLAS DE PRECIOS UNITARIOS DE ESTRUCTURAS FIJAS

***Tabla A5.2.1-1.*** *Cuadro de precios unitarios y unidades de obra del puente vehicular.*

| ITEM | PARTIDAS DE PROYECTO | UNIDADES | CANT. | PRECIO UNITARIO (€/unidad) | PRECIO TOTAL (€) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ACTIVIDADES PRELIMINARES | | | | |
| 1.1 | Replanteo topográfico | u | 1.00 | 400.00 | **400.00 €** |
| 1.2 | Ataquia de desvio | $m^3$ | 42.00 | 17.00 | **714.00 €** |
| 1.3 | Retirada y apilado de capa de tierra vegetal. Con medios mecánicos | $m^2$ | 200.00 | 1.91 | **382.00 €** |
| 1.5 | Alquiler de andamio tubular normalizado, compuesto de plataformas de trabajo de 60 cm de ancho. | u | 1.00 | 496.18 | **496.18 €** |
| 1.6 | Demolición de estructuras usando medios mecánicos | $m^2$ | 400.00 | 76.63 | **30,652.00 €** |
| 1.7 | Excavación cimentación de plataformas y pila central | $m^3$ | 145.00 | 29.00 | **4,205.00 €** |
| 1.8 | Rocas de relleno en plataformas y cimentación + mano de obra | $m^3$ | 130.00 | 23.30 | **3,029.00 €** |
| 2 | MAQUINARIA | | | | |
| 2.1 | Maquinaria (retro excavadora) | dia | 15.00 | 30.00 | **450.00 €** |
| 2 | OBRA GRIS | | | | |
| 2.1 | Viga de hormigón armado | $m^3$ | 100.00 | 391.40 | **39,140.43 €** |
| 2.2 | Losa de hormigon armado | $m^3$ | 28.00 | 89.81 | **2,514.60 €** |
| 2.3 | Pantallas de soporte en plataformas | $m^3$ | 169.50 | 337.37 | **57,183.49 €** |
| 2.4 | Pilas de soporte | $m^3$ | 42.00 | 291.99 | **12,263.58 €** |
| 2.5 | Cimentación | $m^3$ | 160.00 | 86.21 | **13,794.26 €** |
| 2.6 | Aditivo de curado en obra gris + mano de obra | u | 4.00 | 11.50 | **46.00 €** |
| 2.7 | Tubería de hormigón armado prefabricado de diámetro 0.8m M. Clase 60 | m | 64.80 | 165.26 | **10,708.85 €** |
| 2.8 | Cuneta lateral de hormigón ejecutada en obra | m | 107.00 | 24.44 | **2,615.21 €** |
| 3 | ESTRUCTURAS METÁLICAS ADICIONALES | | | | |
| 3.1 | Malla electrosoldada para dilatación 150 x 150 x 4 mm tipo B 500 S para armadura de hormigón proyectado en tablero y plataformas. | $m^2$ | 683.00 | 15.58 | **10,641.14 €** |
| 3.2 | Tubos 60mm x 6m (baranda lateral) | m | 180.00 | 2.00 | **360.00 €** |
| 3.3 | Juntas de dilatación en tablero de 38mm | m | 192.00 | 175.17 | **33,632.64 €** |
| 4 | ACABADOS ESPECIALES | | | | |
| 4.1 | Pintura de tráfico (señalizacion horizontal) | u | 1.00 | 37.24 | **37.24 €** |
| 4.2 | Pintura anticorrosiva brillante para hierro (sistema de barandas latera | u | 1.00 | 64.60 | **64.60 €** |
| | **TOTAL** | | | | 223,330.21 € |

***Tabla A5.2.1-2.*** *Cuadro de precios unitarios y unidades de obra del puente peatonal.*

| ITEM | PARTIDAS DE PROYECTO | UNIDADES | CANT. | PRECIO UNITARIO (€/unidad) | PRECIO TOTAL (€) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ACTIVIDADES PRELIMINARES | | | | |
| 1.1 | Replanteo topográfico | u | 1.00 | 400.00 | **400.00 €** |
| 1.2 | Ataquia de desvio | $m^3$ | 42.00 | 17.00 | **714.00 €** |
| 1.3 | Retirada y apilado de capa de tierra vegetal. Con medios mecánicos | $m^2$ | 40.00 | 1.91 | **76.40 €** |
| 1.4 | Alquiler de andamio tubular normalizado, compuesto de plataformas de trabajo de 60 cm de ancho. | u | 1.00 | 496.18 | **496.18 €** |
| 1.5 | Demolición de estructuras usando medios mecánicos | $m^2$ | 55.00 | 76.63 | **4,214.65 €** |
| 1.6 | Excavación cimentación de plataforma + mano de obra | $m^3$ | 70.00 | 29.00 | **2,030.00 €** |
| 1.7 | Rocas de relleno en plataformas y cimentación + mano de obra | $m^3$ | 53.00 | 23.30 | **1,234.90 €** |
| 2 | MAQUINARIA | | | | |
| 2.1 | Maquinaria (retro excavadora) | dia | 15.00 | 30.00 | **450.00 €** |
| 2.2 | Grúa | dia | 5.00 | 49.00 | **245.00 €** |
| 3 | OBRA GRIS | | | | |
| 3.1 | Losa de hormigon armado | $m^3$ | 9.00 | 89.81 | **808.26 €** |
| 3.2 | Pantallas de soporte en plataformas | $m^3$ | 9.00 | 337.37 | **3,036.29 €** |
| 3.3 | Hormigón para armar (en plataformas portantes) | $m^3$ | 80.00 | 95.81 | **7,664.47 €** |
| 3.4 | Cimentación | $m^3$ | 30.00 | 86.21 | **2,586.42 €** |
| 3.5 | Aditivo de curado en obra gris + mano de obra | u | 2.00 | 11.50 | **23.00 €** |
| 3.6 | Tubería de hormigón armado prefabricado | | | | |
| 3.6.1 | Tubería de hormigón armado prefabricado de diámetro 80cm | m | 5.70 | 165.26 | **941.98 €** |
| 3.6.2 | Tubería de hormigón armado prefabricado de diámetro 60cm | m | 7.60 | 94.95 | **721.62 €** |
| 3.6.3 | Tubería de hormigón armado prefabricado de diámetro 50cm | m | 5.70 | 74.12 | **422.46 €** |
| 3.6.4 | Tubería de hormigón armado prefabricado de diámetro 40cm | m | 5.70 | 51.66 | **294.46 €** |
| 3.6.5 | Tubería de hormigón armado prefabricado de diámetro 30cm | m | 1.90 | 41.67 | **79.17 €** |
| 4 | ESTRUCTURAS METÁLICAS ADICIONALES | | | | |
| 4.1 | Malla electrosoldada para dilatación 150 x 150 x 4 mm tipo B 500 S para armadura de hormigón proyectado en tablero y plataformas. | $m^2$ | 72.00 | 15.58 | **1,121.76 €** |
| 4.2 | Juntas de dilatación en tablero de 38mm colocada | m | 62.00 | 175.17 | **10,860.54 €** |
| 3.2 | Vigas de acero W150 x 37.1 | kg | 4081.00 | 4.89 | **19,956.09 €** |
| 4.3 | Estructura metálica realizada con cerchas. | $m^2$ | 60.00 | 81.62 | **4,896.90 €** |
| 5 | ACABADOS ESPECIALES | | | | |
| 5.1 | Pintura anticorrosiva brillante para hierro (estructura metálica portant | u | 8.00 | 64.60 | **516.80 €** |
| 5.2 | **TOTAL** | | | | **63,791.36 €** |

## 2.1.3. HOJAS DE CALCULO DE PARTIDAS ESPECIALES

| 0XA110 | Ud | Alquiler de andamio tubular de fachada. |
|---|---|---|

Alquiler, durante **15** días naturales, de andamio tubular normalizado, tipo multidireccional, hasta **10** m de altura máxima de trabajo, formado por estructura tubular de acero galvanizado en caliente, de 48,3 mm de diámetro y 3,2 mm de espesor, **sin duplicidad de elementos verticales**, compuesto por plataformas de trabajo de 60 cm de ancho, dispuestas cada 2 m de altura, escalera interior con trampilla, barandilla trasera con dos barras y rodapié, y barandilla delantera con una barra; para la ejecución de fachada de **250** m².

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mq13ats010aa | Ud | Alquiler diario de m² de andamio tubular normalizado, tipo multidireccional, de 10 m de altura máxima de trabajo, constituido por estructura tubular de acero galvanizado en caliente, de 48,3 mm de diámetro y 3,2 mm de espesor, sin duplicidad de elementos verticales, fabricado cumpliendo las exigencias de calidad recogidas en la norma UNE-EN ISO 9001, según UNE-EN 12810 y UNE-EN 12811; compuesto de plataformas de trabajo de 60 cm de ancho, dispuestas cada 2 m de altura, escalera interior con trampilla, barandilla trasera con dos barras y rodapié, y barandilla delantera con una barra; para ejecución de fachada incluso red flexible, tipo mosquitera monofilamento, de polietileno 100% | 5247.611 | 0.09 | 472.28 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 472.28 | 9.45 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 481.73 | 14.45 |
| | | | | Total: | 496.18 |

***Tabla A5.2.1-3.*** *Cálculo de costo de andamio.*

| CMP010 | m³ | Pozo de cimentación de hormigón ciclópeo. |
|---|---|---|

Pozo de cimentación de hormigón ciclópeo, realizado con **hormigón HM-15/B/40/I fabricado en central y vertido desde camión**, (60% de volumen) y bolos de piedra entre 80 y 150 mm de diámetro (40% de volumen).

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt10hmf010Lv | m³ | Hormigón HM-15/B/40/I, fabricado en central. | 0.660 | 64.94 | 42.86 |
| mt01are040 | m³ | Bolos de piedra de 80 a 150 mm de diámetro. | 0.400 | 22.54 | 9.01 |
| mo041 | h | Oficial 1ª estructurista. | 0.375 | 18.10 | 6.79 |
| mo084 | h | Ayudante estructurista. | 0.375 | 16.94 | 6.35 |
| mo105 | h | Peón ordinario construcción. | 1.071 | 15.92 | 17.05 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 82.06 | 1.64 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 83.70 | 2.51 |
| Coste de mantenimiento decenal: 2,55□ en los primeros 10 años. | | | | Total: | 86.21 |

***Tabla A5.2.1-4.*** *Cálculo de costo de cimentación de hormigón.*

**DEH021** **m²** **Demolición de forjado de hormigón armado con medios mecánicos.**

Demolición de **losa maciza de hormigón armado de hasta 20 cm de canto total**, con **retroexcavadora con martillo rompedor**, y carga **manual** de escombros sobre camión o contenedor.

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mq01exn050c | h | Retroexcavadora sobre neumáticos, de 85 kW, con martillo rompedor. | 0.596 | 65.00 | 38.74 |
| mq08sol010 | h | Equipo de oxicorte, con acetileno como combustible y oxígeno como comburente. | 0.381 | 7.37 | 2.81 |
| mo104 | h | Peón especializado construcción. | 0.620 | 16.25 | 10.08 |
| mo018 | h | Oficial 1ª soldador. | 0.372 | 17.52 | 6.52 |
| mo105 | h | Peón ordinario construcción. | 0.929 | 15.92 | 14.79 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 72.94 | 1.46 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 74.40 | 2.23 |
| | | | | Total: | 76.63 |

***Tabla A5.2.1-5.*** *Cálculo de costo de demolición de hormigón.*

**EAM020** **m²** **Estructura metálica realizada con cerchas.**

Estructura metálica realizada con cerchas de acero laminado **S275JR**, con una cuantía de acero de **18,75** kg/m², **L < 10** m, separación de **4** m entre cerchas.

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt07ala010n | kg | Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, cerchas, para aplicaciones estructurales. | 18.750 | 2.78 | 52.03 |
| mt27pfi010 | l | Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc. | 0.178 | 7.20 | 1.28 |
| mq08sol010 | h | Equipo de oxicorte, con acetileno como combustible y oxígeno como comburente. | 0.014 | 11.06 | 0.15 |
| mq08sol020 | h | Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica. | 0.021 | 4.65 | 0.10 |
| mq07ple010c | Ud | Alquiler diario de cesta elevadora de brazo articulado de 16 m de altura máxima de trabajo, incluso mantenimiento y seguro de responsabilidad civil. | 0.014 | 180.90 | 2.53 |
| mq07gte010a | h | Grúa autopropulsada de brazo telescópico con una capacidad de elevación de 12 t y 20 m de altura máxima de trabajo. | 0.014 | 73.50 | 1.03 |
| mo043 | h | Oficial 1ª montador de estructura metálica. | 0.391 | 27.15 | 10.62 |
| mo086 | h | Ayudante montador de estructura metálica. | 0.391 | 25.41 | 9.94 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 77.68 | 1.55 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 79.23 | 2.38 |
| Coste de mantenimiento decenal: 1,63 en los primeros 10 años. | | | | Total: | 81.61 |

***Tabla A5.2.1-6.*** *Cálculo de costo de estructura metálica con cerchas.*

**EHL010** **m²** **Losa maciza.**

Losa maciza de hormigón armado, **horizontal**, canto **24** cm, realizada con **hormigón HA-40/B/20/IIa fabricado en central, y vertido con bomba**, y acero **UNE-EN 10080 B 500 S**, cuantía **22** kg/m²; montaje y desmontaje del sistema de encofrado de madera; altura libre de planta de **hasta 3 m**. Sin incluir repercusión de pilares.

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt08efl010a | m² | Sistema de encofrado continuo para losa de hormigón armado, hasta 3 m de altura libre de planta, compuesto de: puntales, sopandas metálicas y superficie encofrante de madera tratada reforzada con varillas y perfiles. | 1.100 | 14.78 | 16.26 |
| mt08cor010a | m | Molde de poliestireno expandido para cornisa. | 0.100 | 8.81 | 0.88 |
| mt07aco020i | Ud | Separador homologado para losas macizas. | 3.000 | 0.50 | 1.50 |
| mt07aco010c | kg | Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, elaborado en taller industrial, diámetros varios. | 22.000 | 1.00 | 22.00 |
| mt10haf010nFa | m³ | Hormigón HA-40/B/20/IIa, fabricado en central. | 0.252 | 100.45 | 25.31 |
| mq06bhe010 | h | Camión bomba estacionado en obra, para bombeo de hormigón. Incluso p/p de desplazamiento. | 0.010 | 169.73 | 1.70 |
| mo041 | h | Oficial 1ª estructurista. | 0.509 | 18.10 | 9.21 |
| mo084 | h | Ayudante estructurista. | 0.509 | 16.94 | 8.62 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 85.48 | 1.71 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 87.19 | 2.62 |
| Coste de mantenimiento decenal: 4,42 en los primeros 10 años. | | | | Total: | 89.81 |

***Tabla A5.2.1-7.*** *Cálculo de costo de Losa maciza.*

**EHN010** **m³** **Núcleo o pantalla de hormigón.**

**Pantalla** de hormigón armado **2C**, **H<=3 m**, espesor **30** cm, **realizada con hormigón HA-40/B/20/IIa fabricado en central, y vertido con bomba**, y acero **UNE-EN 10080 B 500 S**, cuantía **50** kg/m³; montaje y desmontaje del sistema de encofrado **metálico con acabado tipo industrial para revestir.**

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt07aco020d | Ud | Separador homologado para muros. | 8.000 | 0.06 | 0.48 |
| mt07aco010c | kg | Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, elaborado en taller industrial, diámetros varios. | 50.000 | 1.00 | 50.00 |
| mt08eme030c | m² | Sistema de encofrado a dos caras, para muros, formado por paneles metálicos modulares, hasta 3 m de altura, incluso p/p de elementos para paso de instalaciones. | 6.660 | 22.02 | 146.67 |
| mt10haf010nFa | m³ | Hormigón HA-40/B/20/IIa, fabricado en central. | 1.050 | 100.45 | 105.47 |
| mq06bhe010 | h | Camión bomba estacionado en obra, para bombeo de hormigón. Incluso p/p de desplazamiento. | 0.040 | 169.73 | 6.79 |
| mo041 | h | Oficial 1ª estructurista. | 0.334 | 18.10 | 6.05 |
| mo084 | h | Ayudante estructurista. | 0.334 | 16.94 | 5.66 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 321.12 | 6.42 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 327.54 | 9.83 |
| Coste de mantenimiento decenal: 13,30 en los primeros 10 años. | | | | Total: | 337.37 |

***Tabla A5.2.1-8.*** *Cálculo de costo de núcleo o pantalla de hormigón.*

**EHS010** **m³** **Pilar de hormigón armado.**

Pilar **de sección rectangular o cuadrada** de hormigón armado, realizado con **hormigón HA-35/B/20/IIa fabricado en central, y vertido con bomba**, y acero **UNE-EN 10080 B 500 S**, cuantía **120** kg/m³; **montaje y desmontaje del sistema de encofrado de paneles metálicos, hasta 3 m** de altura libre y **120x120 cm de sección media**.

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt07aco020b | Ud | Separador homologado para pilares. | 12.000 | 0.06 | 0.73 |
| mt07aco010c | kg | Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, elaborado en taller industrial, diámetros varios. | 120.000 | 1.01 | 121.20 |
| mt08eup015a | m² | Sistema de encofrado para pilares de hormigón armado de sección rectangular o cuadrada, de hasta 3 m de altura, compuesto de paneles metálicos reutilizables diseñados para su manipulación con grúa, incluso p/p de accesorios de montaje. Amortizable en 100 usos. | 4.167 | 11.02 | 45.94 |
| mt10haf010nwa | m³ | Hormigón HA-35/B/20/IIa, fabricado en central. | 1.050 | 92.01 | 96.61 |
| mq06bhe010 | h | Camión bomba estacionado en obra, para bombeo de hormigón. Incluso p/p de desplazamiento. | 0.040 | 169.73 | 6.79 |
| mo041 | h | Oficial 1ª estructurista. | 0.190 | 18.10 | 3.44 |
| mo084 | h | Ayudante estructurista. | 0.190 | 16.94 | 3.22 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 277.93 | 5.56 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 283.49 | 8.50 |
| Coste de mantenimiento decenal: 14,34 en los primeros 10 años. | | | | Total: | 291.99 |

***Tabla A5.2.1-9.*** *Cálculo de pilar de hormigón armado.*

**EHV010** **m³** **Viga de hormigón armado.**

Viga **plana** de hormigón armado, realizada con **hormigón HA-40/B/20/IIa fabricado en central, y vertido con bomba**, y acero **UNE-EN 10080 B 500 S**, cuantía **150** kg/m³; montaje y desmontaje del sistema de encofrado **de madera**, en planta de **hasta 3 m** de altura libre.

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt08eva010a | m² | Sistema de encofrado recuperable para la ejecución de vigas de hormigón para revestir, compuesto de: puntales metálicos telescópicos, sopandas metálicas y superficie encofrante de madera tratada reforzada con varillas y perfiles, hasta 3 m de altura libre de planta. | 3.500 | 22.40 | 78.40 |
| mt07aco020c | Ud | Separador homologado para vigas. | 4.000 | 1.45 | 5.82 |
| mt07aco010c | kg | Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, elaborado en taller industrial, diámetros varios. | 150.000 | 1.00 | 150.00 |
| mt10haf010nFa | m³ | Hormigón HA-40/B/20/IIa, fabricado en central. | 1.050 | 100.45 | 105.47 |
| mq06bhe010 | h | Camión bomba estacionado en obra, para bombeo de hormigón. Incluso p/p de desplazamiento. | 0.040 | 169.73 | 6.79 |
| mo041 | h | Oficial 1ª estructurista. | 0.744 | 18.10 | 13.47 |
| mo084 | h | Ayudante estructurista. | 0.744 | 16.94 | 12.60 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 372.55 | 7.45 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 380.00 | 11.40 |
| Coste de mantenimiento decenal: 26,99 en los primeros 10 años. | | | | Total: | 391.40 |

***Tabla A5.2.1-10.*** *Cálculo de costo de viga de hormigón armado.*

**EAV010** **kg** **Acero en vigas.**

Acero **S355JR** en vigas, con piezas **simples de** perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, UPN, HEA, HEB o HEM con uniones soldadas.

| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | Precio unitario | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| mt07ala010o | kg | Acero laminado UNE-EN 10025 S355JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales. | 1.050 | 3.03 | 3.18 |
| mt27pfi010 | l | Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc. | 0.050 | 6.90 | 0.35 |
| mq08sol020 | h | Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica. | 0.021 | 3.10 | 0.07 |
| mo043 | h | Oficial 1ª montador de estructura metálica. | 0.028 | 20.10 | 0.56 |
| mo086 | h | Ayudante montador de estructura metálica. | 0.028 | 17.94 | 0.50 |
| | % | Medios auxiliares | 2.000 | 4.66 | 0.09 |
| | % | Costes indirectos | 3.000 | 4.75 | 0.14 |
| Coste de mantenimiento decenal: 0,07 en los primeros 10 años. | | | | Total: | 4.89 |

***Tabla A5.2.1-11.*** *Cálculo de costo de acero en vigas.*

## 10.6. ANEXO 6. TABLAS Y GRÁFICOS DE RESULTADOS DE CÁLCULO DE ESTIMACIÓN ECONÓMICA DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN PAJARES DE PEDRAZA (ARAHUETES, SEGOVIA), PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS.

***Tabla A6-1.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 6 | 8,507 € | 20,290 € |
| INF_CAR | 4 | 130,549 € | 143,966 € |
| M_BAJO | 39 | 19,607 € | 54,020 € |
| NO_RUSTICO | 9 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 84 | 16,665 € | 54,986 € |
| SEC | 47 | 812 € | 7,554 € |
| **TOTAL** | **189** | | **280,815 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 6 | 8,507 € | 20,669 € |
| INF_CAR | 4 | 131,171 € | 144,606 € |
| M_BAJO | 41 | 19,629 € | 54,107 € |
| NO_RUSTICO | 9 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 84 | 16,673 € | 55,188 € |
| SEC | 47 | 812 € | 7,421 € |
| **TOTAL** | **191** | | **281,991 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 6 | 8,508 € | 20,263 € |
| INF_CAR | 4 | 131,189 € | 145,143 € |
| M_BAJO | 41 | 19,610 € | 54,120 € |
| NO_RUSTICO | 8 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 85 | 16,672 € | 55,220 € |
| SEC | 18 | 811 € | 5,528 € |
| **TOTAL** | **162** | | **280,273 €** |

***Figura A6-1.*** *Daños totales en áreas de ocupación rústica para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$*

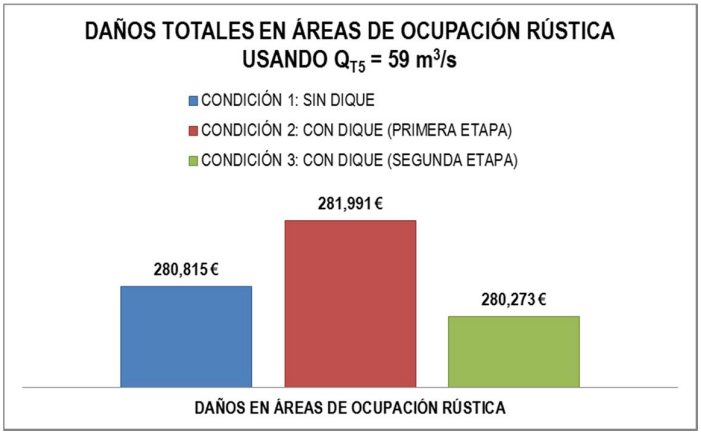


***Tabla A6-2.*** *Perdidas en ocupación urbana para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 8 | 1,059 € | 1,241 € |
| NO_CONST | 18 | 0 € | 0 € |
| V1O | 6 | 2,079 € | 8,009 € |
| V1P | 1 | 2,104 € | 2,104 € |
| V2O | 2 | 1,023 € | 1,838 € |
| V2P | 1 | 285 € | 285 € |
| **TOTAL** | 36 | | 13,477 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 8 | 1,059 € | 1,228 € |
| NO_CONST | 6 | 0 € | 0 € |
| V1O | 0 | | 0 € |
| V1P | 1 | 1,005 € | 1,005 € |
| V2O | 0 | | 0 € |
| V2P | 0 | | 0 € |
| **TOTAL** | 15 | | 2,233 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 5 | 1,059 € | 1,088 € |
| NO_CONST | 5 | 0 € | 0 € |
| V1O | 0 | | 0 € |
| V1P | 1 | 1,005 € | 1,005 € |
| V2O | 0 | | 0 € |
| V2P | 0 | | 0 € |
| **TOTAL** | 11 | | 2,092 € |

***Figura A6-2.*** *Daños totales en áreas de ocupación urbana para $Q_{T5}$ = 59$m^3$/s*

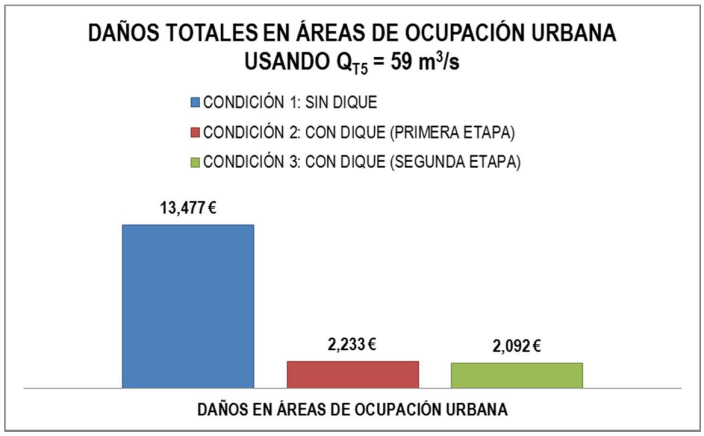



***Tabla A6-3.*** *Perdidas en estructuras fijas para $Q_{T5}$ = 59 $m^3$/s*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 0 € | 0 € |
| **TOTAL** | 2 | | 0 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 0 € | 0 € |
| **TOTAL** | 2 | | 0 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 0 € | 0 € |
| **TOTAL** | 2 | | 0 € |

***Figura A6-3.*** *Daños totales en estructuras fijas para $Q_{T5}$ = 59 $m^3$/s.*

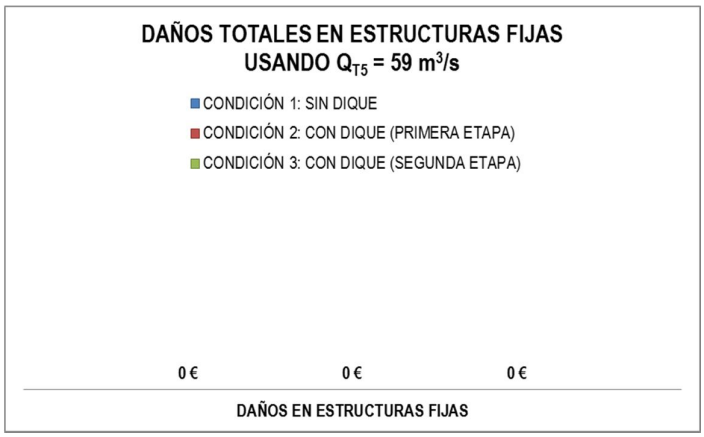


***Tabla A6-4.*** *Daños totales calculados para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa)*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 13,477 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 280,815 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 0 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **294,292 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 2,233 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 281,991 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 0 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **284,224 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 2,092 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 280,273 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 0 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **282,365 €** |

***Figura A6-4.*** *Daños totales para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$. (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa)*

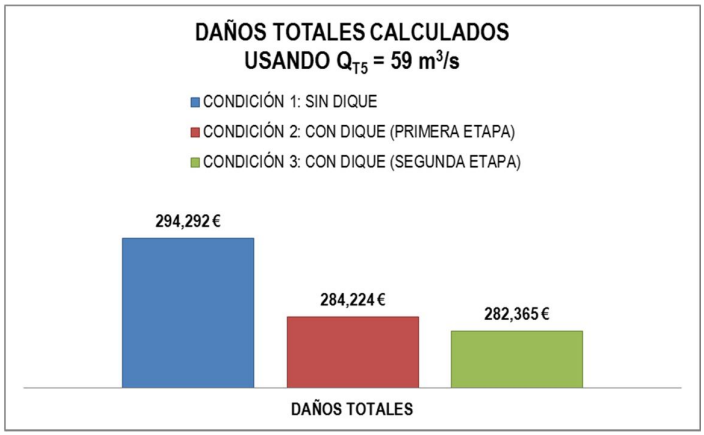


***Tabla A6-5.*** *Daños totales calculados para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 13,477 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 218,275 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 0 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **231,752 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 2,233 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 219,381 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 0 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **221,615 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 2,092 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 219,526 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 0 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **221,618 €** |

***Figura A6-5.*** *Daños totales calculados para $Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

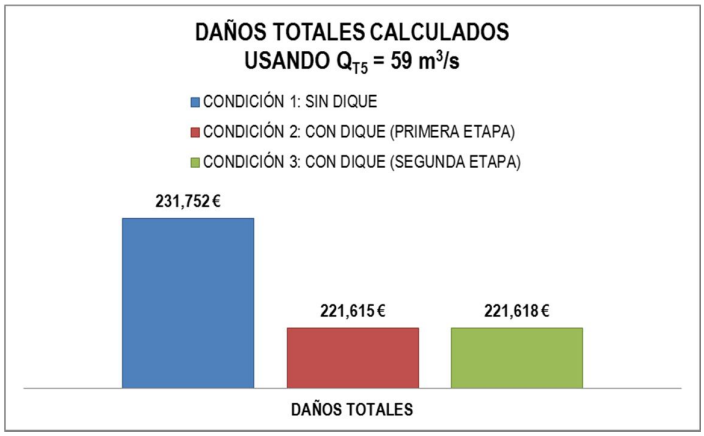


***Tabla A6-6.*** *Daños calculados en ocupación rústica para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 9 | 12,109 € | 30,996 € |
| INF_CAR | 4 | 123,414 € | 135,358 € |
| M_BAJO | 51 | 26,210 € | 74,185 € |
| NO_RUSTICO | 10 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 103 | 24,640 € | 81,612 € |
| SEC | 63 | 1,642 € | 18,839 € |
| **TOTAL** | **240** | | **340,989 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 9 | 12,110 € | 29,784 € |
| INF_CAR | 4 | 123,579 € | 134,520 € |
| M_BAJO | 52 | 26,210 € | 74,349 € |
| NO_RUSTICO | 10 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 104 | 24,654 € | 81,892 € |
| SEC | 63 | 1,642 € | 18,487 € |
| **TOTAL** | **242** | | **339,032 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 7 | 12,109 € | 25,151 € |
| INF_CAR | 4 | 123,422 € | 132,343 € |
| M_BAJO | 53 | 26,211 € | 74,590 € |
| NO_RUSTICO | 10 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 106 | 24,657 € | 82,198 € |
| SEC | 60 | 1,642 € | 15,114 € |
| **TOTAL** | **240** | | **329,396 €** |

***Figura A6-6.*** *Daños calculados en ocupación rústica para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$*

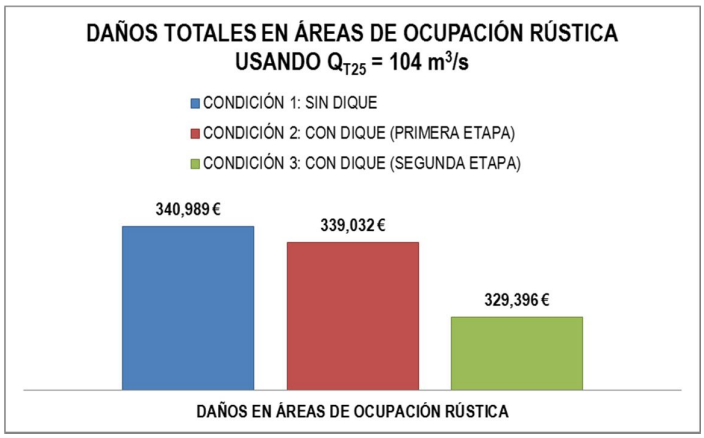


*Tabla A6-7. Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 10 | 1,552 € | 4,300 € |
| NO_CONST | 57 | 0 € | 0 € |
| V1O | 31 | 11,899 € | 143,188 € |
| V1P | 3 | 10,686 € | 20,213 € |
| V2O | 16 | 9,219 € | 78,826 € |
| V2P | 6 | 10,171 € | 44,611 € |
| **TOTAL** | 123 | | 291,136 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 10 | 1,602 € | 3,283 € |
| NO_CONST | 51 | 0 € | 0 € |
| V1O | 21 | 6,105 € | 61,971 € |
| V1P | 3 | 9,091 € | 18,439 € |
| V2O | 14 | 5,562 € | 46,406 € |
| V2P | 6 | 6,102 € | 11,853 € |
| **TOTAL** | 105 | | 141,952 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 9 | 1,552 € | 2,277 € |
| NO_CONST | 49 | 0 € | 0 € |
| V1O | 19 | 5,990 € | 44,668 € |
| V1P | 3 | 6,970 € | 14,370 € |
| V2O | 13 | 5,131 € | 31,836 € |
| V2P | 6 | 4,717 € | 14,945 € |
| **TOTAL** | 99 | | 108,095 € |

***Figura A6-7.*** *Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$*

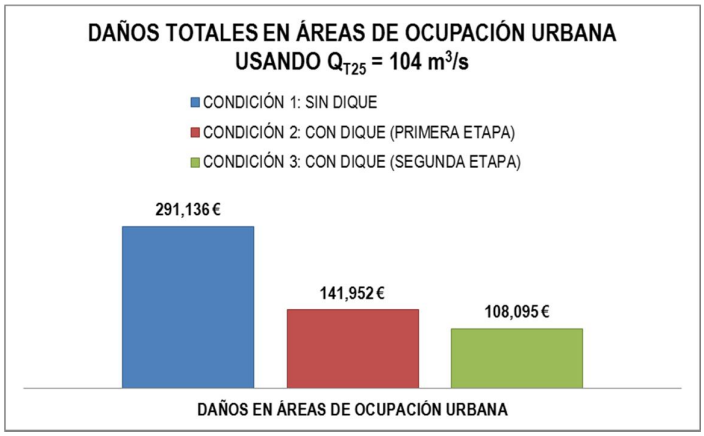



***Tabla A6-8.*** *Pérdidas estructuras fijas para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 64,481 € | 64,481 € |
| **TOTAL** | 2 | | 64,481 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 66,573 € | 85,622 € |
| **TOTAL** | 2 | | 85,622 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 66,723 € | 89,931 € |
| **TOTAL** | 2 | | 89,931 € |

***Figura A6-8.*** *Pérdidas estructuras fijas para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$*

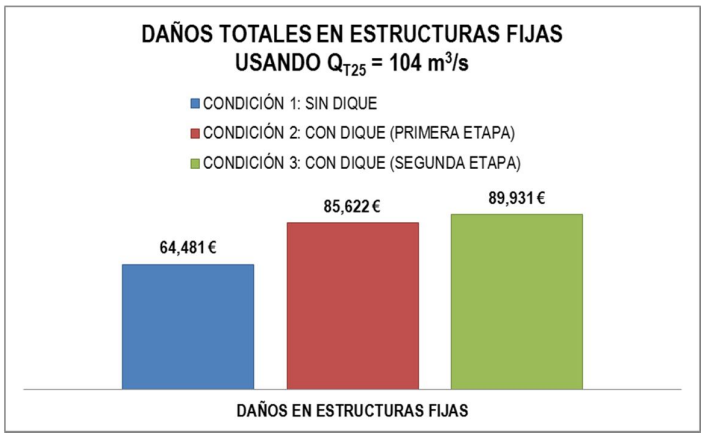


***Tabla A6-9.*** *Daños totales calculados para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 291,136 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 340,989 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 64,481 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **696,606 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 141,952 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 339,032 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 85,622 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **566,605 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 108,095 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 329,396 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 89,931 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **527,422 €** |

***Figura A6-9.*** *Daños totales calculados para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

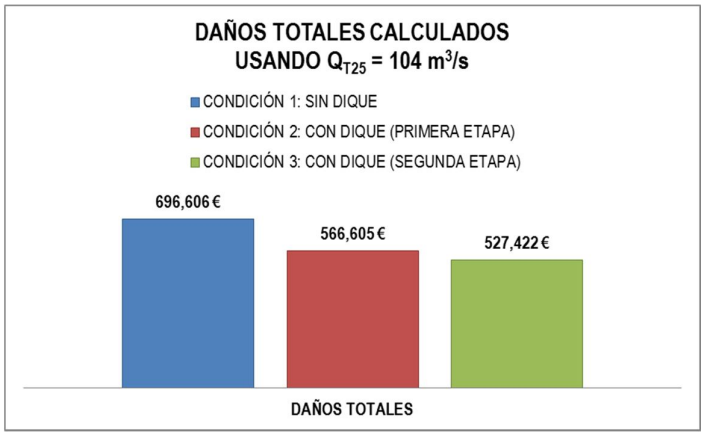


***Tabla A6-10.*** *Daños totales calculados para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 291,136 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 240,538 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 64,481 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **596,156 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 141,952 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 238,653 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 85,622 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **466,226 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 108,095 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 232,084 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 89,931 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **430,109 €** |

***Figura A6-10.*** *Daños totales calculados para $Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

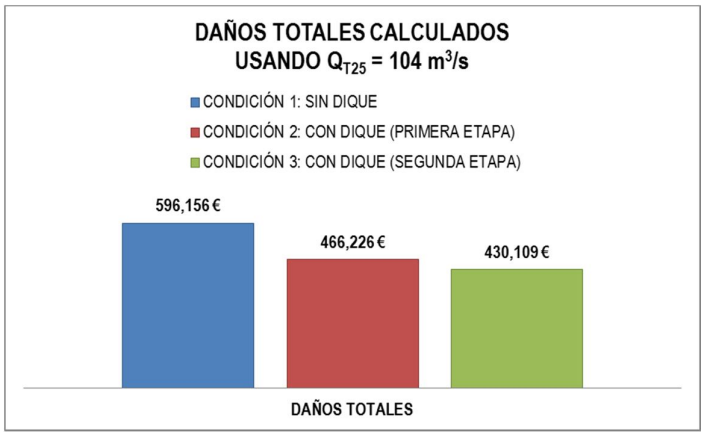


***Tabla A6-11.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 9 | 13,296 € | 34,074 € |
| INF_CAR | 4 | 128,105 € | 142,569 € |
| M_BAJO | 58 | 28,881 € | 82,090 € |
| NO_RUSTICO | 10 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 105 | 28,107 € | 90,937 € |
| SEC | 65 | 2,050 € | 24,327 € |
| **TOTAL** | **251** | | **373,996 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 9 | 13,297 € | 33,377 € |
| INF_CAR | 4 | 126,641 € | 140,436 € |
| M_BAJO | 59 | 28,881 € | 82,237 € |
| NO_RUSTICO | 10 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 107 | 28,122 € | 91,207 € |
| SEC | 65 | 2,050 € | 24,108 € |
| **TOTAL** | **254** | | **371,366 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 9 | 13,298 € | 29,235 € |
| INF_CAR | 4 | 126,817 € | 137,658 € |
| M_BAJO | 59 | 28,881 € | 82,533 € |
| NO_RUSTICO | 10 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 113 | 28,124 € | 91,188 € |
| SEC | 64 | 2,050 € | 20,850 € |
| **TOTAL** | **259** | | **361,464 €** |

***Figura A6-11.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$*

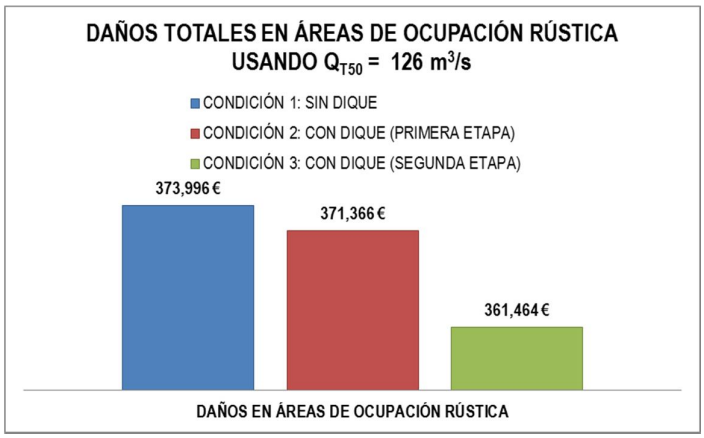


***Tabla A6-12.*** *Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 10 | 1,613 € | 5,750 € |
| NO_CONST | 58 | 0 € | 0 € |
| V1O | 38 | 12,016 € | 192,356 € |
| V1P | 3 | 11,428 € | 23,550 € |
| V2O | 21 | 9,301 € | 99,244 € |
| V2P | 6 | 10,235 € | 51,938 € |
| **TOTAL** | 136 | | 372,838 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 10 | 1,613 € | 5,243 € |
| NO_CONST | 53 | 0 € | 0 € |
| V1O | 26 | 11,691 € | 123,803 € |
| V1P | 3 | 10,965 € | 23,012 € |
| V2O | 14 | 8,652 € | 80,662 € |
| V2P | 6 | 8,849 € | 43,471 € |
| **TOTAL** | 112 | | 276,191 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 0 | | 0 € |
| ES_L | 10 | 1,613 € | 3,448 € |
| NO_CONST | 52 | 0 € | 0 € |
| V1O | 27 | 11,719 € | 100,618 € |
| V1P | 3 | 8,554 € | 20,025 € |
| V2O | 14 | 8,652 € | 63,932 € |
| V2P | 6 | 8,849 € | 37,872 € |
| **TOTAL** | 112 | | 225,896 € |

***Figura A6-12.*** *Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$*

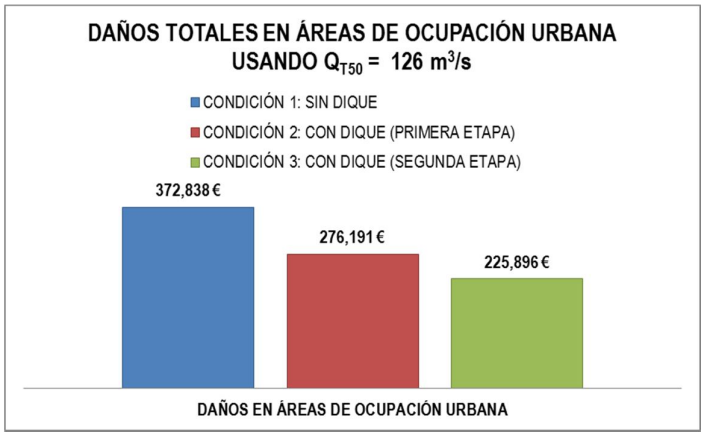



***Tabla A6-13.*** *Pérdidas en estructuras fijas para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 81,406 € | 104,177 € |
| **TOTAL** | 2 | | 104,177 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 80,969 € | 105,273 € |
| **TOTAL** | 2 | | 105,273 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 81,264 € | 113,612 € |
| **TOTAL** | 2 | | 113,612 € |

***Figura A6-13.*** *Pérdidas en estructuras fijas para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$*

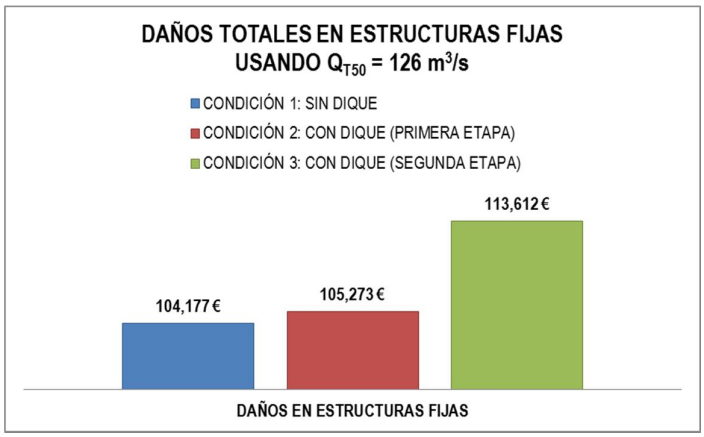


***Tabla A6-14.*** *Daños totales calculados para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 372,838 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 373,996 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 104,177 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **851,011 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 276,191 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 371,366 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 105,273 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **752,830 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 225,896 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 361,464 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 113,612 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **700,971 €** |

***Figura A6-14.*** *Daños totales calculados para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

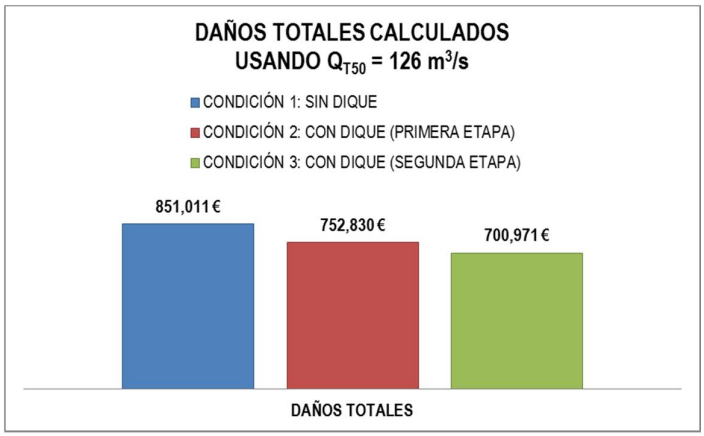


***Tabla A6-15.*** *Daños totales calculados para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 372,838 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 258,732 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 104,177 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **735,747 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 276,191 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 256,051 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 105,273 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **637,515 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 225,896 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 249,427 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 113,612 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **588,934 €** |

***Figura A6-15.*** *Daños totales calculados para $Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

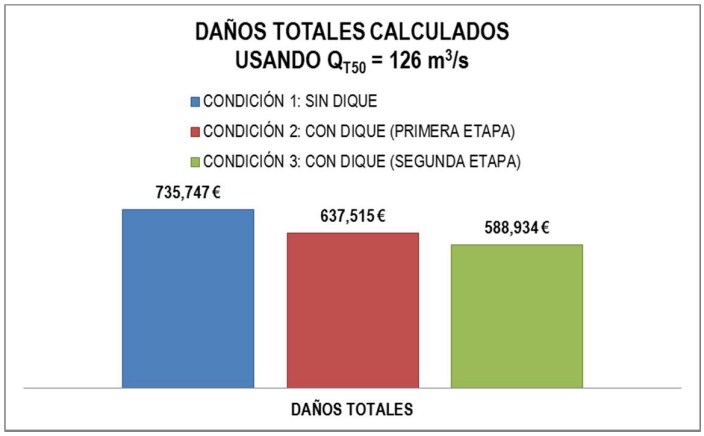


***Tabla A6-16.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 10 | 14,270 € | 36,508 € |
| INF_CAR | 4 | 113,412 € | 131,071 € |
| M_BAJO | 63 | 31,703 € | 90,837 € |
| NO_RUSTICO | 11 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 114 | 23,377 € | 89,608 € |
| SEC | 69 | 2,591 € | 29,947 € |
| **TOTAL** | **271** | | **377,971 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 10 | 14,276 € | 36,481 € |
| INF_CAR | 4 | 113,182 € | 130,094 € |
| M_BAJO | 65 | 31,698 € | 90,954 € |
| NO_RUSTICO | 11 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 115 | 23,377 € | 89,690 € |
| SEC | 69 | 2,591 € | 29,908 € |
| **TOTAL** | **274** | | **377,127 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 9 | 14,275 € | 34,340 € |
| INF_CAR | 4 | 113,678 € | 127,800 € |
| M_BAJO | 65 | 31,710 € | 91,297 € |
| NO_RUSTICO | 11 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 117 | 23,377 € | 90,183 € |
| SEC | 69 | 2,591 € | 28,057 € |
| **TOTAL** | **275** | | **371,677 €** |

***Figura A6-16.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$*

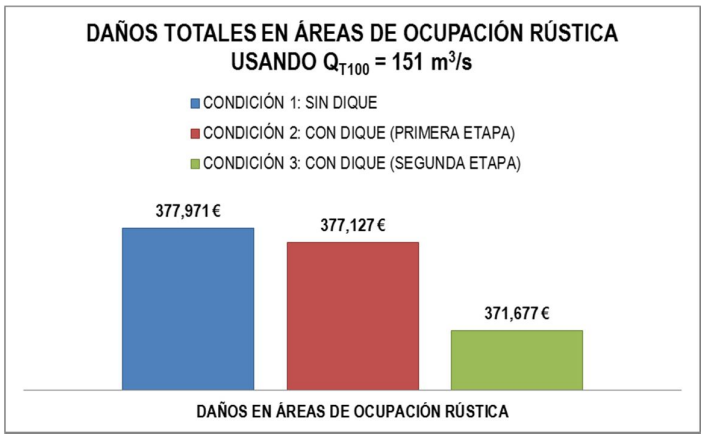


*Tabla A6-17. Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 1 | 546 € | 546 € |
| ES_L | 10 | 1,566 € | 7,285 € |
| NO_CONST | 63 | 0 € | 0 € |
| V1O | 39 | 10,560 € | 254,547 € |
| V1P | 3 | 12,216 € | 29,650 € |
| V2O | 26 | 9,622 € | 146,736 € |
| V2P | 7 | 10,345 € | 63,503 € |
| **TOTAL** | 149 | | 502,268 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 1 | 493 € | 493 € |
| ES_L | 10 | 1,566 € | 6,962 € |
| NO_CONST | 63 | 0 € | 0 € |
| V1O | 39 | 10,618 € | 232,958 € |
| V1P | 3 | 11,911 € | 29,195 € |
| V2O | 26 | 9,341 € | 136,567 € |
| V2P | 7 | 10,345 € | 62,501 € |
| **TOTAL** | 149 | | 468,676 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 1 | 594 € | 594 € |
| ES_L | 10 | 1,566 € | 5,524 € |
| NO_CONST | 62 | 0 € | 0 € |
| V1O | 37 | 10,156 € | 214,515 € |
| V1P | 3 | 10,429 € | 27,511 € |
| V2O | 24 | 9,341 € | 125,928 € |
| V2P | 7 | 10,345 € | 59,656 € |
| **TOTAL** | 144 | | 433,727 € |

***Figura A6-17.*** *Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$*

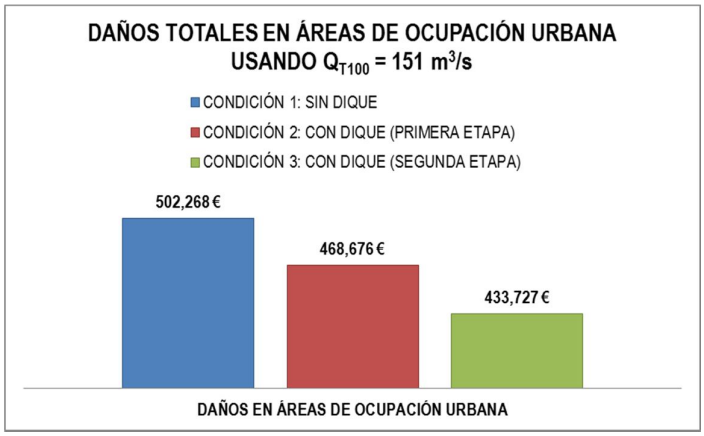



***Tabla A6-18.*** *Pérdidas en estructuras fijas para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 75,140 € | 103,416 € |
| **TOTAL** | 2 | | 103,416 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 82,354 € | 113,869 € |
| **TOTAL** | 2 | | 113,869 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 82,842 € | 121,098 € |
| **TOTAL** | 2 | | 121,098 € |

***Figura A6-18.*** *Pérdidas en estructuras fijas para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$*

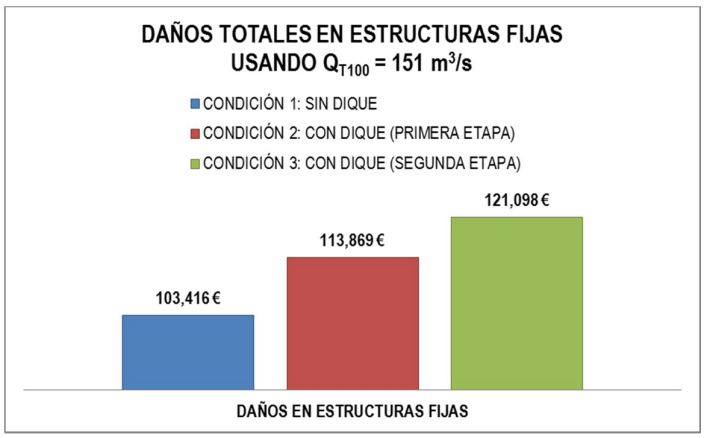


***Tabla A6-19.*** *Daños totales calculados para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 502,268 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 377,971 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 103,416 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **983,654 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 468,676 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 377,127 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 113,869 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **959,671 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 433,727 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 371,677 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 121,098 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **926,502 €** |

***Figura A6-19.*** *Daños totales calculados para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

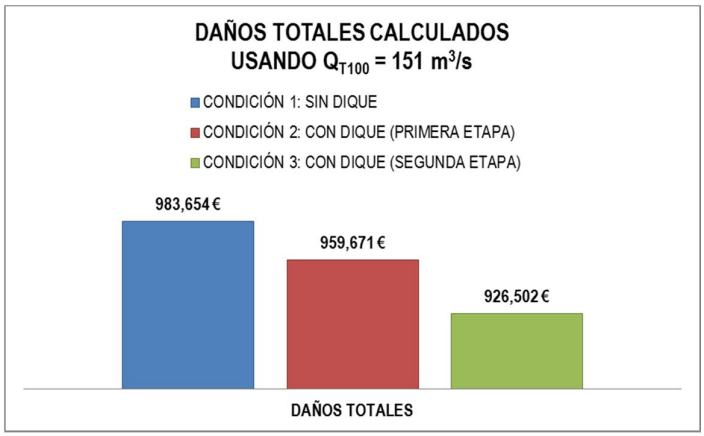


***Tabla A6-20.*** *Daños totales calculados para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 502,268 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 258,416 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 103,416 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **864,099 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 468,676 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 257,528 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 113,869 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **840,073 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 433,727 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 253,437 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 121,098 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **808,262 €** |

***Figura A6-20.*** *Daños totales calculados para $Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

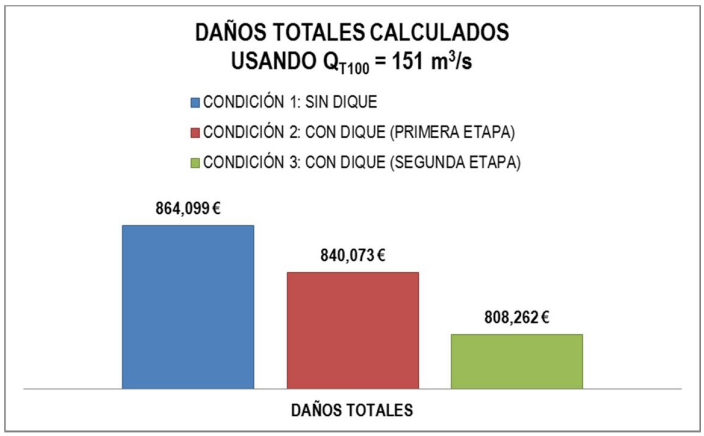


***Tabla A6-21.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 10 | 14,151 € | 39,736 € |
| INF_CAR | 4 | 70,365 € | 99,114 € |
| M_BAJO | 78 | 38,623 € | 111,366 € |
| NO_RUSTICO | 11 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 123 | 23,377 € | 100,241 € |
| SEC | 86 | 3,749 € | 45,278 € |
| **TOTAL** | **312** | | **395,734 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 10 | 14,151 € | 39,880 € |
| INF_CAR | 4 | 70,850 € | 99,660 € |
| M_BAJO | 79 | 38,623 € | 111,473 € |
| NO_RUSTICO | 11 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 123 | 23,377 € | 100,440 € |
| SEC | 86 | 3,749 € | 45,400 € |
| **TOTAL** | **313** | | **396,853 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| INF_CAM | 10 | 14,151 € | 39,020 € |
| INF_CAR | 4 | 70,945 € | 98,281 € |
| M_BAJO | 79 | 38,630 € | 111,778 € |
| NO_RUSTICO | 11 | 0 € | 0 € |
| PASTO | 123 | 23,377 € | 100,859 € |
| SEC | 86 | 3,749 € | 45,157 € |
| **TOTAL** | **313** | | **395,096 €** |

***Figura A6-21.*** *Pérdidas en ocupación rústica para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$*

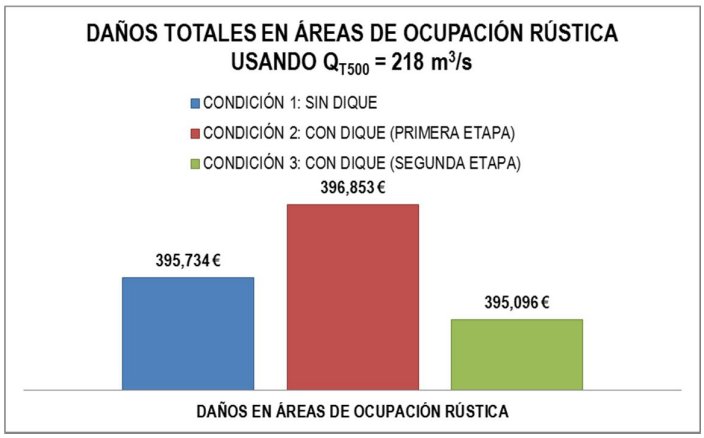


***Tabla A6-22.*** *Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T500} = 218\ m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 1 | 6,087 € | 6,087 € |
| ES_L | 14 | 1,873 € | 10,816 € |
| NO_CONST | 69 | 0 € | 0 € |
| V1O | 42 | 11,559 € | 344,648 € |
| V1P | 5 | 13,527 € | 48,610 € |
| V2O | 27 | 9,765 € | 184,144 € |
| V2P | 7 | 10,560 € | 67,205 € |
| **TOTAL** | 165 | | 661,511 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 1 | 6,994 € | 6,994 € |
| ES_L | 14 | 1,873 € | 10,940 € |
| NO_CONST | 68 | 0 € | 0 € |
| V1O | 42 | 11,567 € | 346,861 € |
| V1P | 5 | 13,488 € | 49,833 € |
| V2O | 27 | 9,782 € | 185,320 € |
| V2P | 7 | 12,133 € | 68,801 € |
| **TOTAL** | 164 | | 668,750 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ES_I | 1 | 7,322 € | 7,322 € |
| ES_L | 14 | 1,873 € | 10,537 € |
| NO_CONST | 69 | 0 € | 0 € |
| V1O | 42 | 11,740 € | 343,787 € |
| V1P | 5 | 12,834 € | 49,488 € |
| V2O | 26 | 9,800 € | 173,985 € |
| V2P | 7 | 10,637 € | 66,884 € |
| **TOTAL** | 164 | | 652,004 € |

***Figura A6-22.*** *Pérdidas en áreas urbanas para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$*

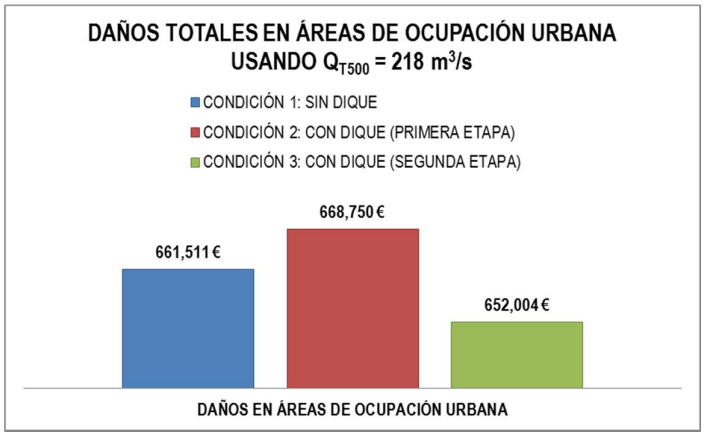



***Tabla A6-23.*** *Pérdidas en estructuras fijas para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 73,433 € | 118,061 € |
| **TOTAL** | 2 | | 118,061 € |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de construcción** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 79,380 € | 124,997 € |
| **TOTAL** | 2 | | 124,997 € |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | | | |
| **Tipo de terreno** | **Número de elementos** | **Pérdida máxima** | **Pérdidas totales** |
| ESTRUC_FIJAS | 2 | 80,172 € | 131,870 € |
| **TOTAL** | 2 | | 131,870 € |

***Figura A6-23.*** *Pérdidas en estructuras fijas para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$*

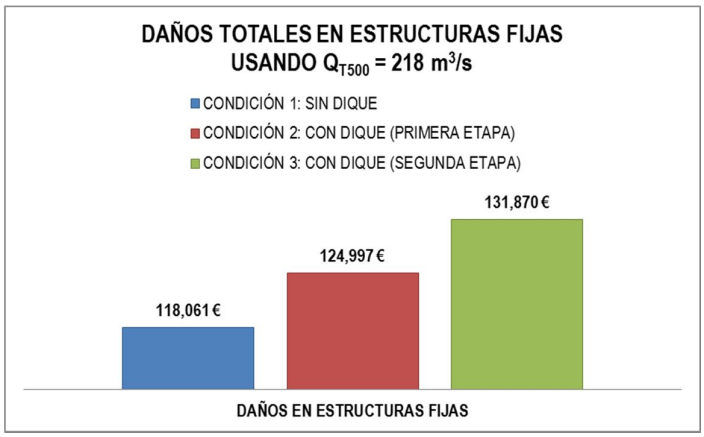


***Tabla A6-24.*** *Daños totales calculados para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 661,511 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 395,734 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 118,061 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **1,175,306 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 668,750 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 396,853 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 124,997 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **1,190,600 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 652,004 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 395,096 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 131,870 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **1,178,970 €** |

***Figura A6-24.*** *Daños totales calculados para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ (Considerando afectación máxima a ocupación rústica por labor agrícola activa).*

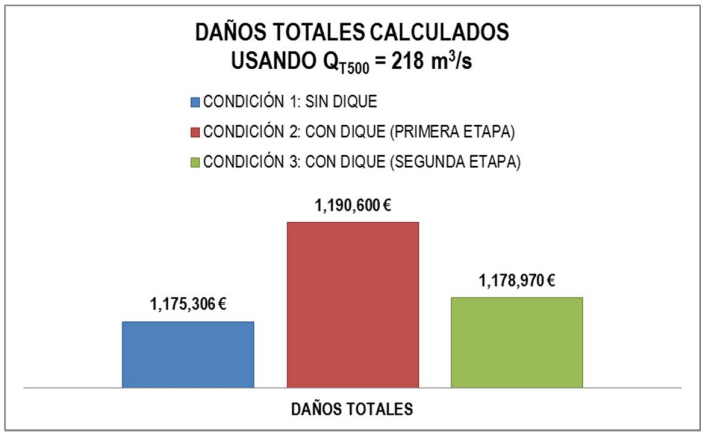
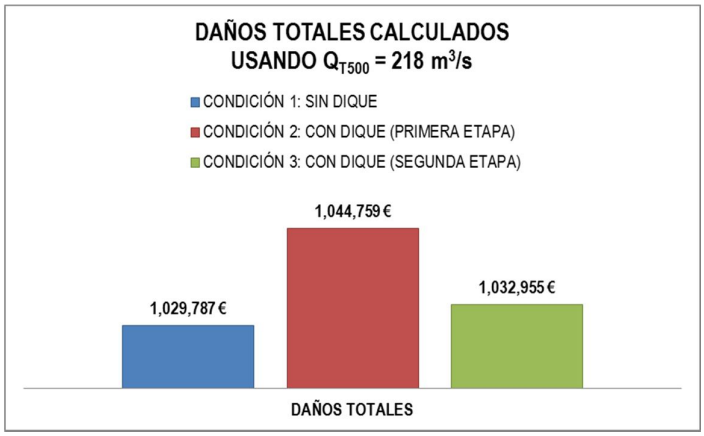


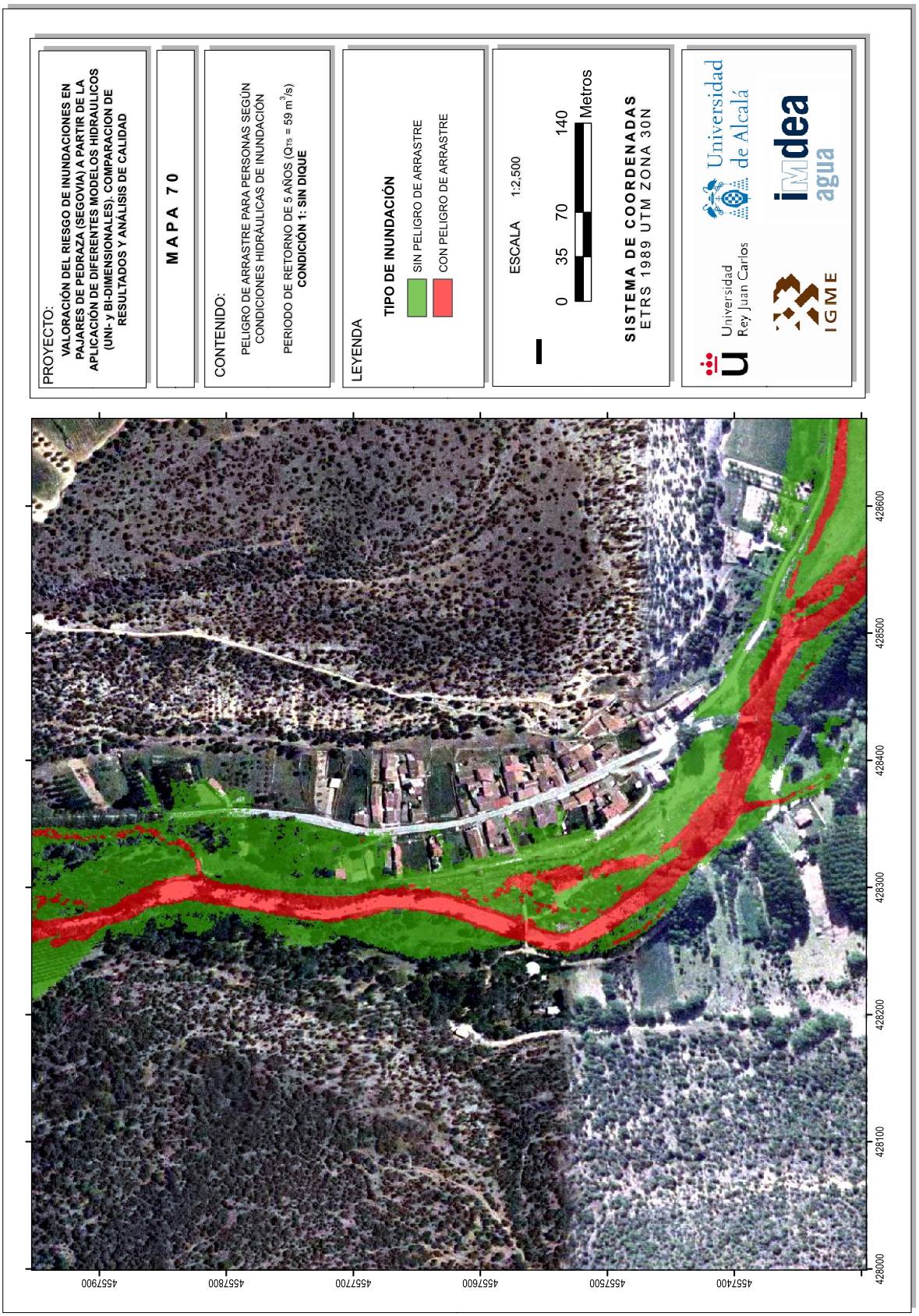
***Tabla A6-25.*** *Daños totales calculados para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

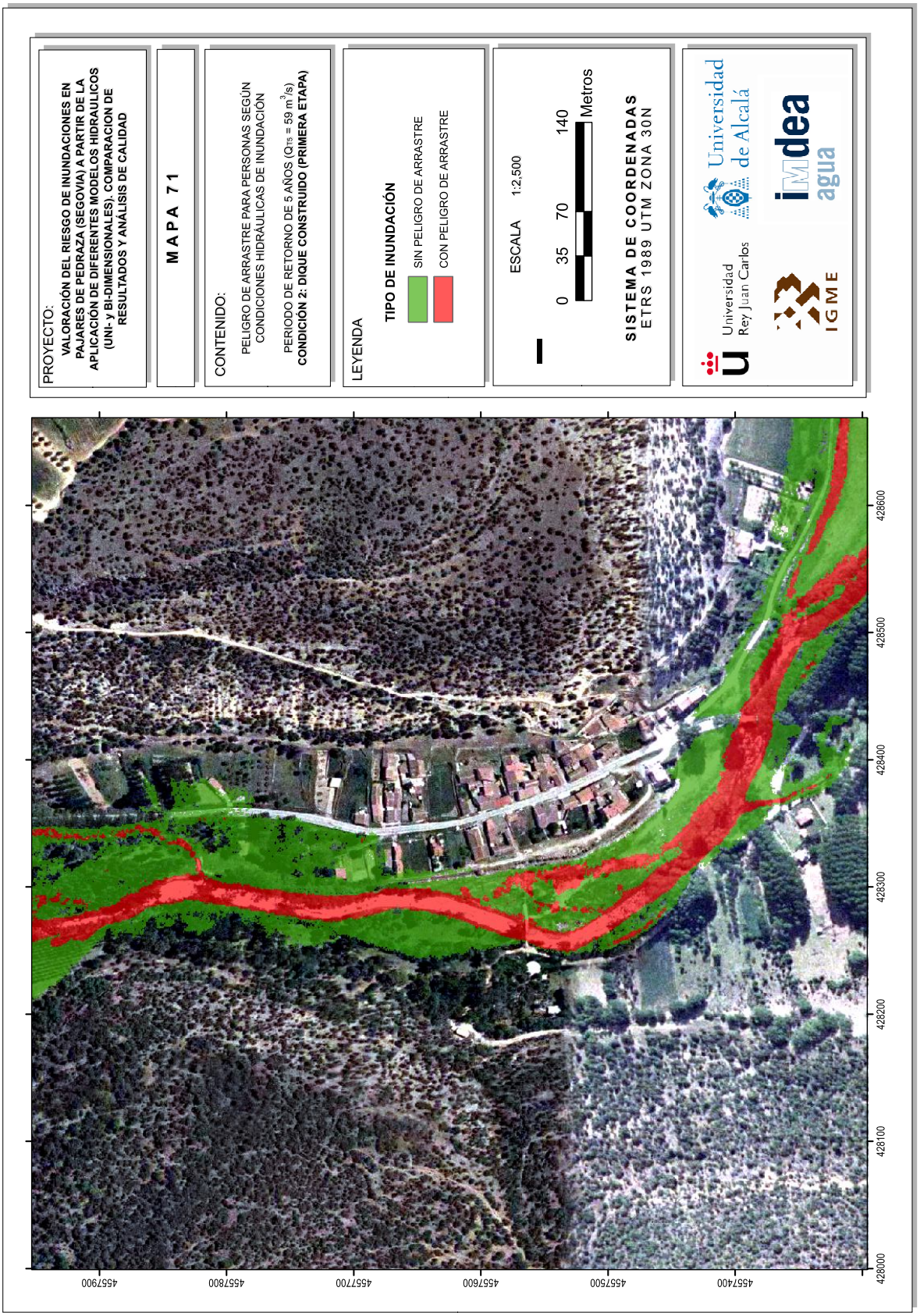
| CONDICIÓN 1: SIN DIQUE | |
|---|---|
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 661,511 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 250,216 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 118,061 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **1,029,787 €** |
| **CONDICIÓN 2: CON DIQUE (PRIMERA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 668,750 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 251,013 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 124,997 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **1,044,759 €** |
| **CONDICIÓN 3: CON DIQUE (SEGUNDA ETAPA)** | |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN URBANA | 652,004 € |
| DAÑOS EN OCUPACIÓN RÚSTICA | 249,080 € |
| DAÑOS EN ESTRUCTURAS FIJAS | 131,870 € |
| **DAÑOS CALCULADOS** | **1,032,955 €** |

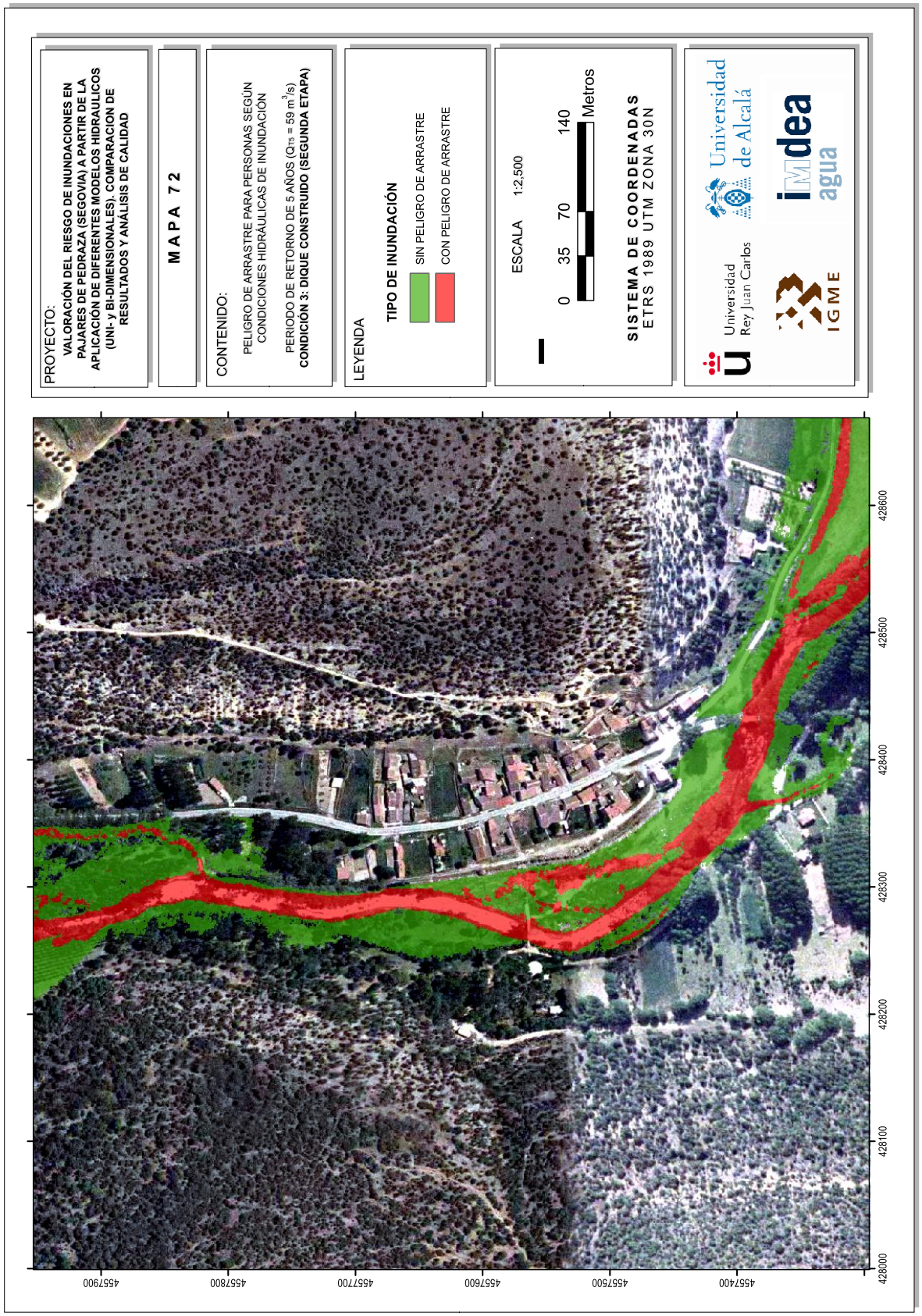
***Figura A6-25.*** *Daños totales calculados para $Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$ (Considerando afectación mínima a ocupación rústica por labor agrícola inactiva).*

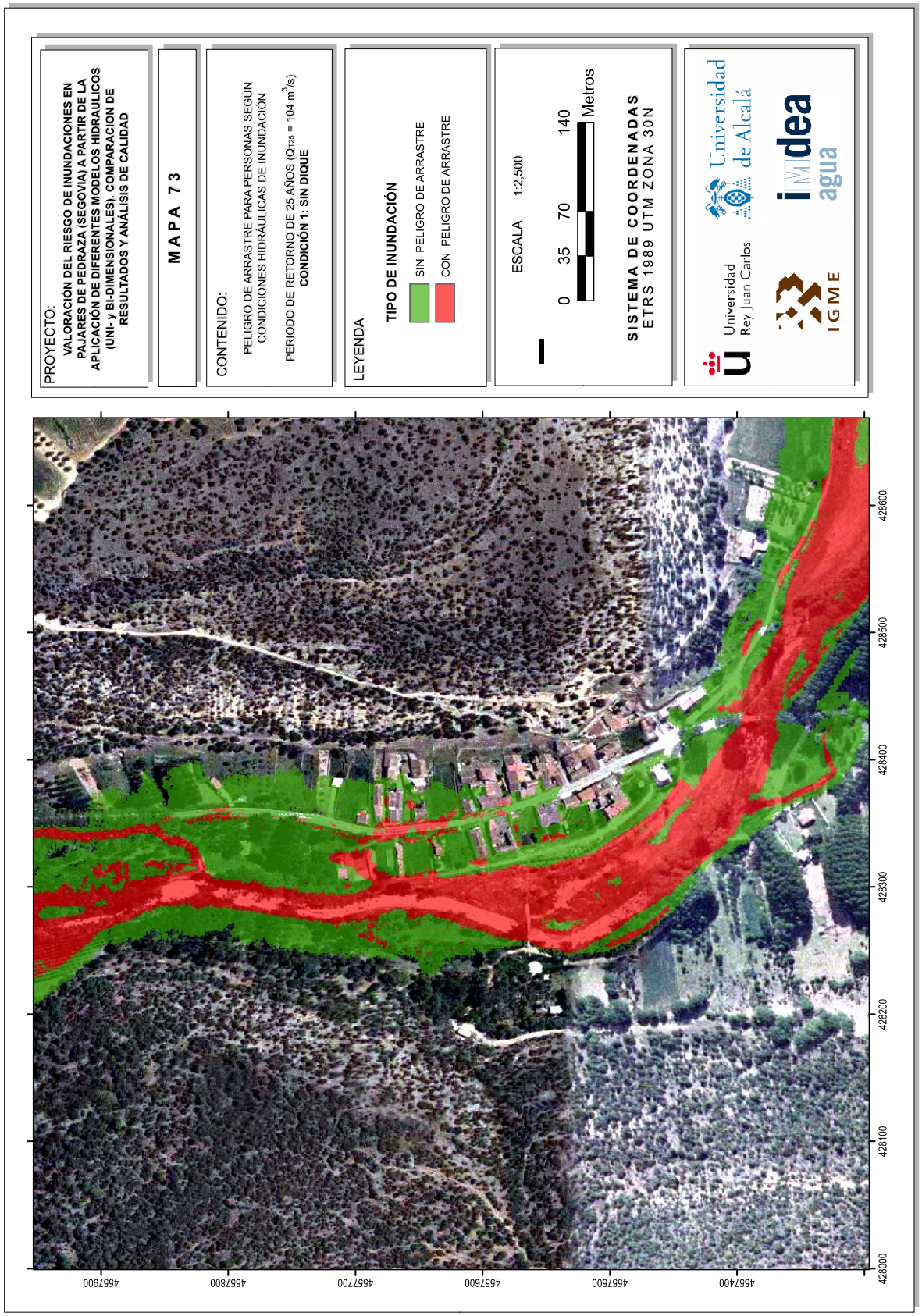


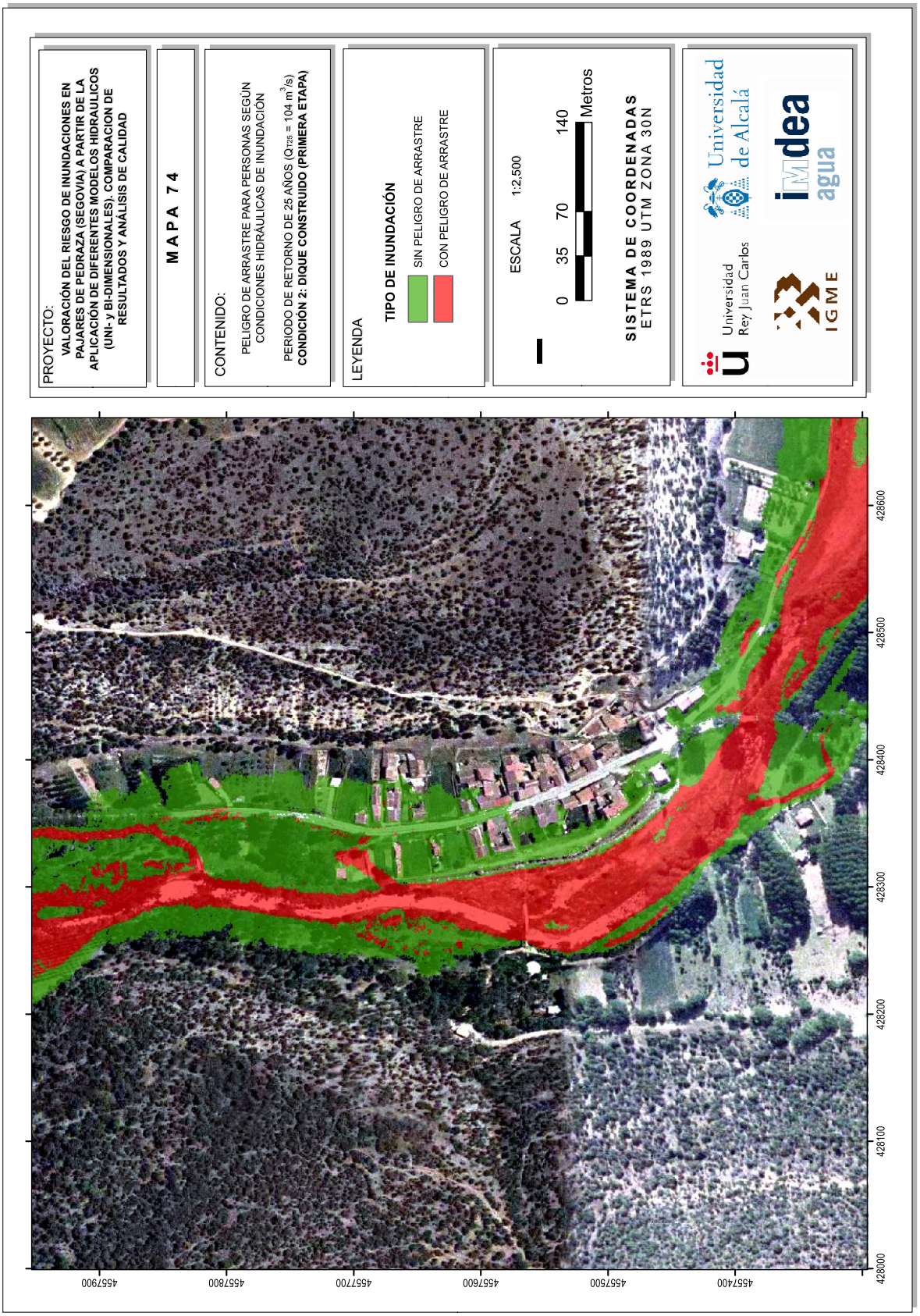
## 10.7. ANEXO 7. MAPAS DE ZONAS DE RIESGO DE ARRASTRE DE PERSONAS EN LA ZONA DE ESTUDIO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS.




PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 71
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Qts = 59 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
idea agua
IGME
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 72
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (Qts = 59 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IMDEA agua
IGME
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 73
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
idea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 74
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
idea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 75

CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN

PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)**

LEYENDA

**TIPO DE INUNDACIÓN**

SIN PELIGRO DE ARRASTRE

CON PELIGRO DE ARRASTRE

ESCALA 1:2,500

0 35 70 140 Metros

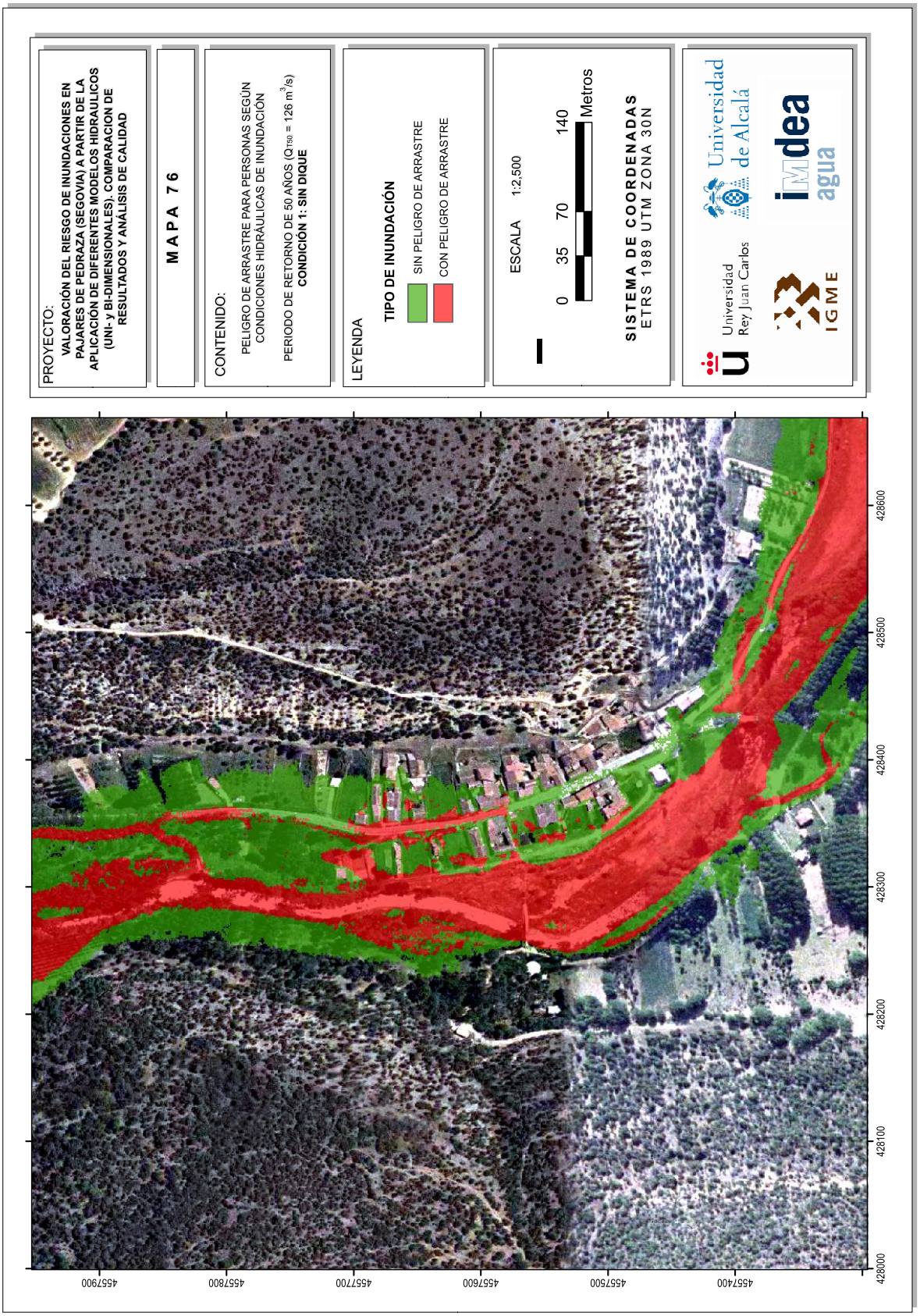
**SISTEMA DE COORDENADAS**
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

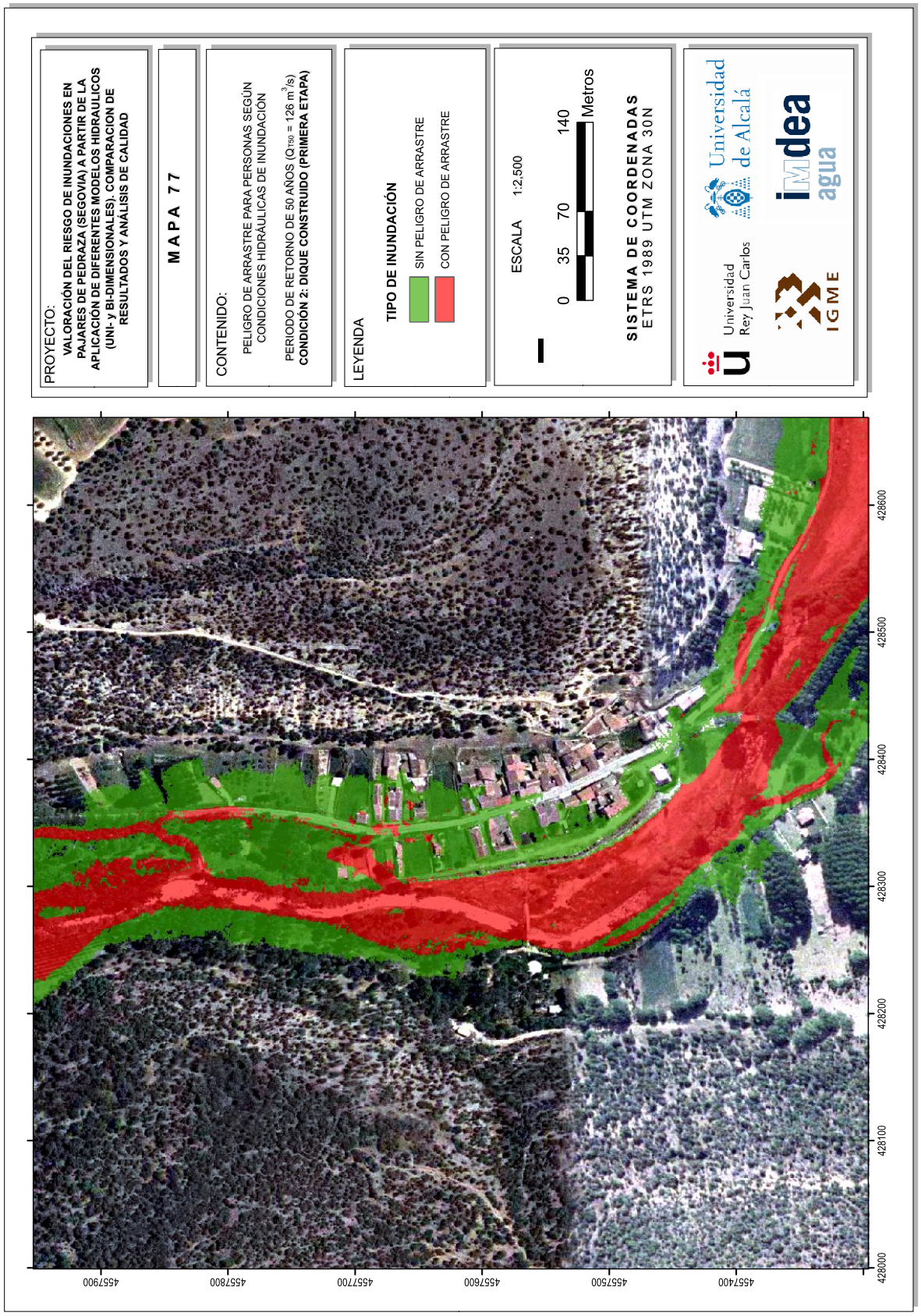
Universidad Rey Juan Carlos

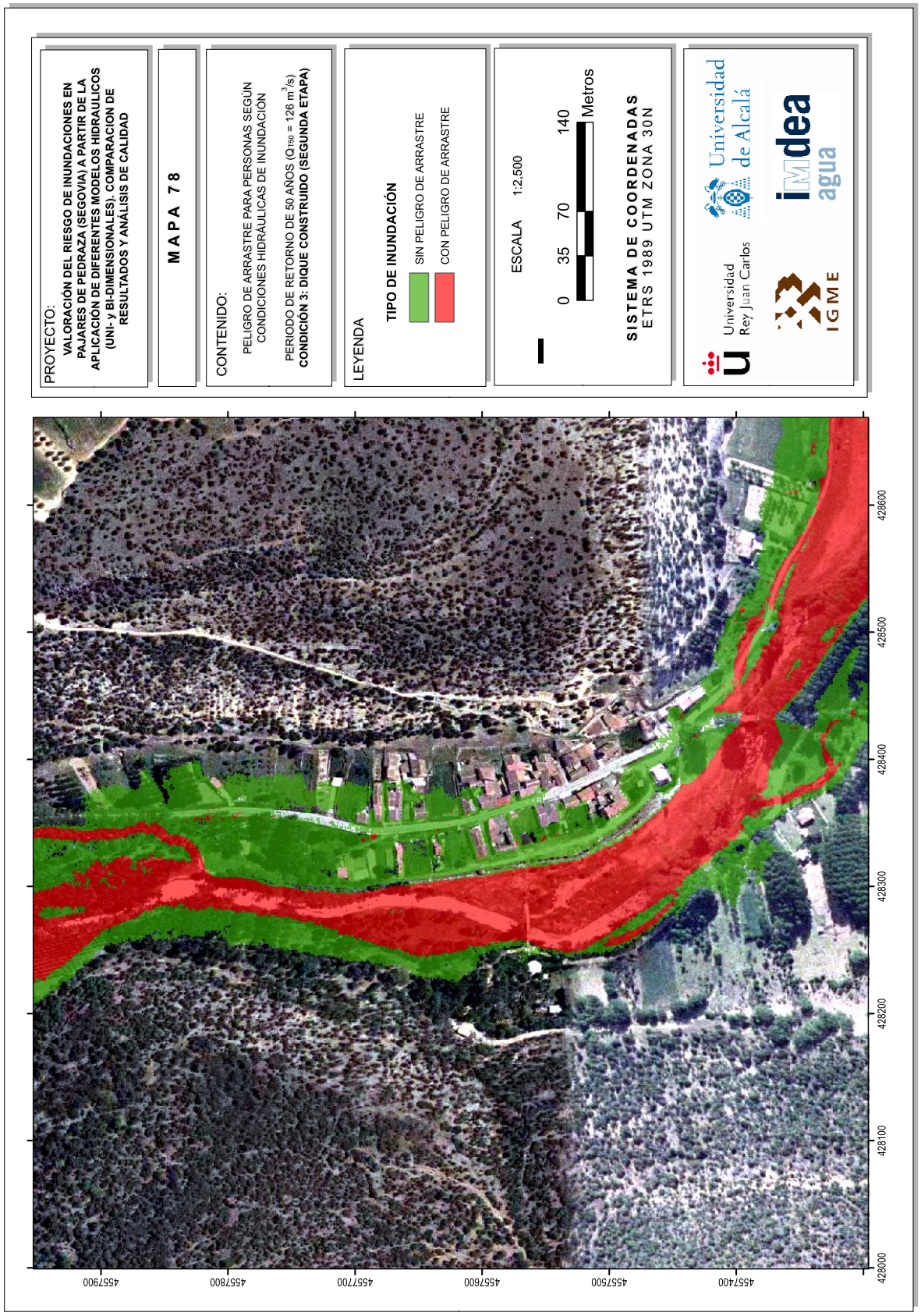
Universidad de Alcalá

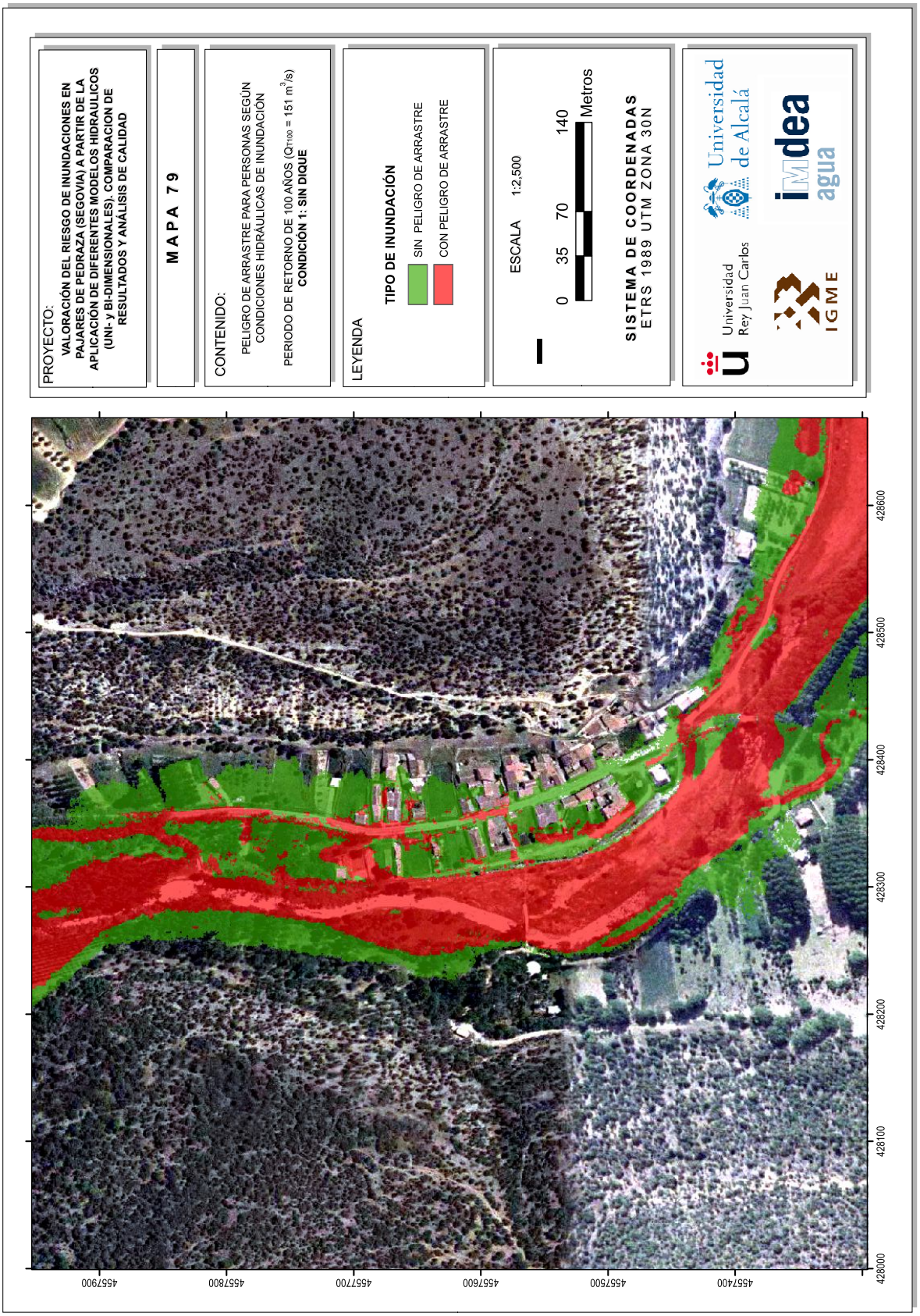
idea agua

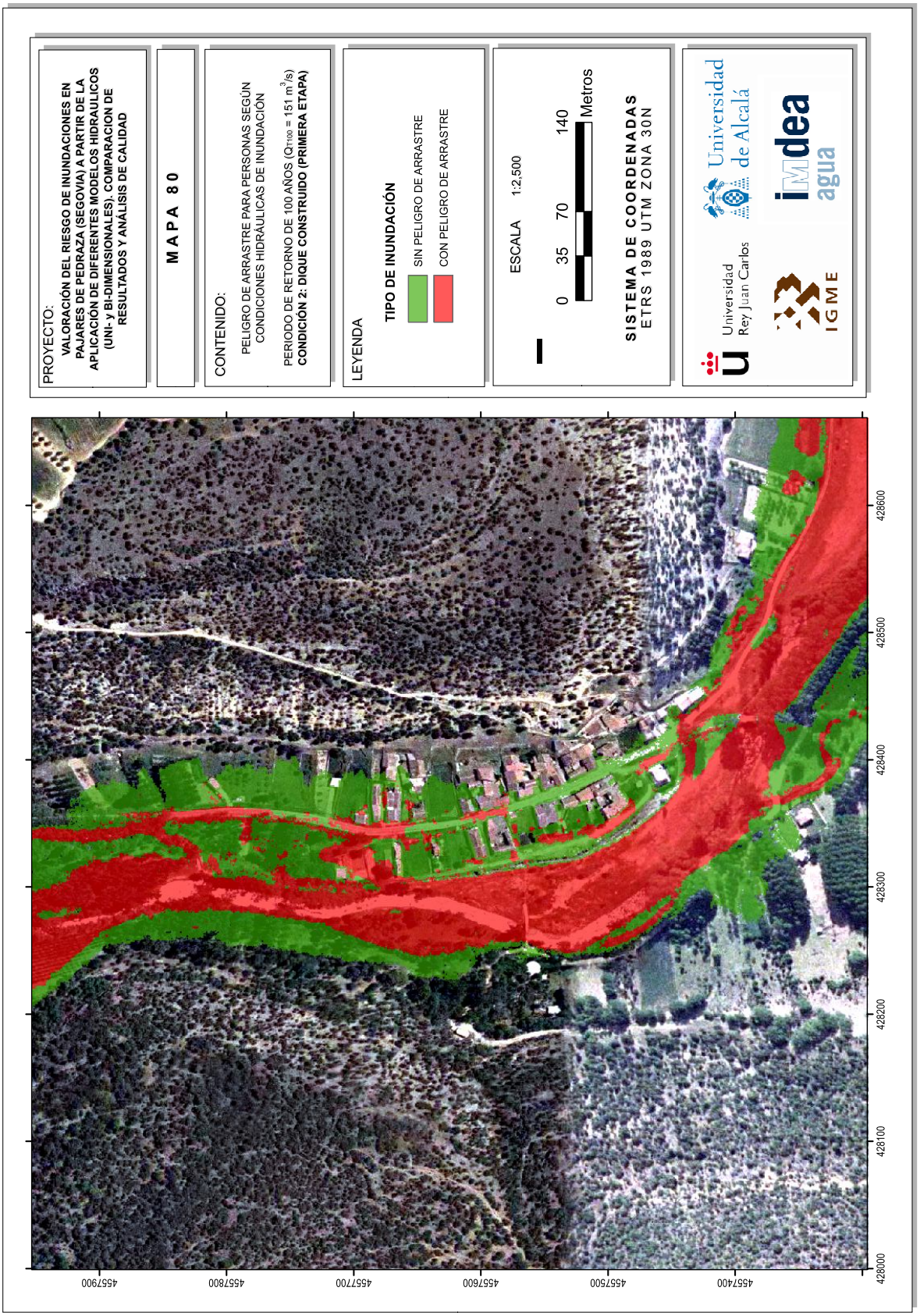
IGME

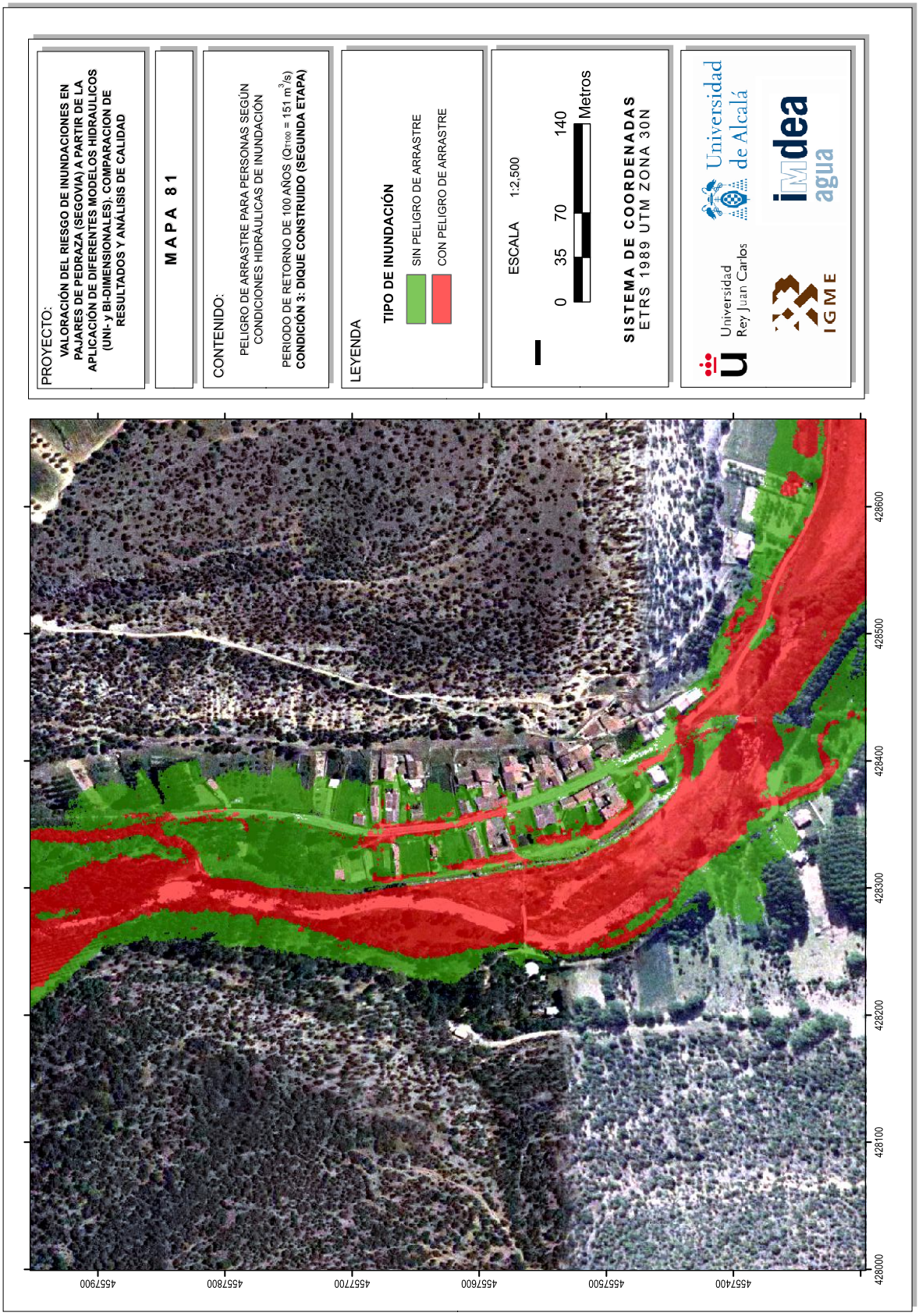

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 76
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
idea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

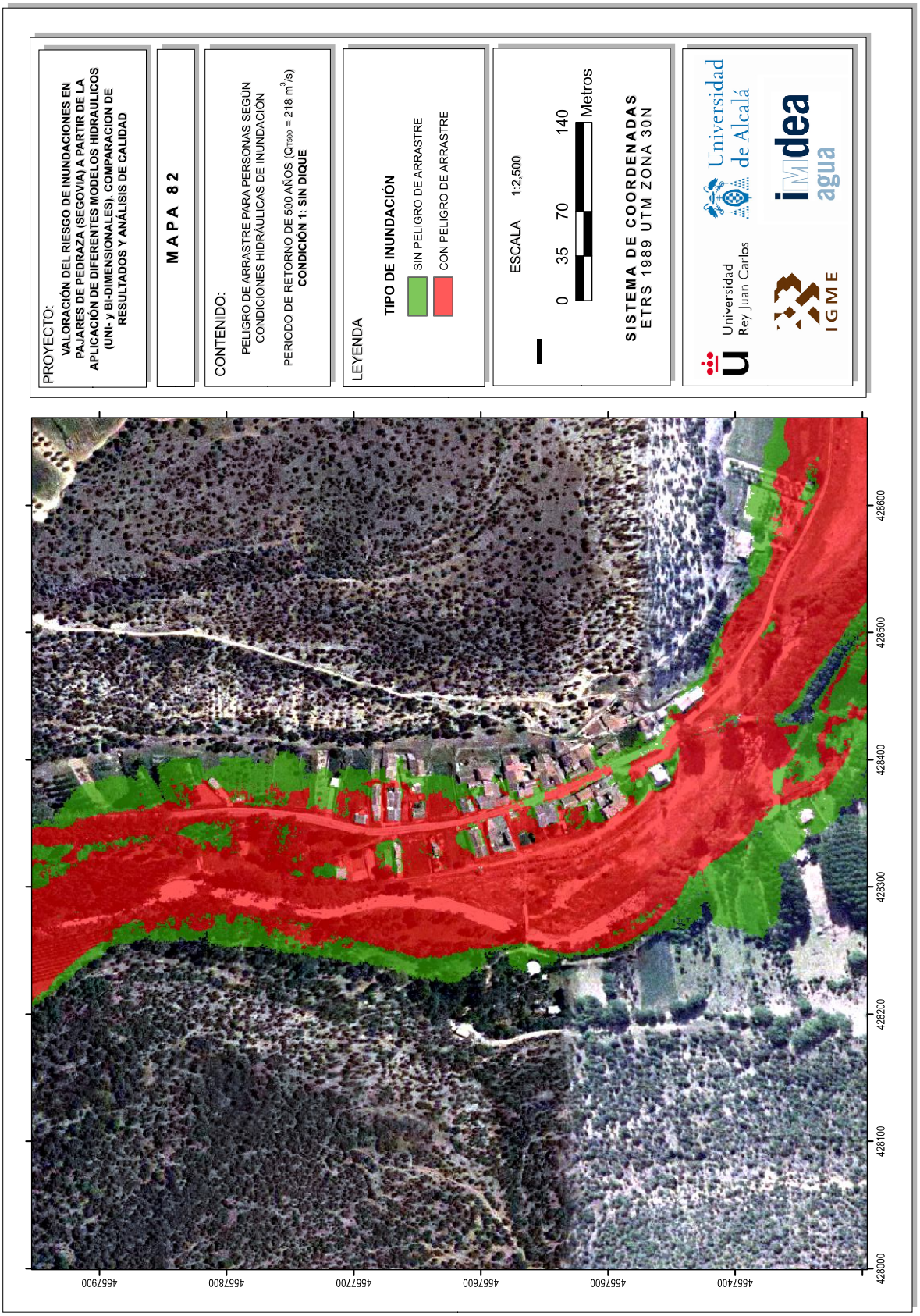

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 77
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IMdea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

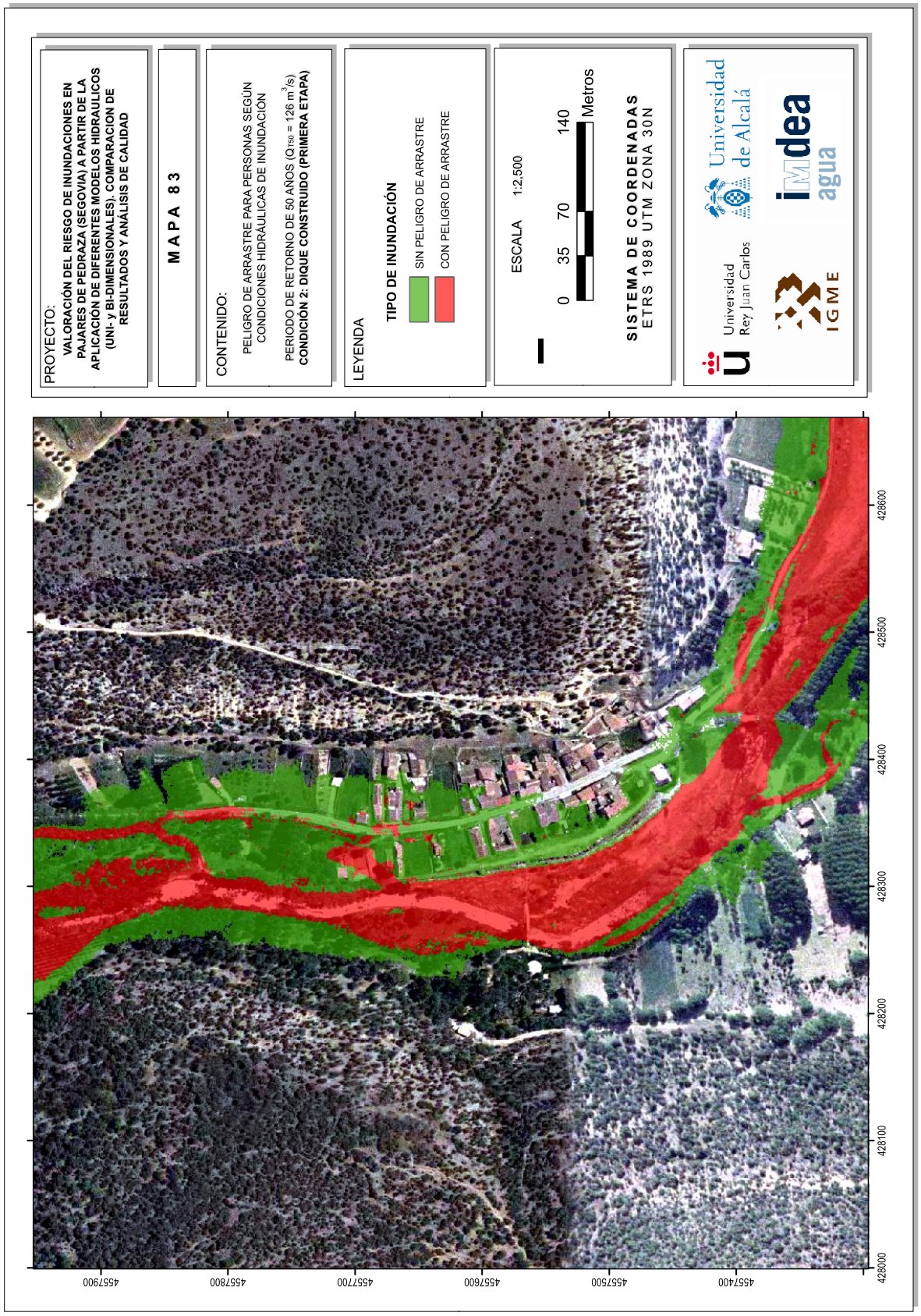

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 78
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
idea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

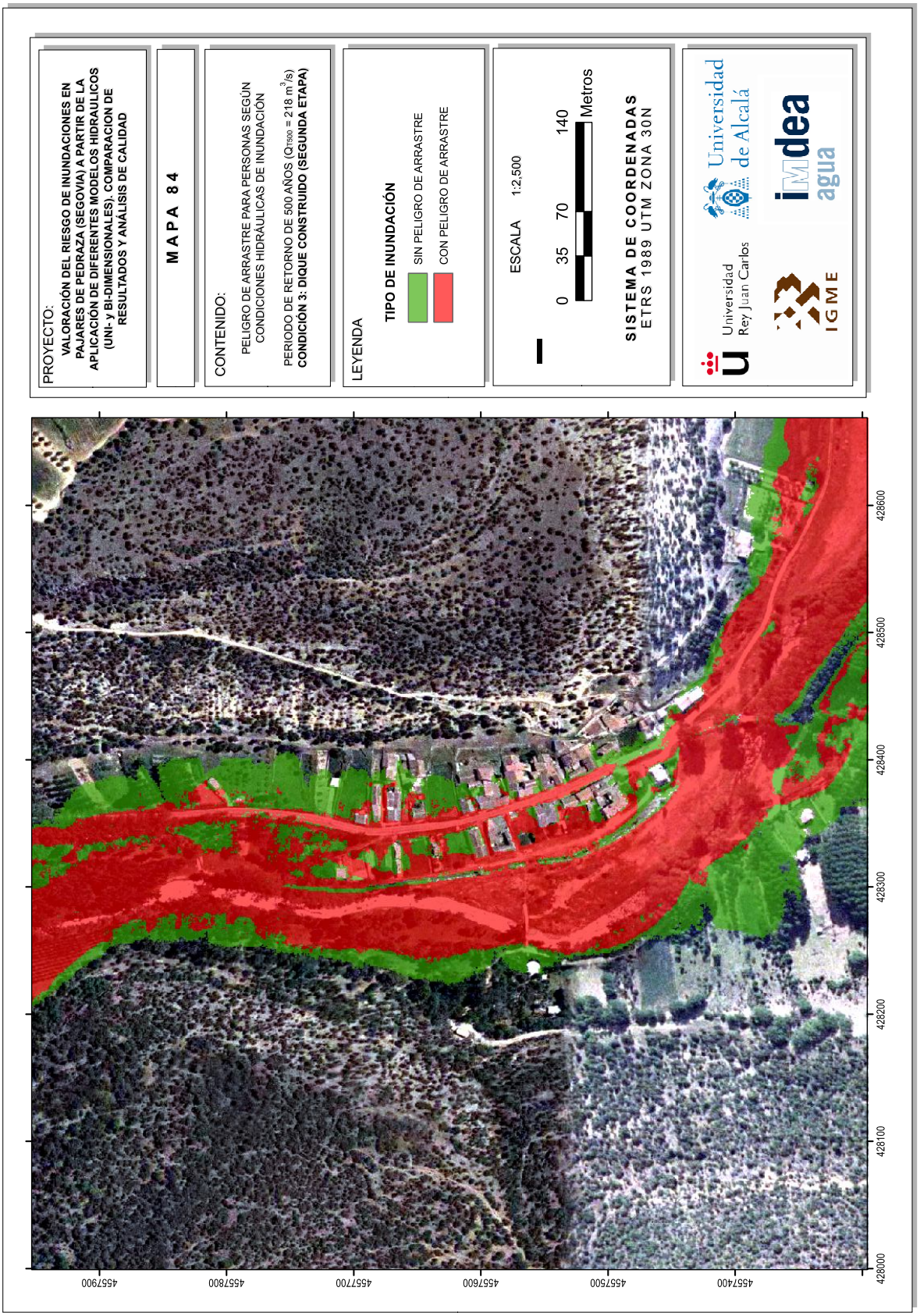

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 79
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IMDEA agua
IGME
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 80
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IMdea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

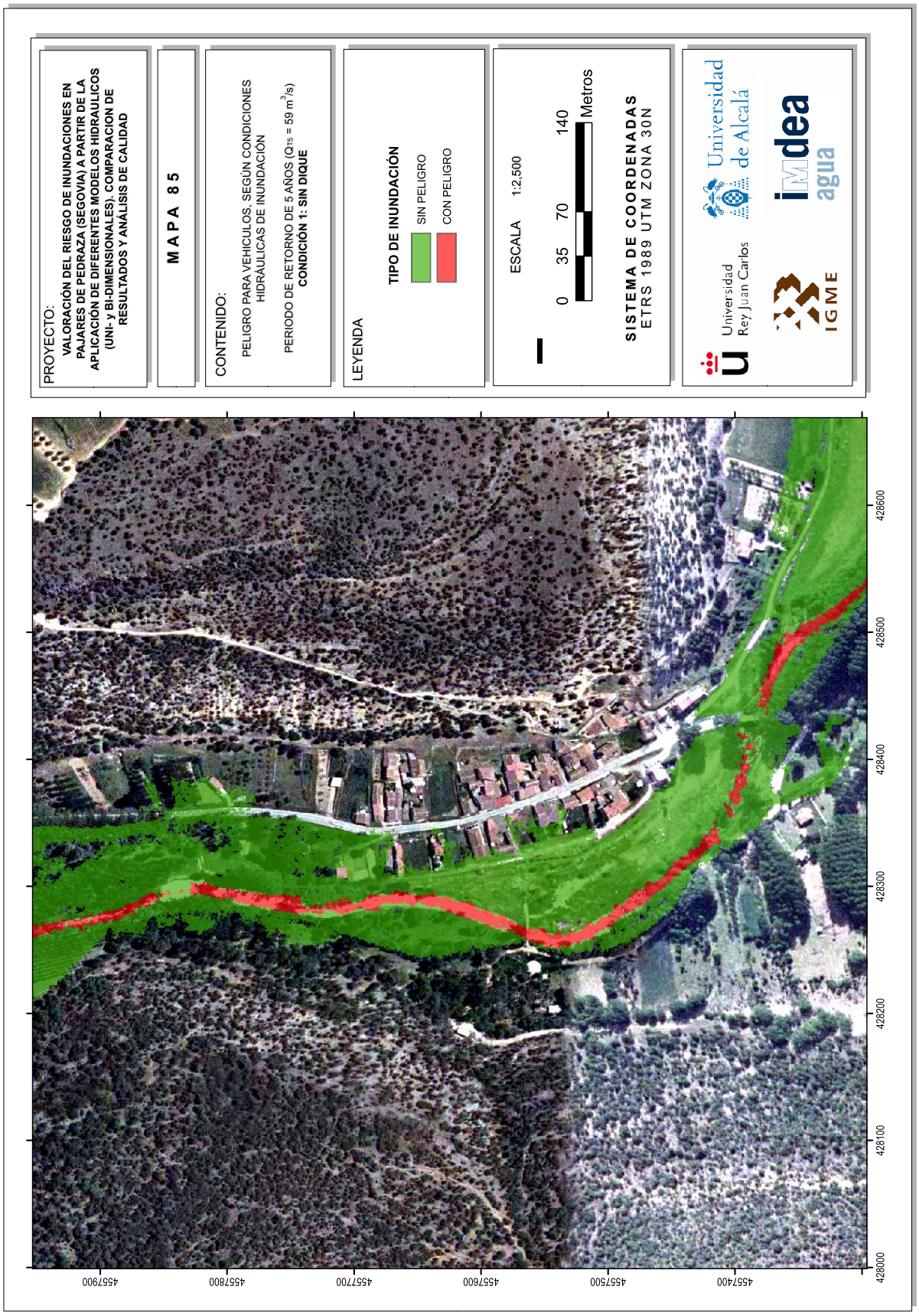

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 81
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IMDEA agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

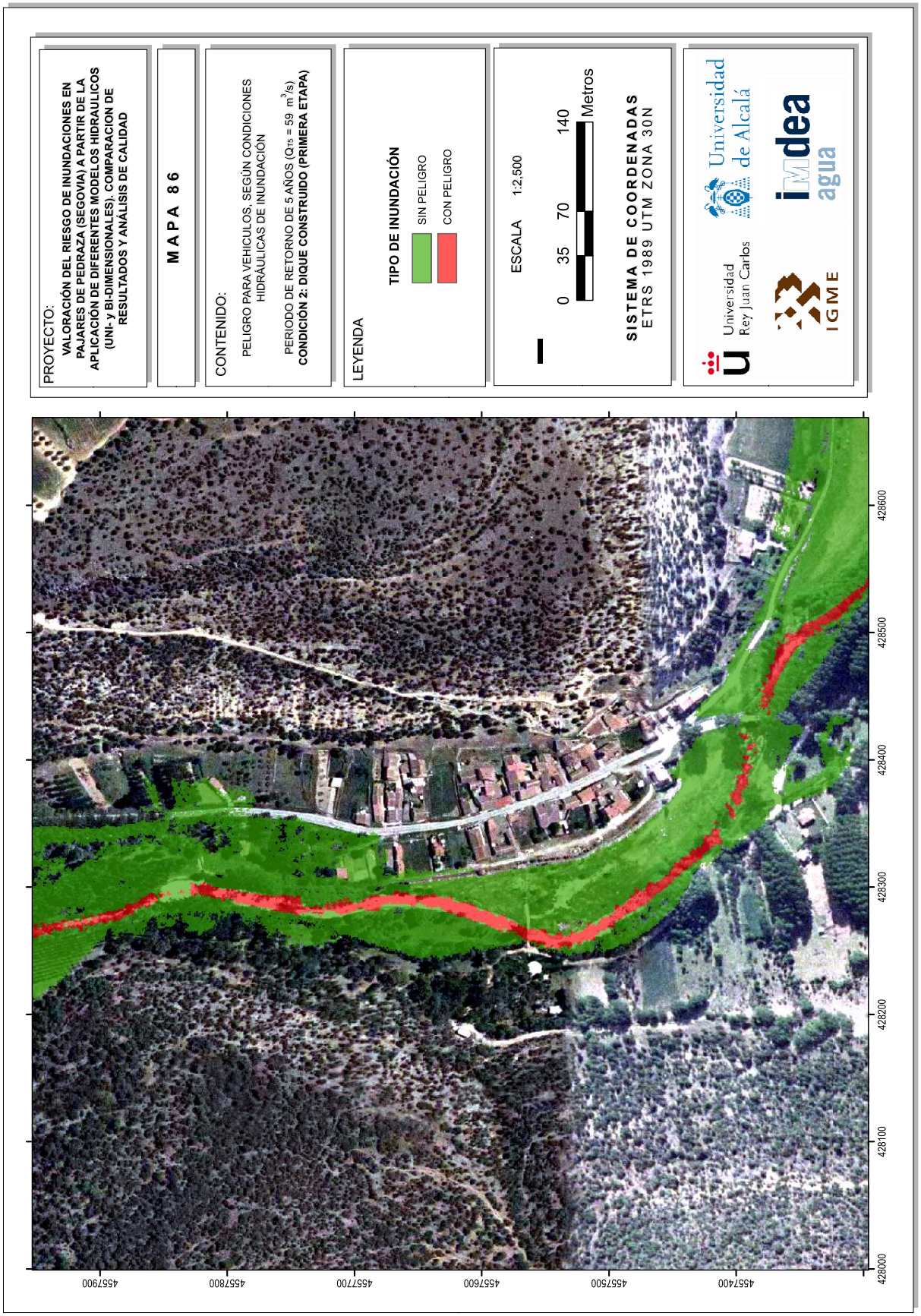

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 82
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IMDEA agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

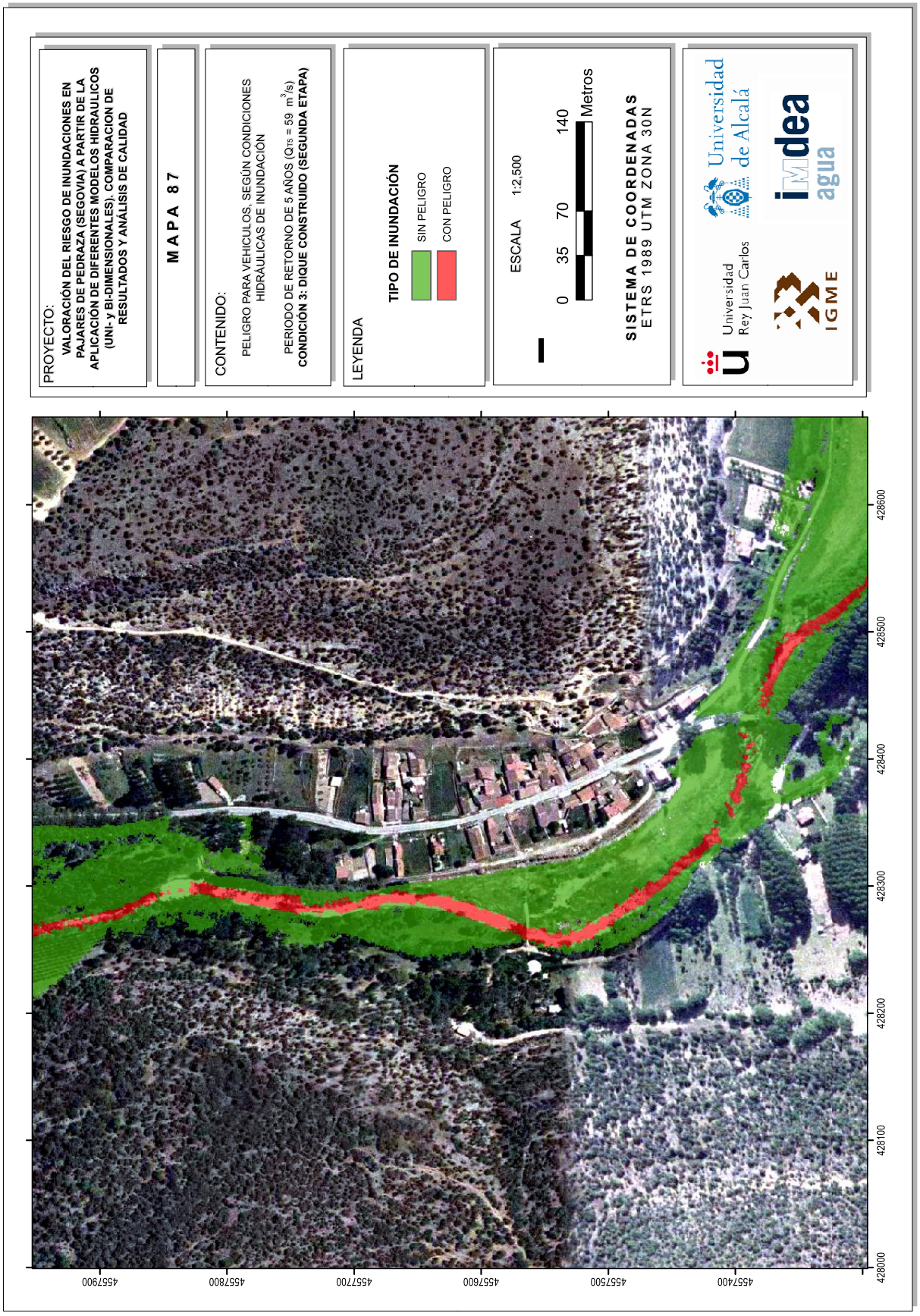

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 83
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IMdea agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 84
CONTENIDO:
PELIGRO DE ARRASTRE PARA PERSONAS SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE ARRASTRE
CON PELIGRO DE ARRASTRE
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad Rey Juan Carlos
Universidad de Alcalá
IMDEA agua
IGME
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

## 10.8. ANEXO 8. MAPAS DE ZONAS DE RIESGO DE ARRASTRE DE VEHÍCULOS, DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS Y DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS.




PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 86
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (QT5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 87
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (QT5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 88

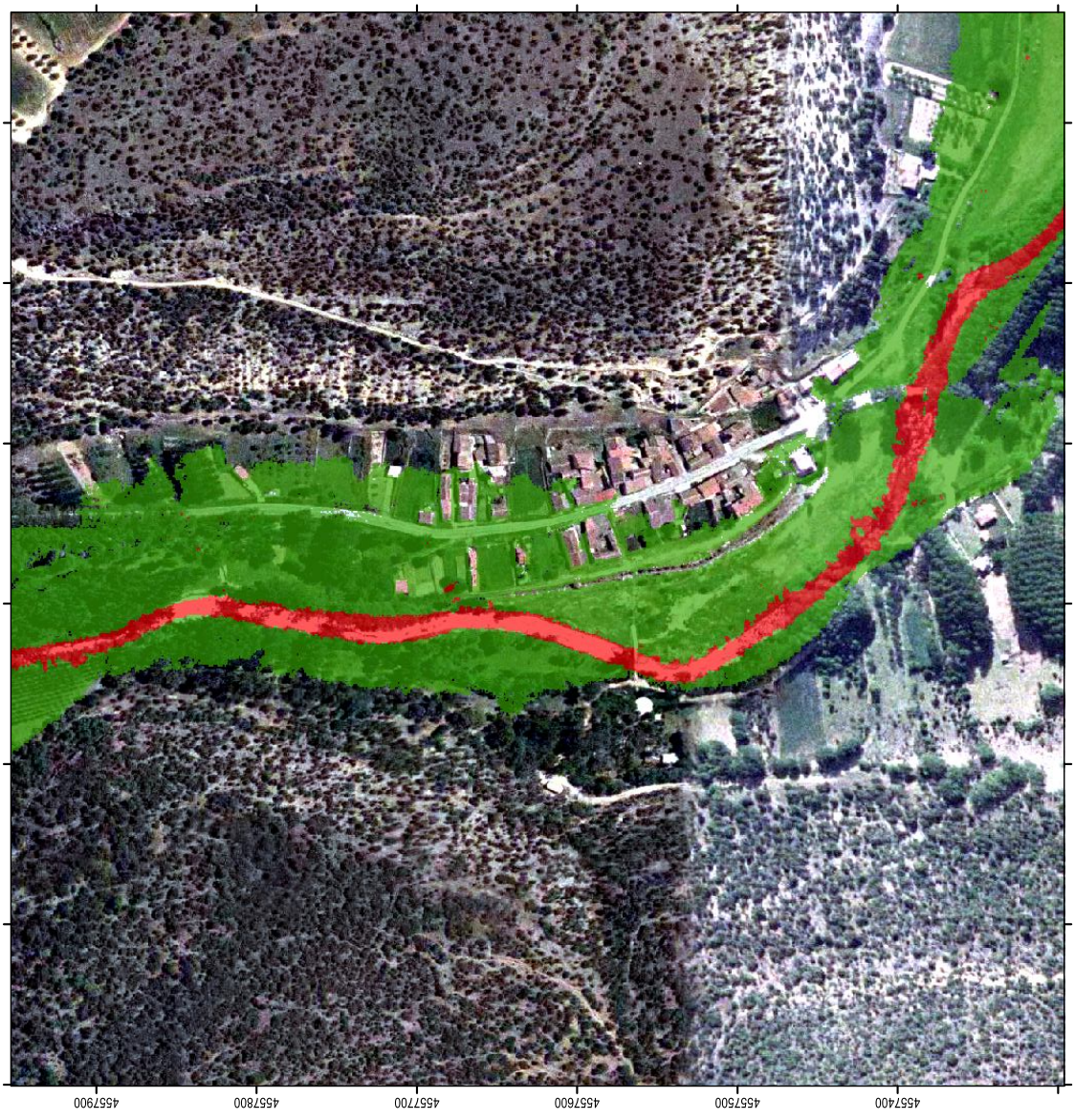
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 1: SIN DIQUE**

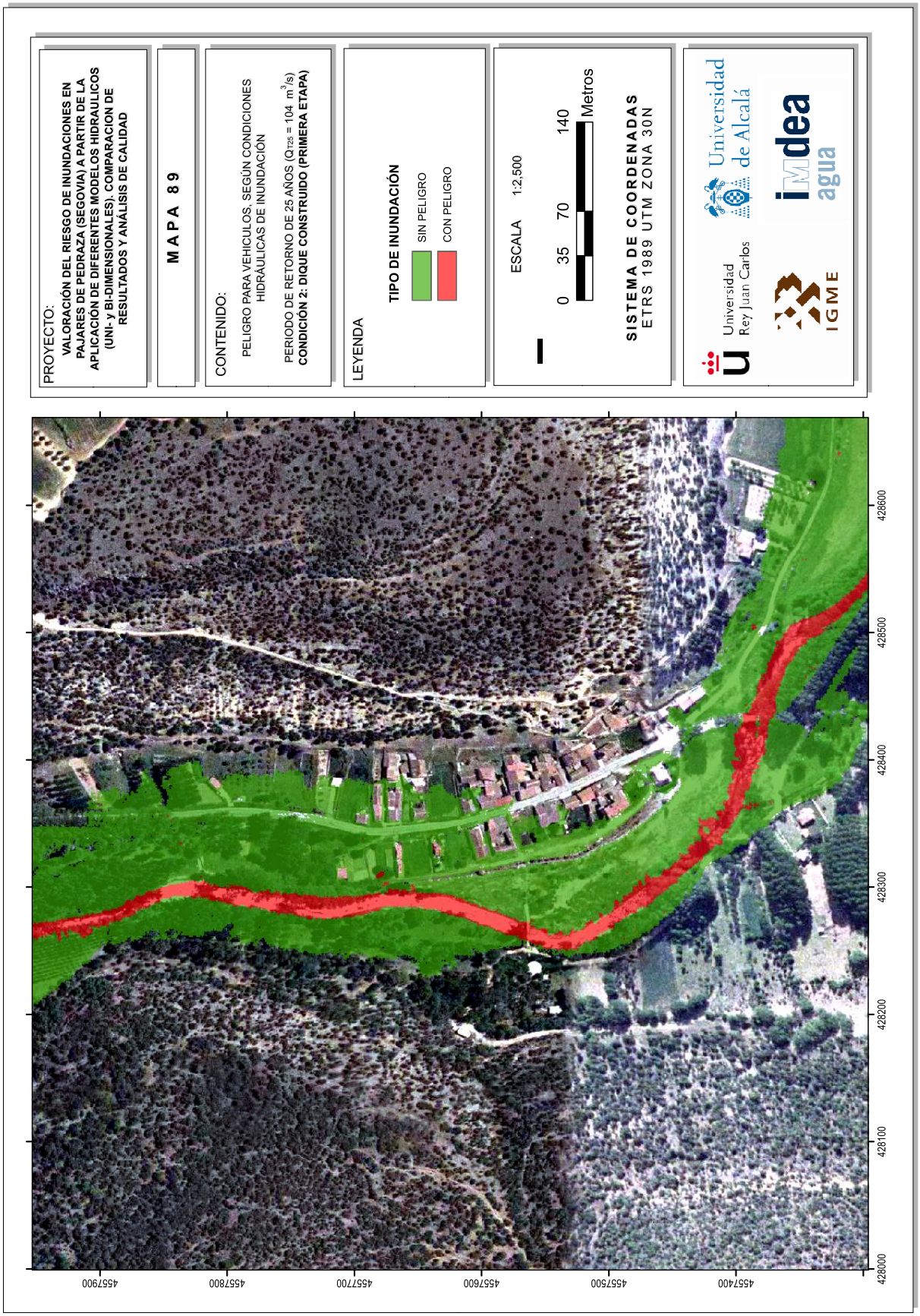
LEYENDA
**TIPO DE INUNDACIÓN**
SIN PELIGRO
CON PELIGRO

ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros

**SISTEMA DE COORDENADAS**
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
iMdea agua




PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 89
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 90

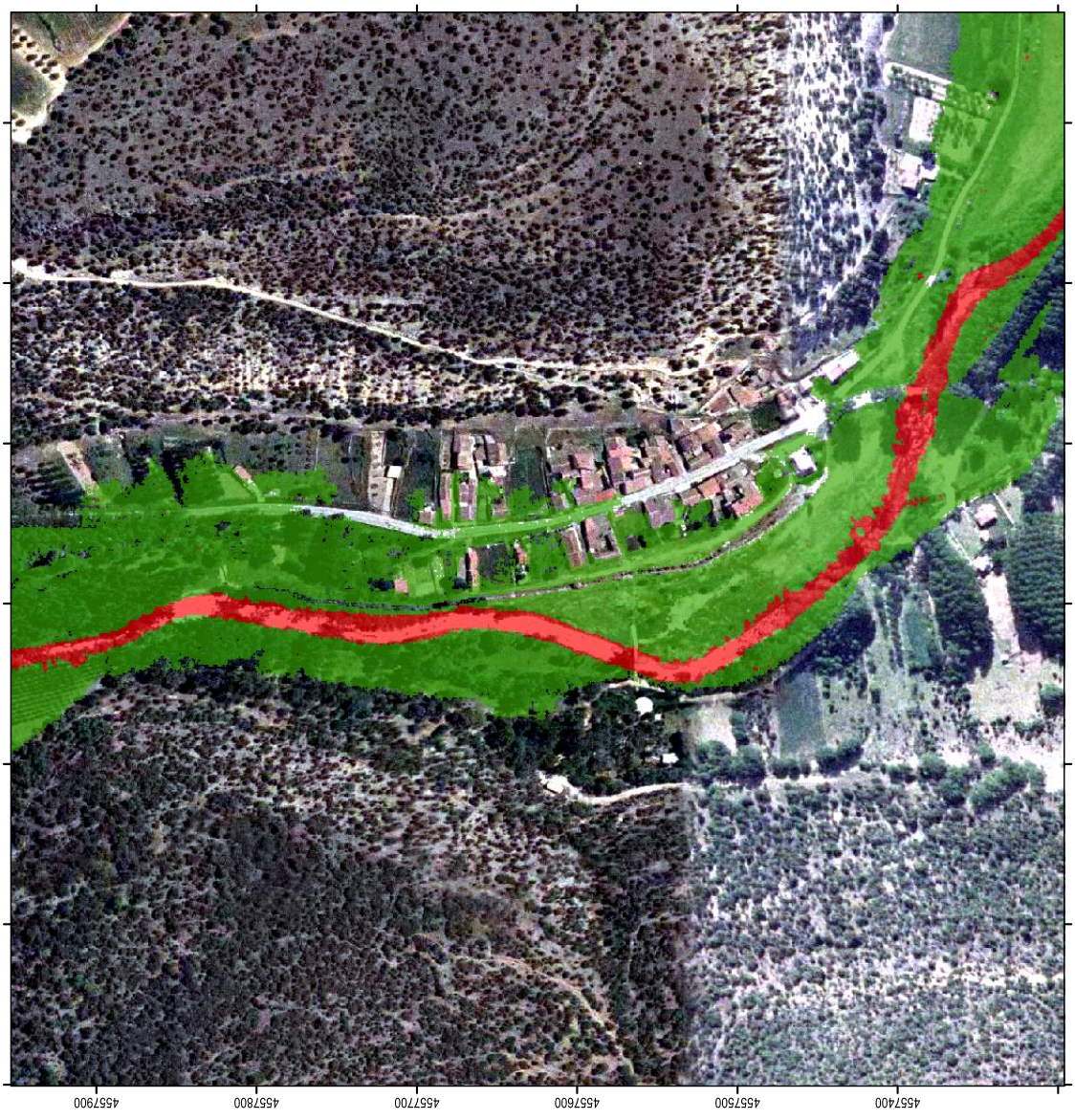
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)**

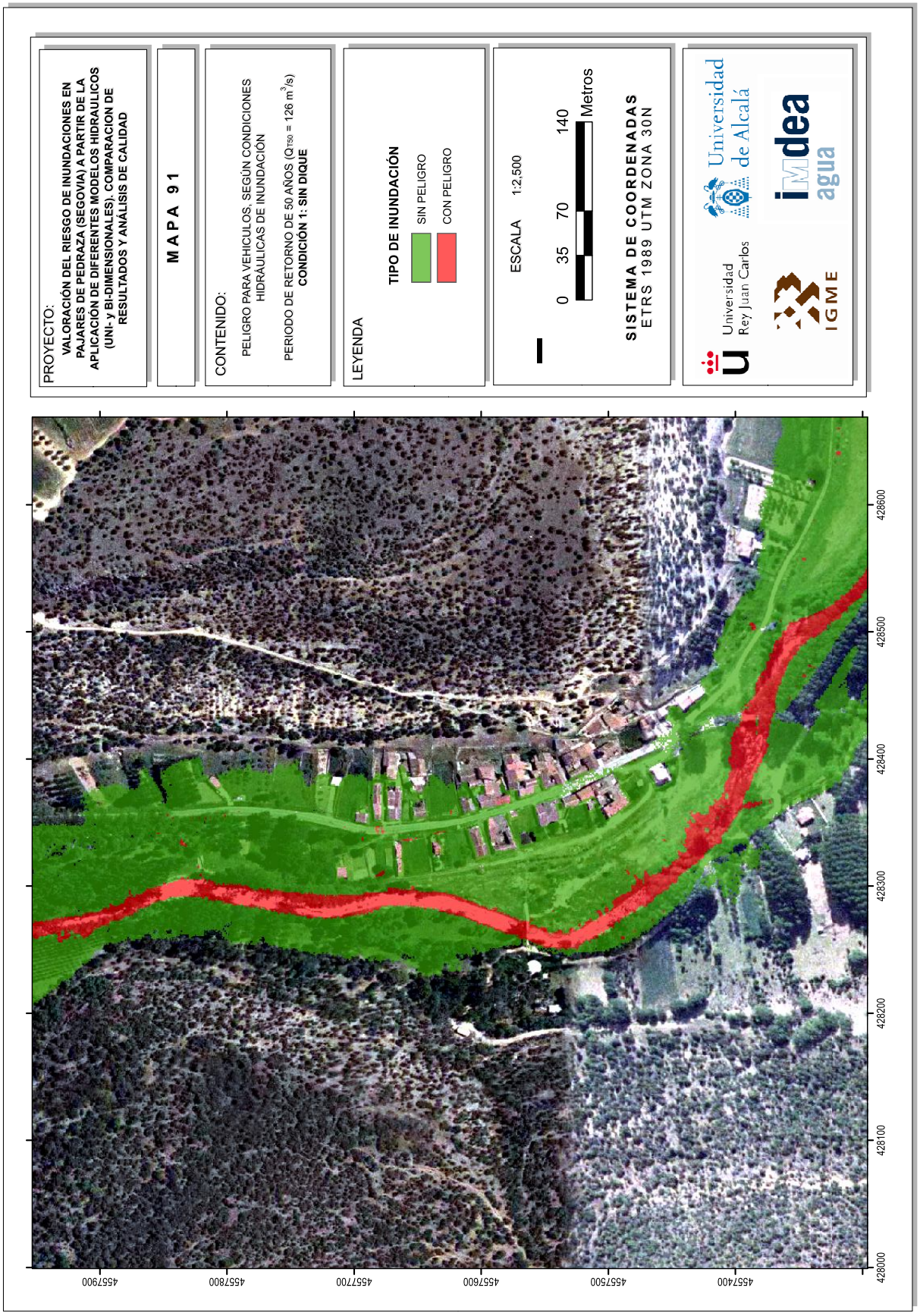
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO

ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua




PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 91
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 92

CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)**

LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO

ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 93

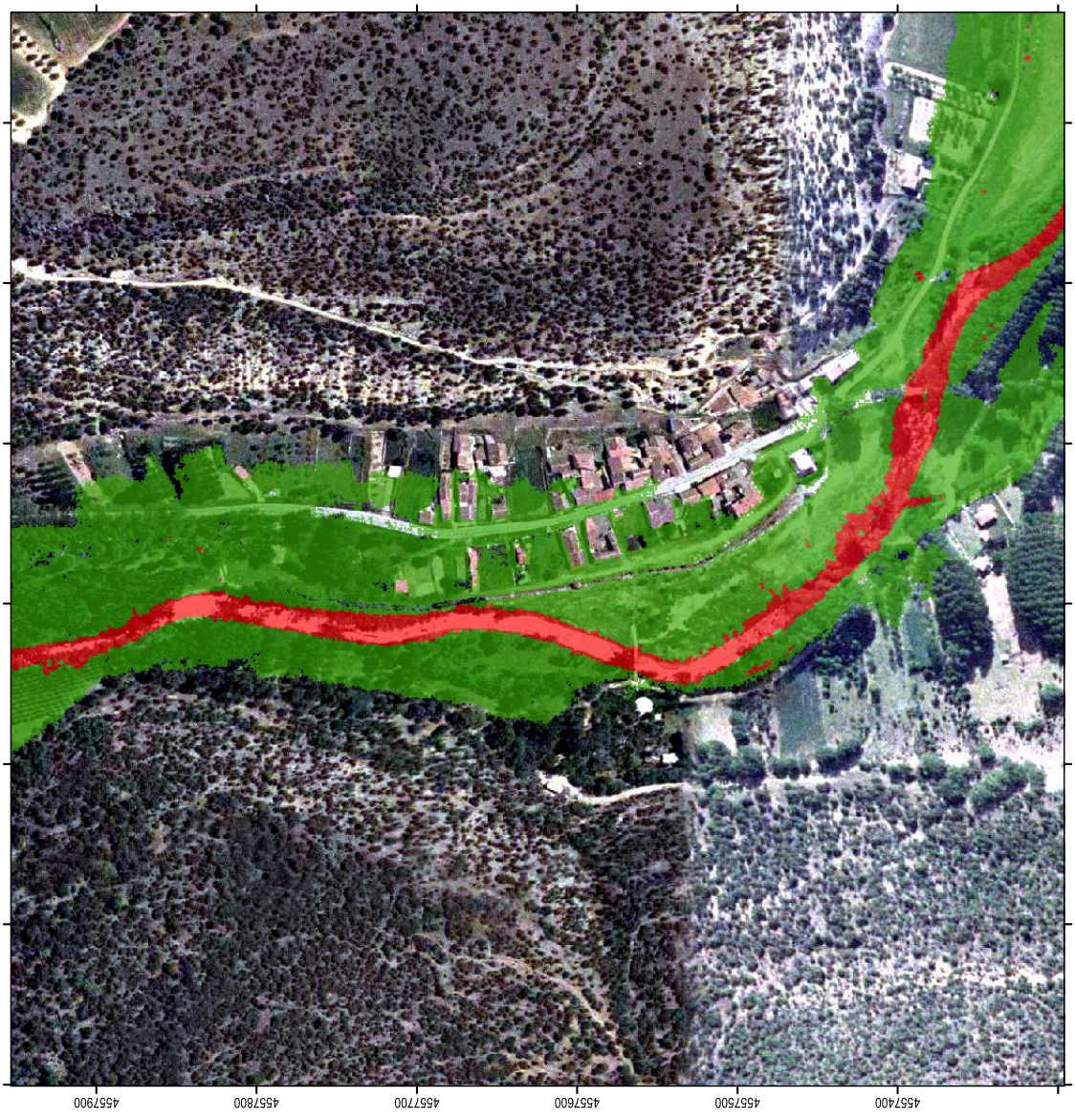
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)**

LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO

ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros

SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua



PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 94
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 95

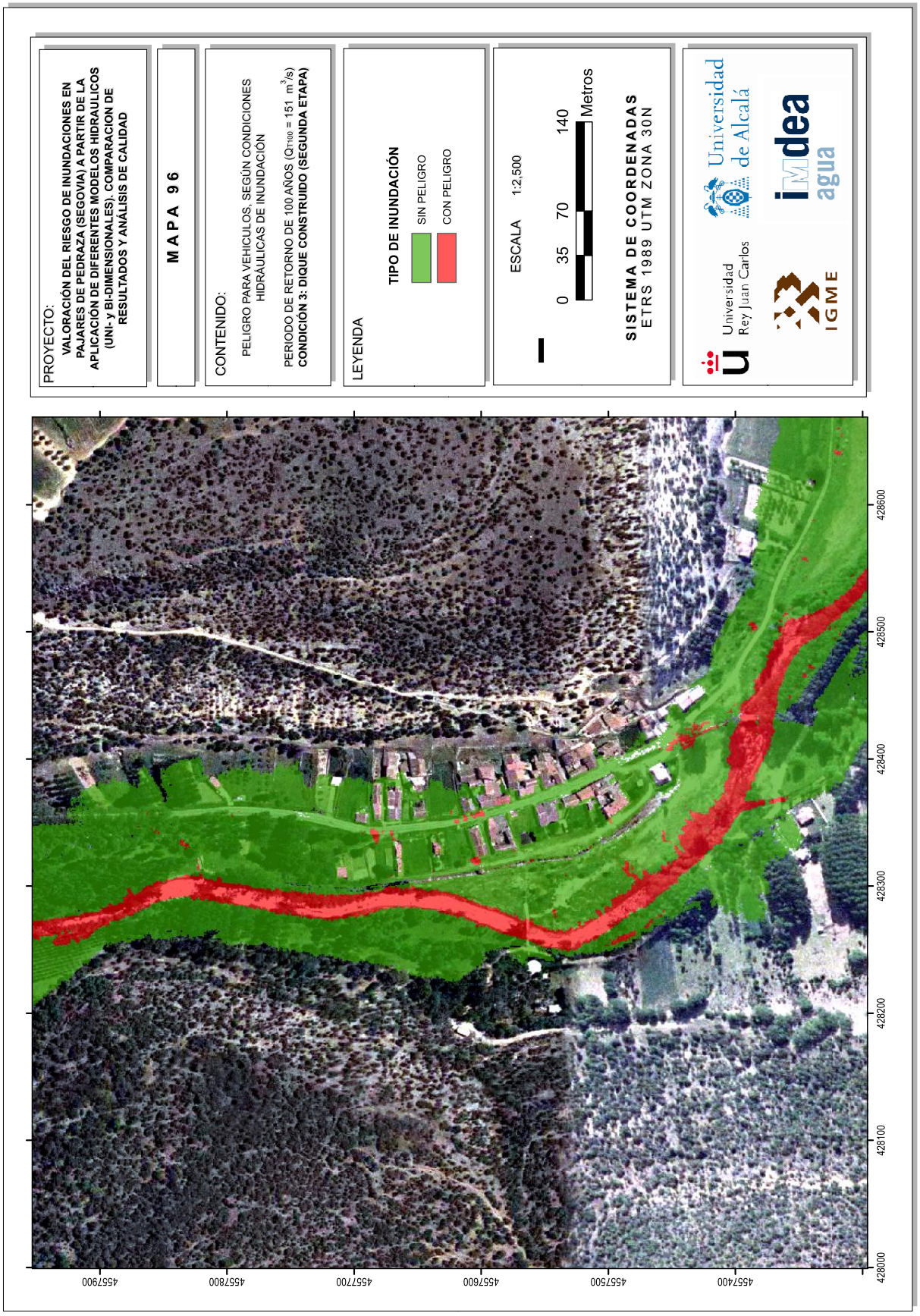
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)**

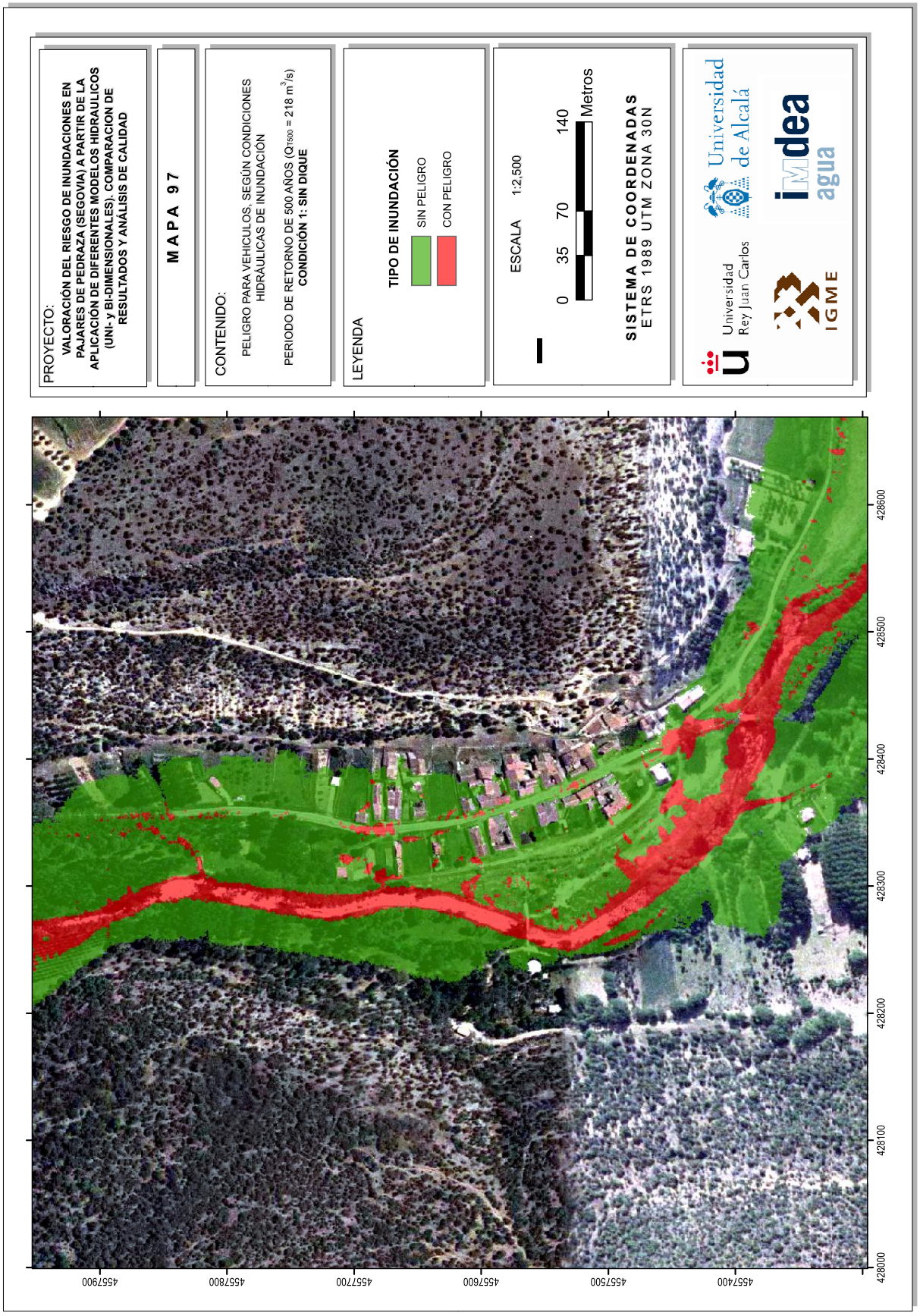
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO

ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros

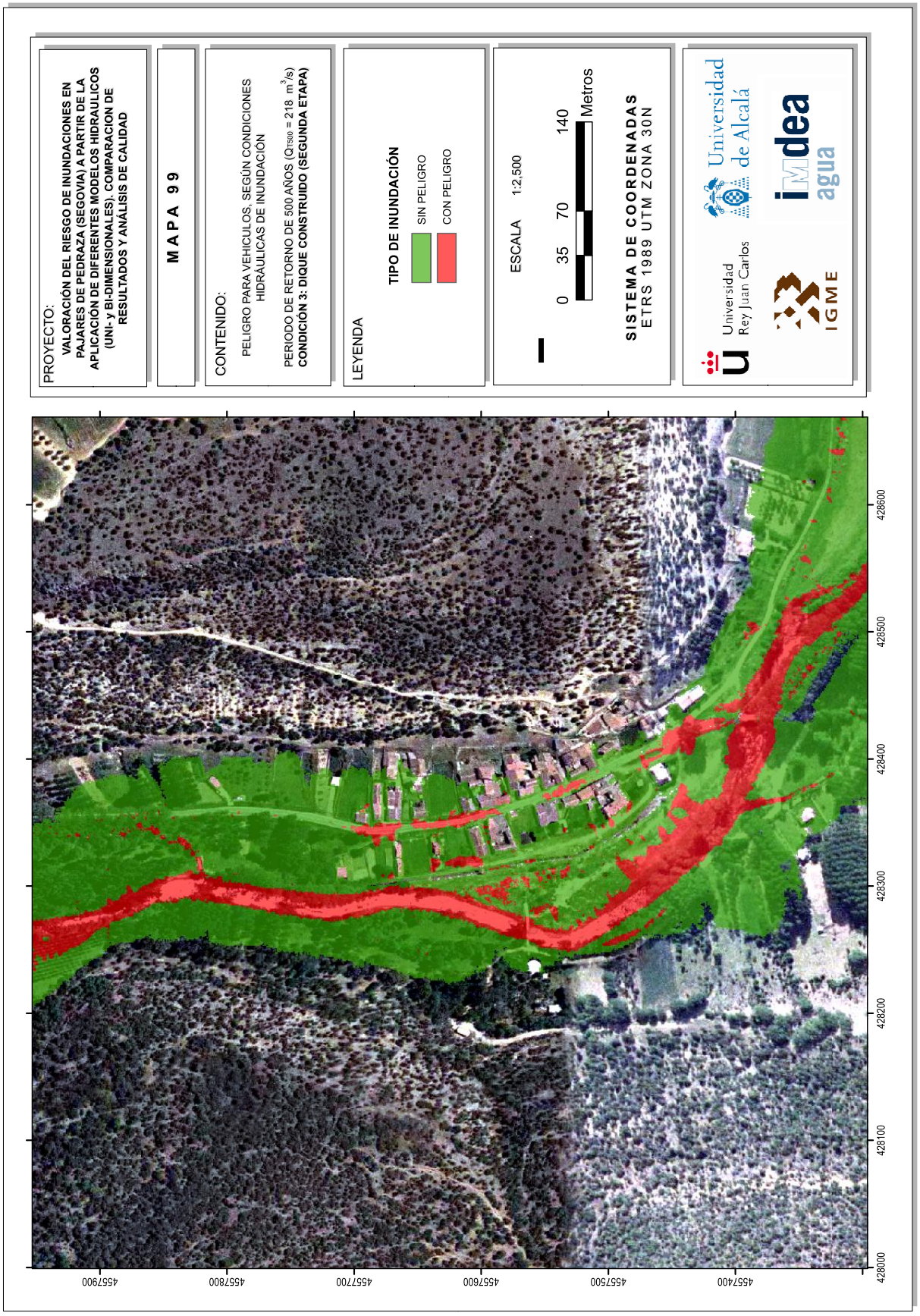
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

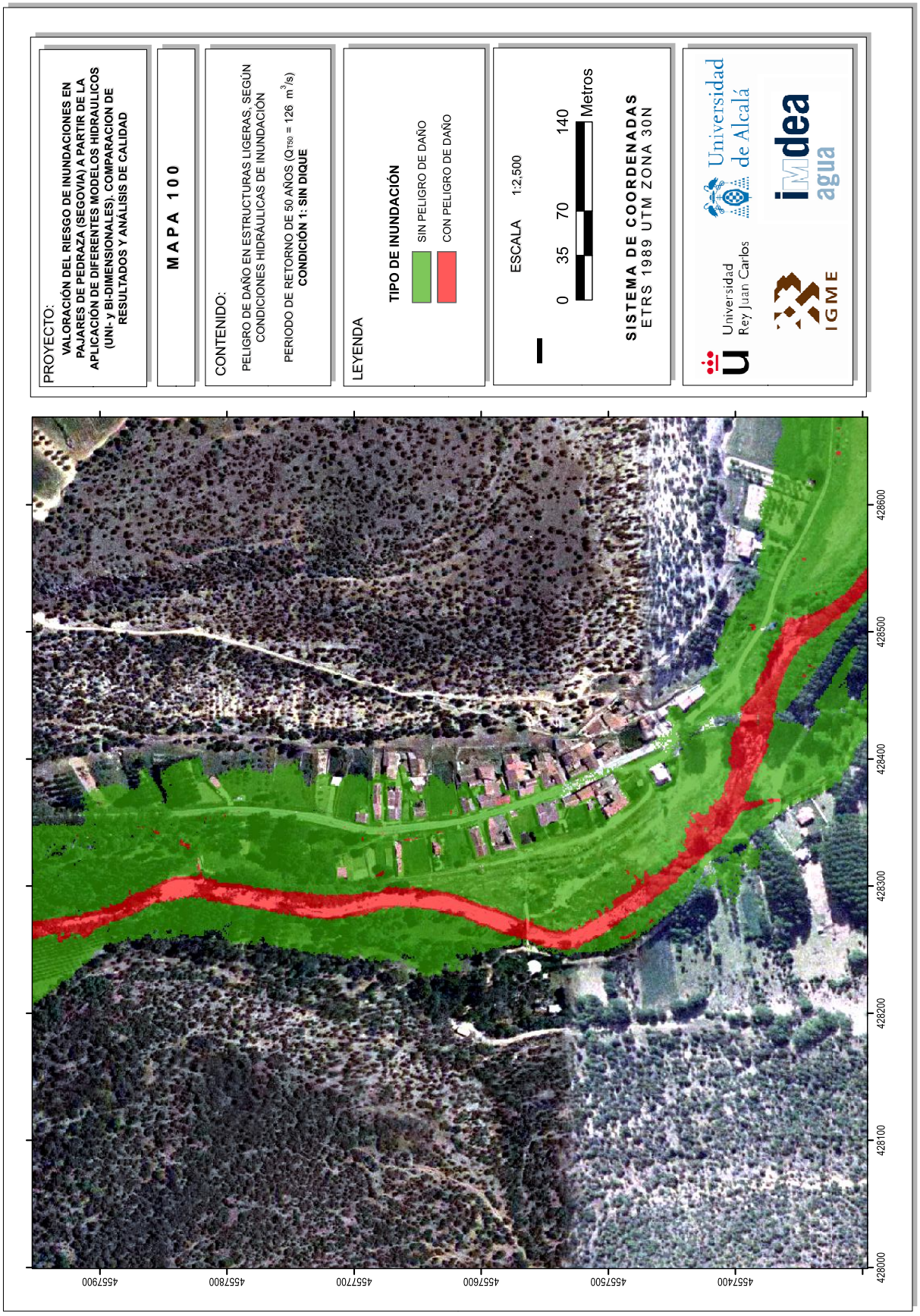
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua

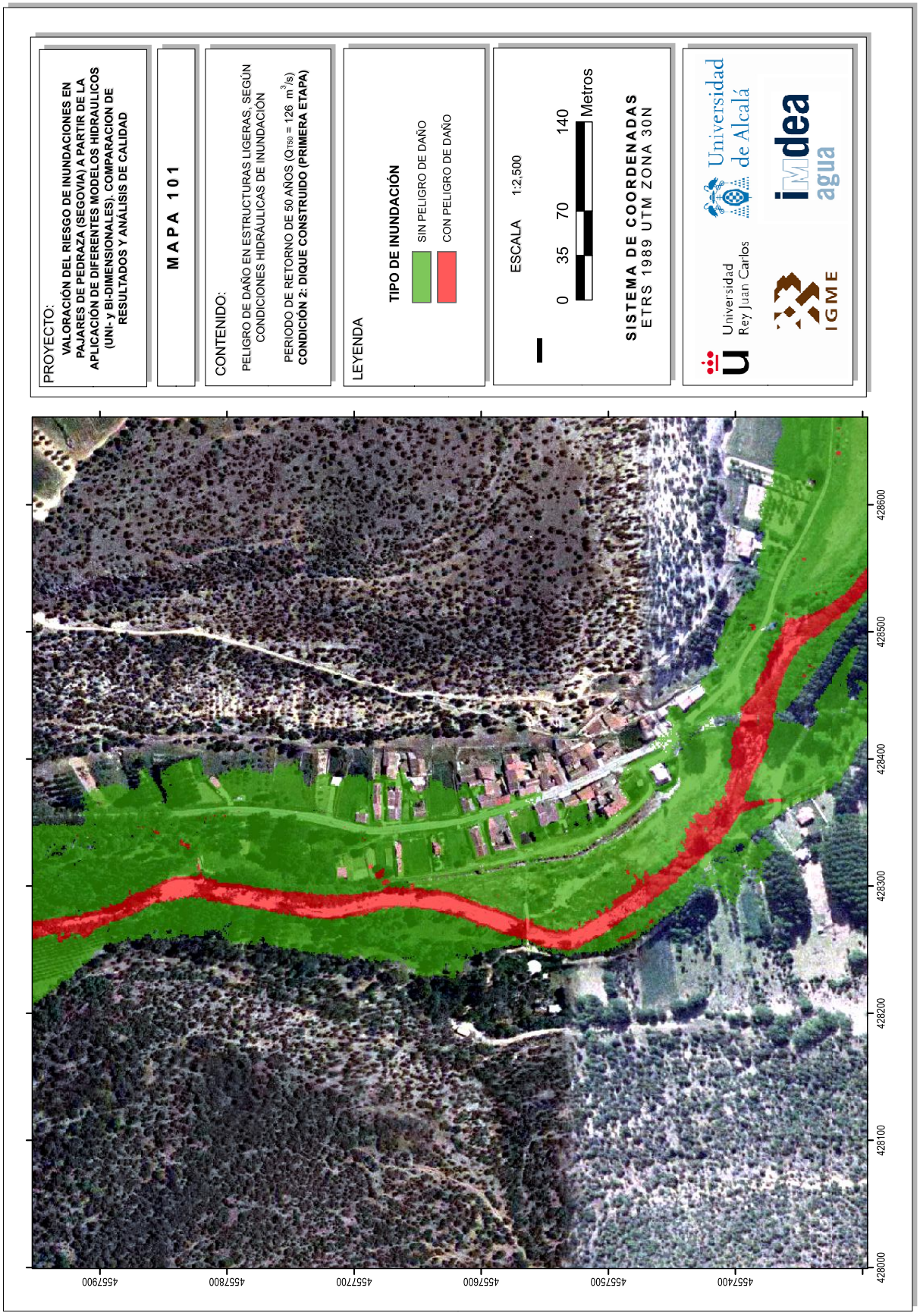

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 96
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

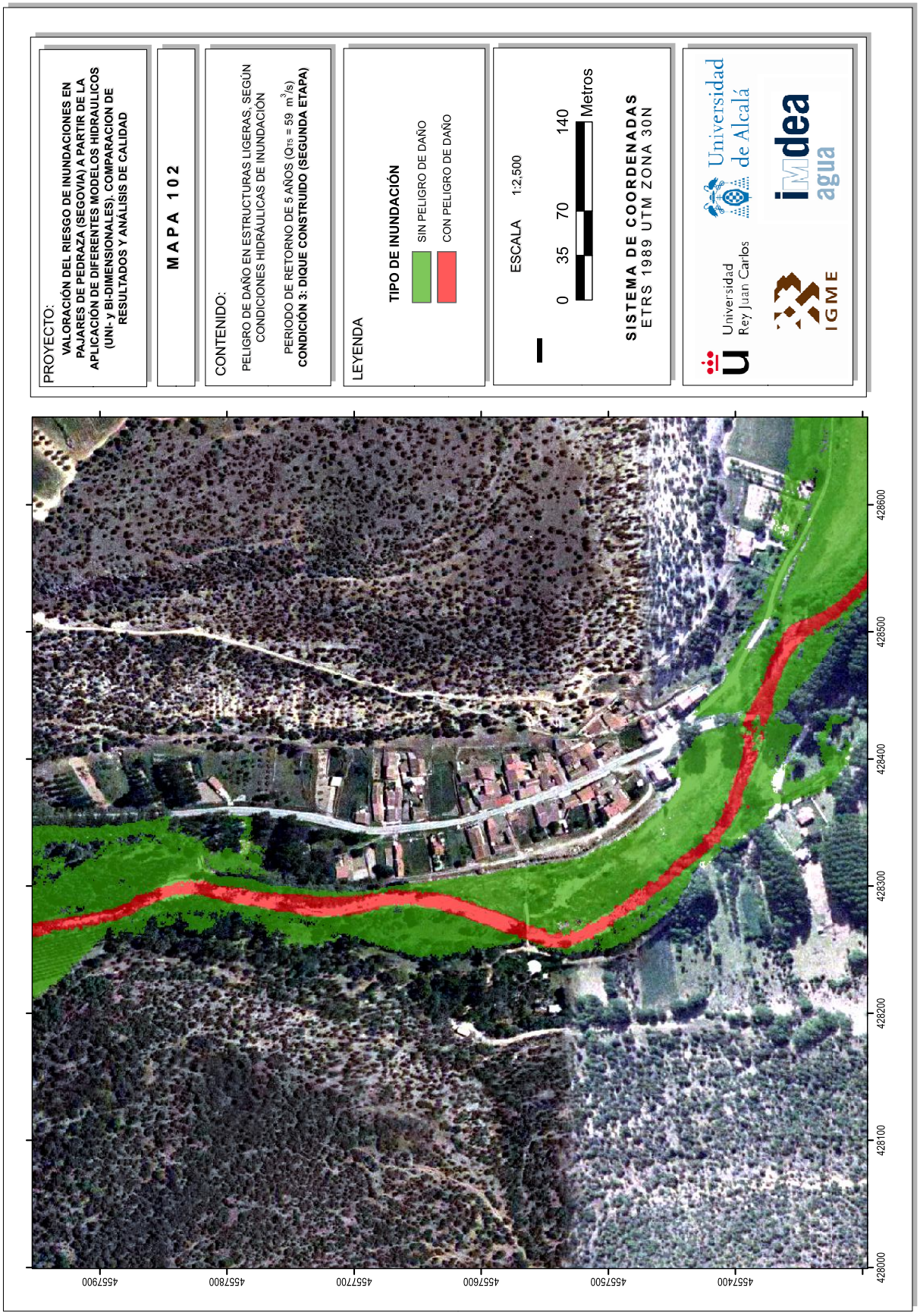

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 97
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

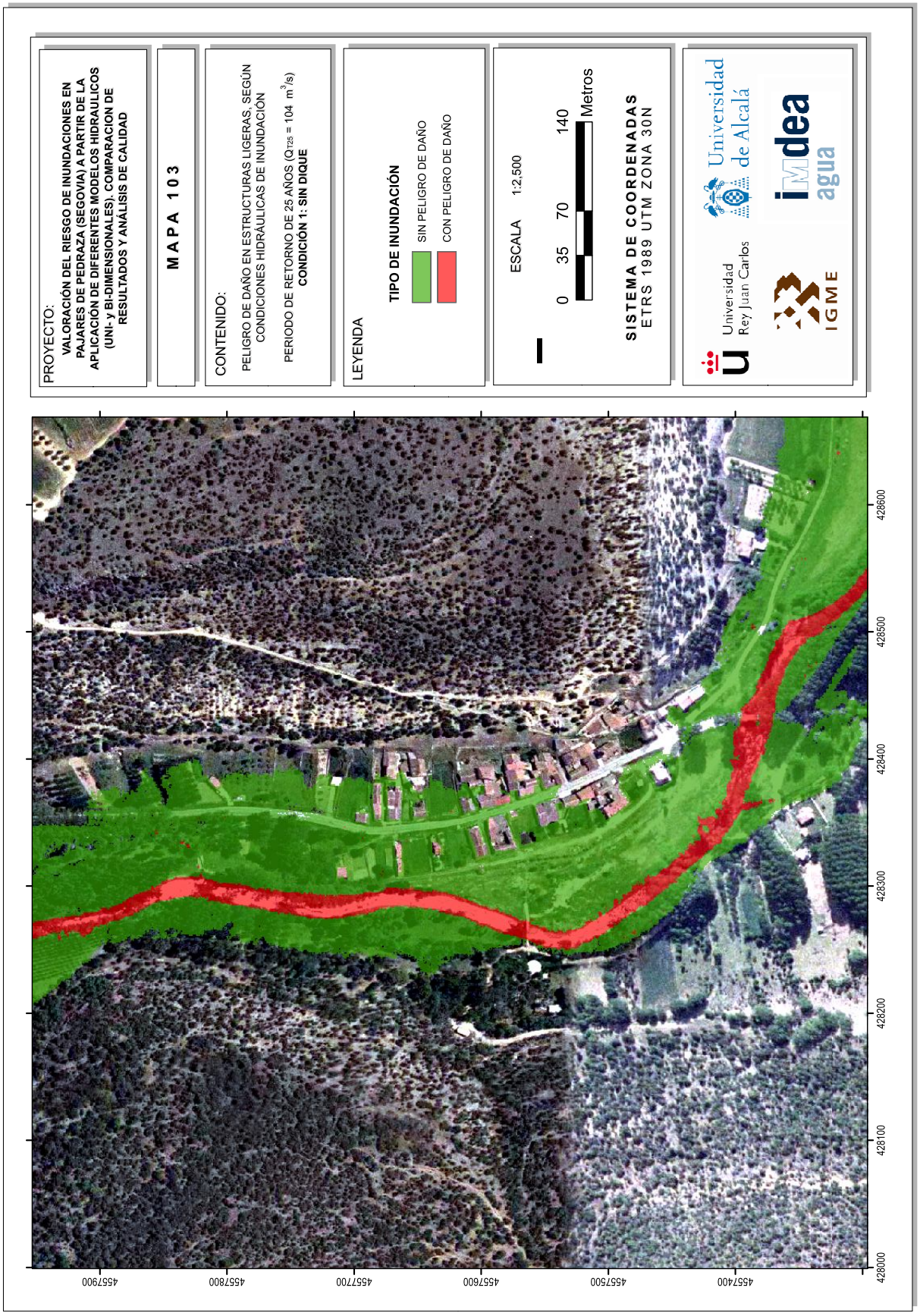
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 98
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

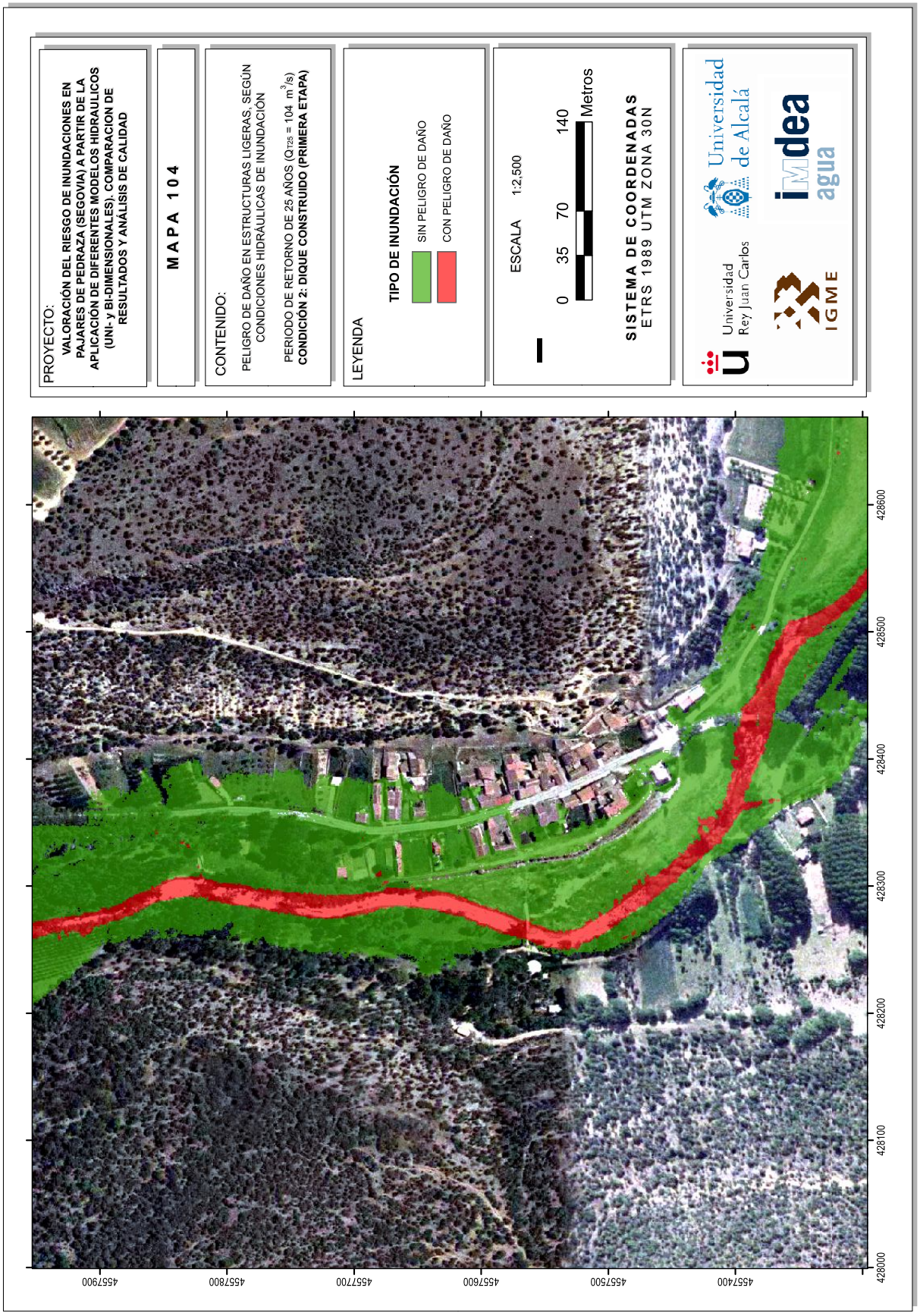

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 99
CONTENIDO:
PELIGRO PARA VEHICULOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO
CON PELIGRO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

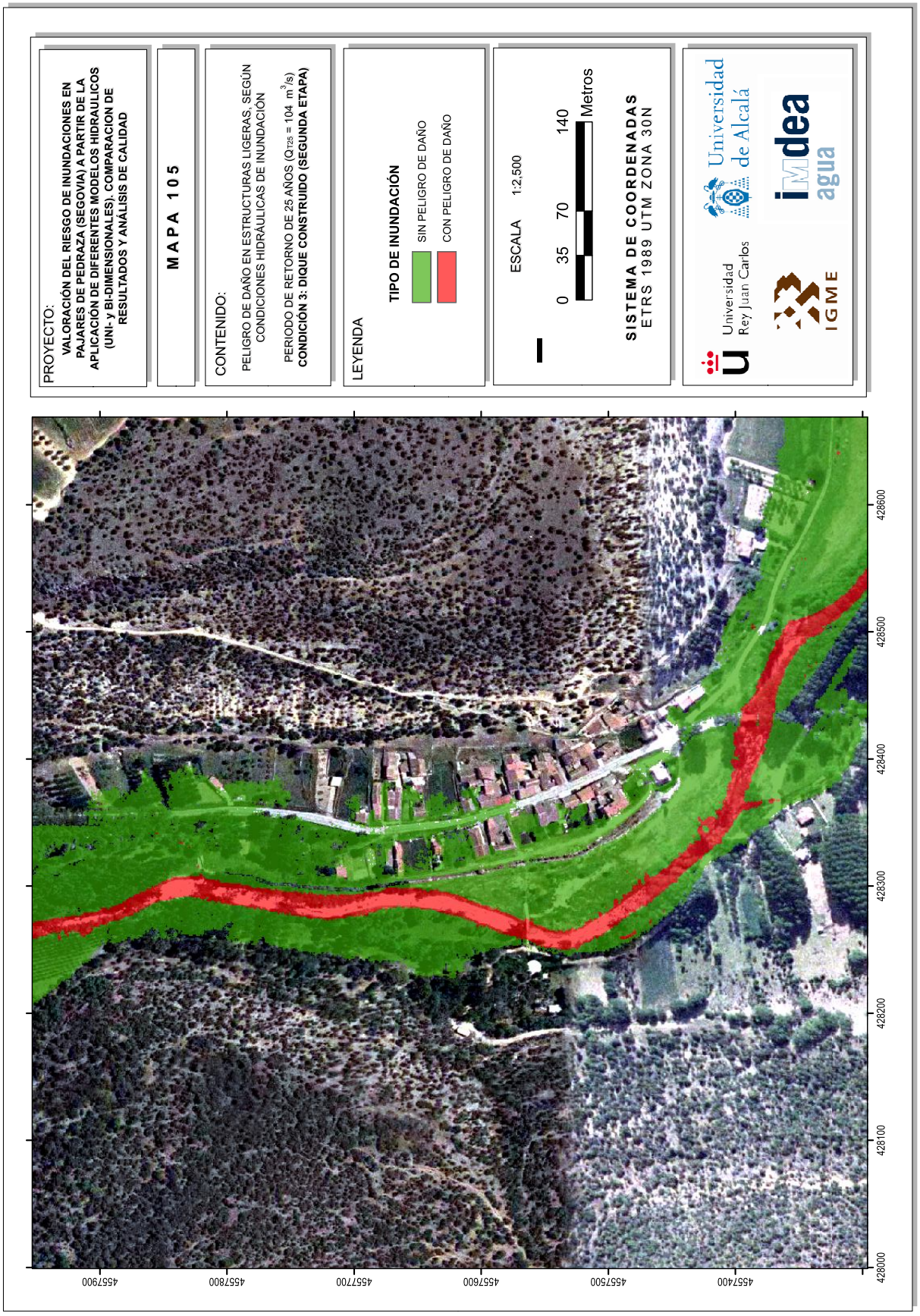

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 100
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

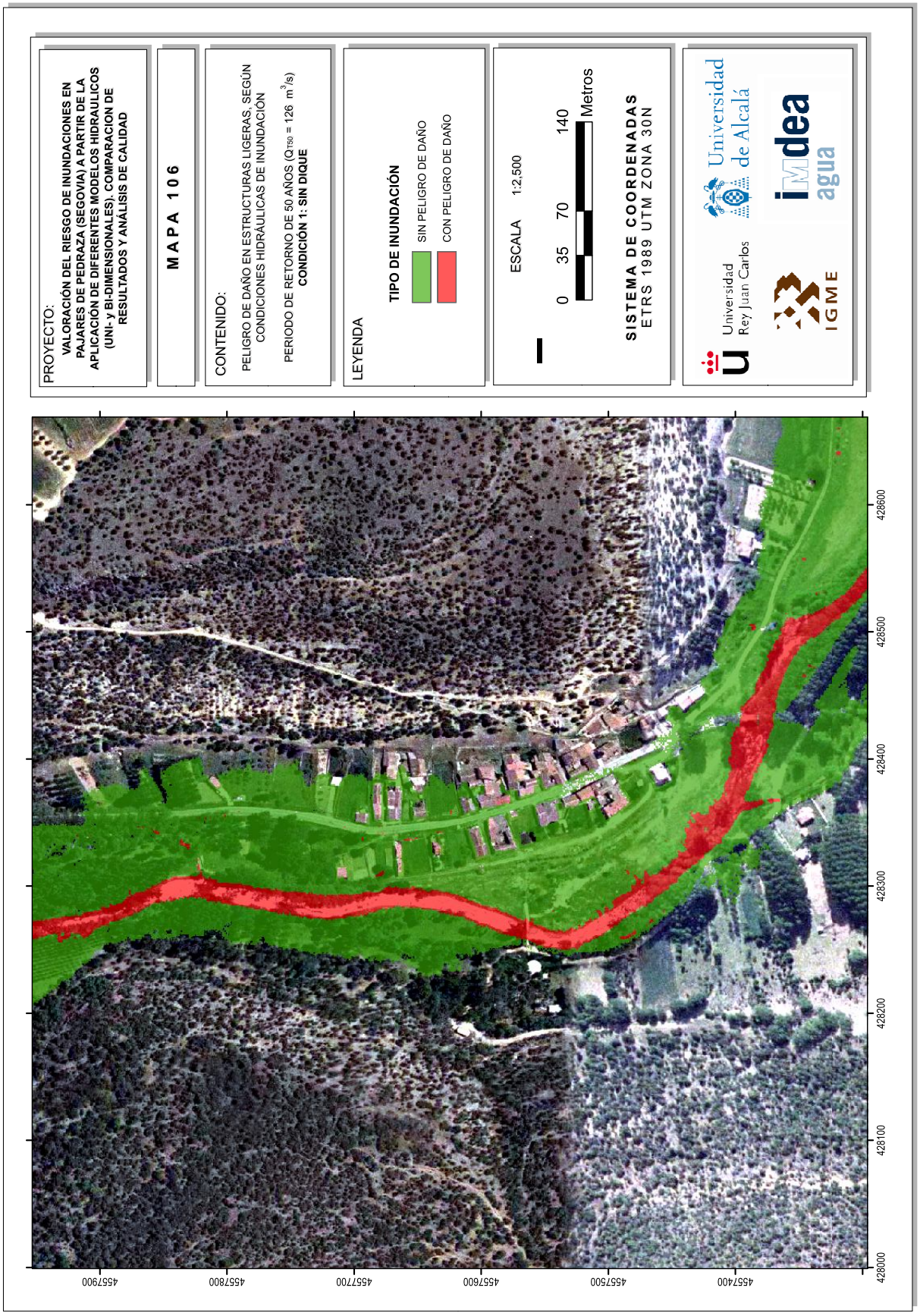

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 101
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

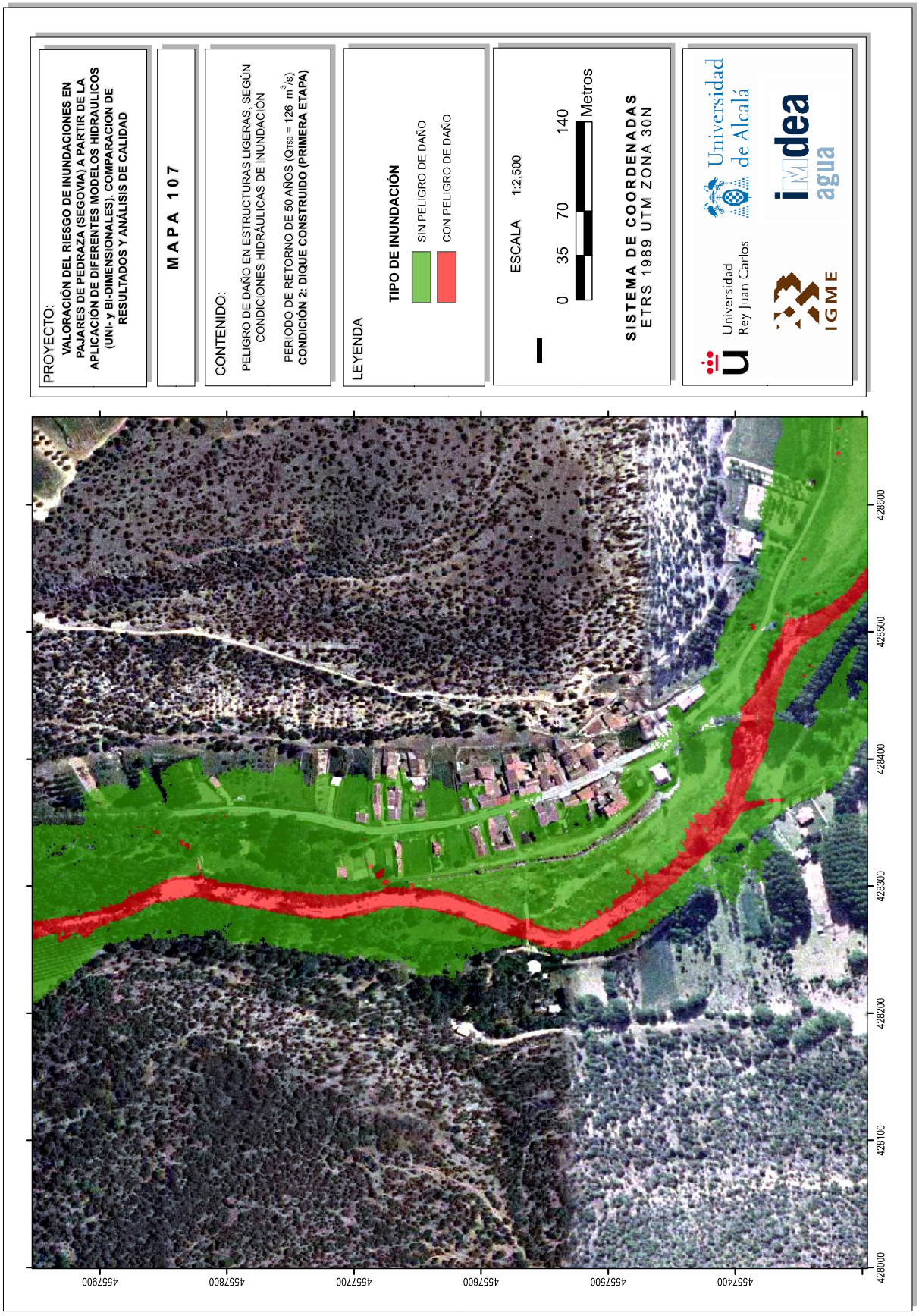

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 102
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS ($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

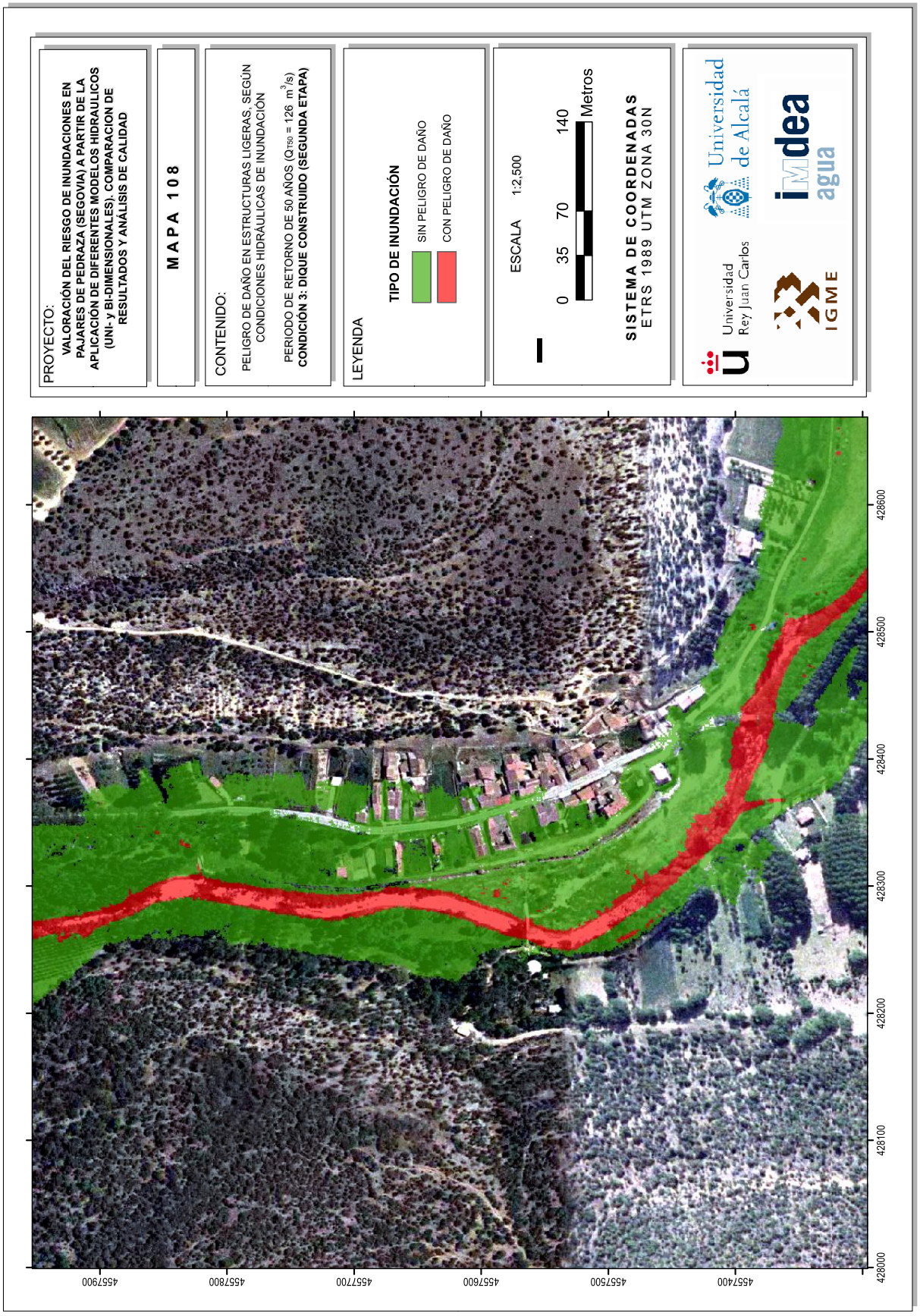

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 103
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 104
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 105
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 106
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 107
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
iMdea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 108
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD

MAPA 109

CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
**CONDICIÓN 1: SIN DIQUE**

LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO

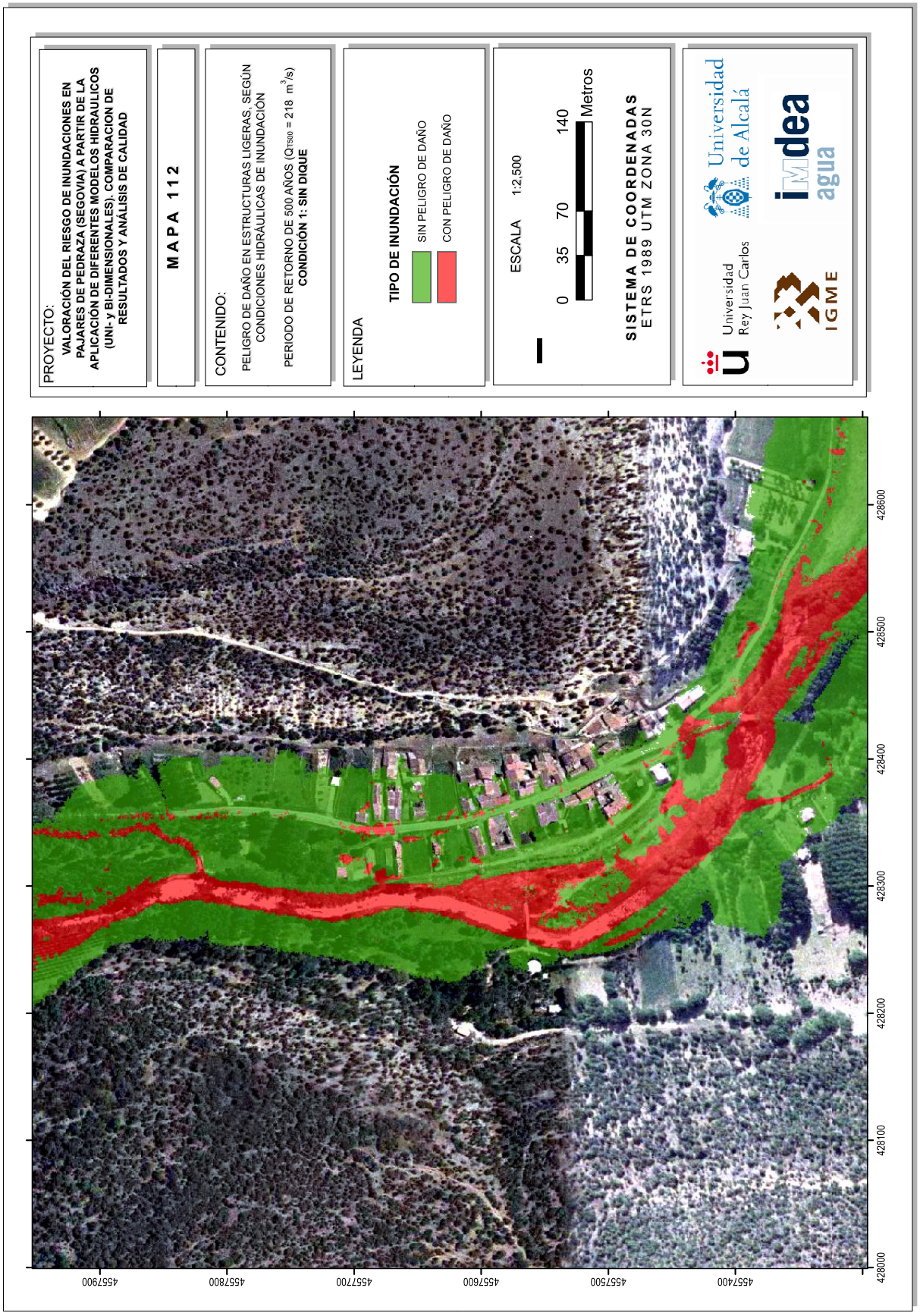
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros

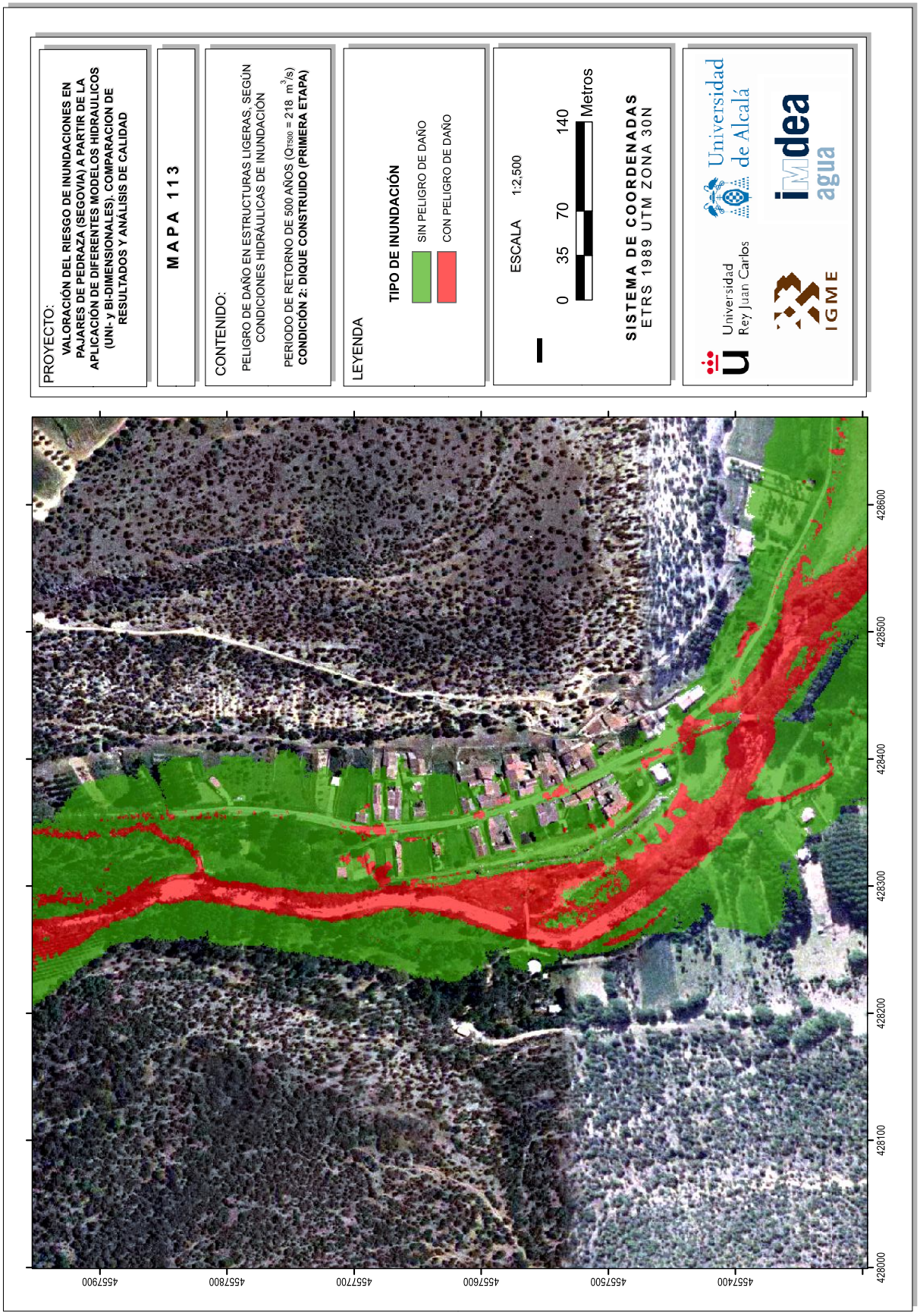
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N

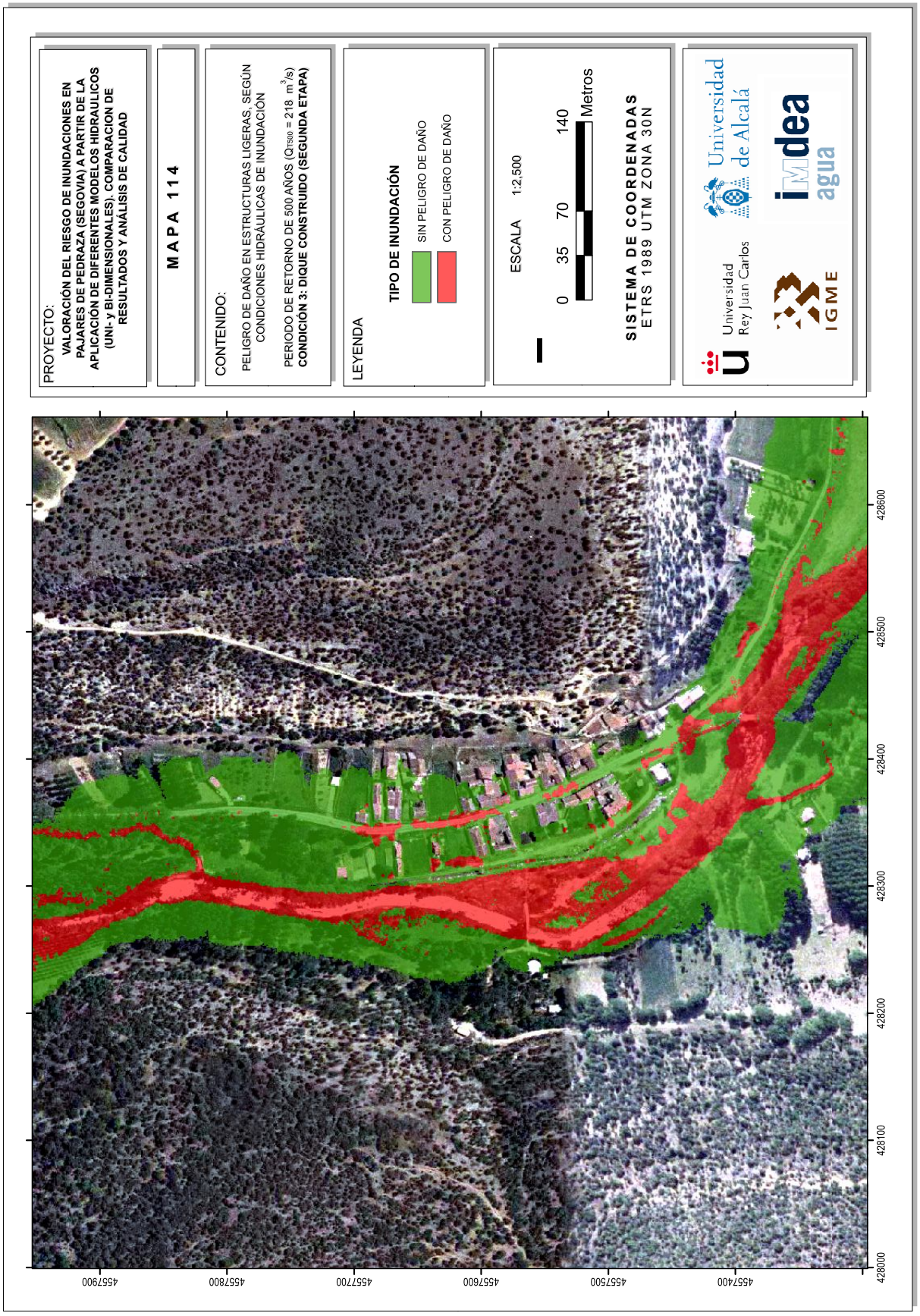
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua

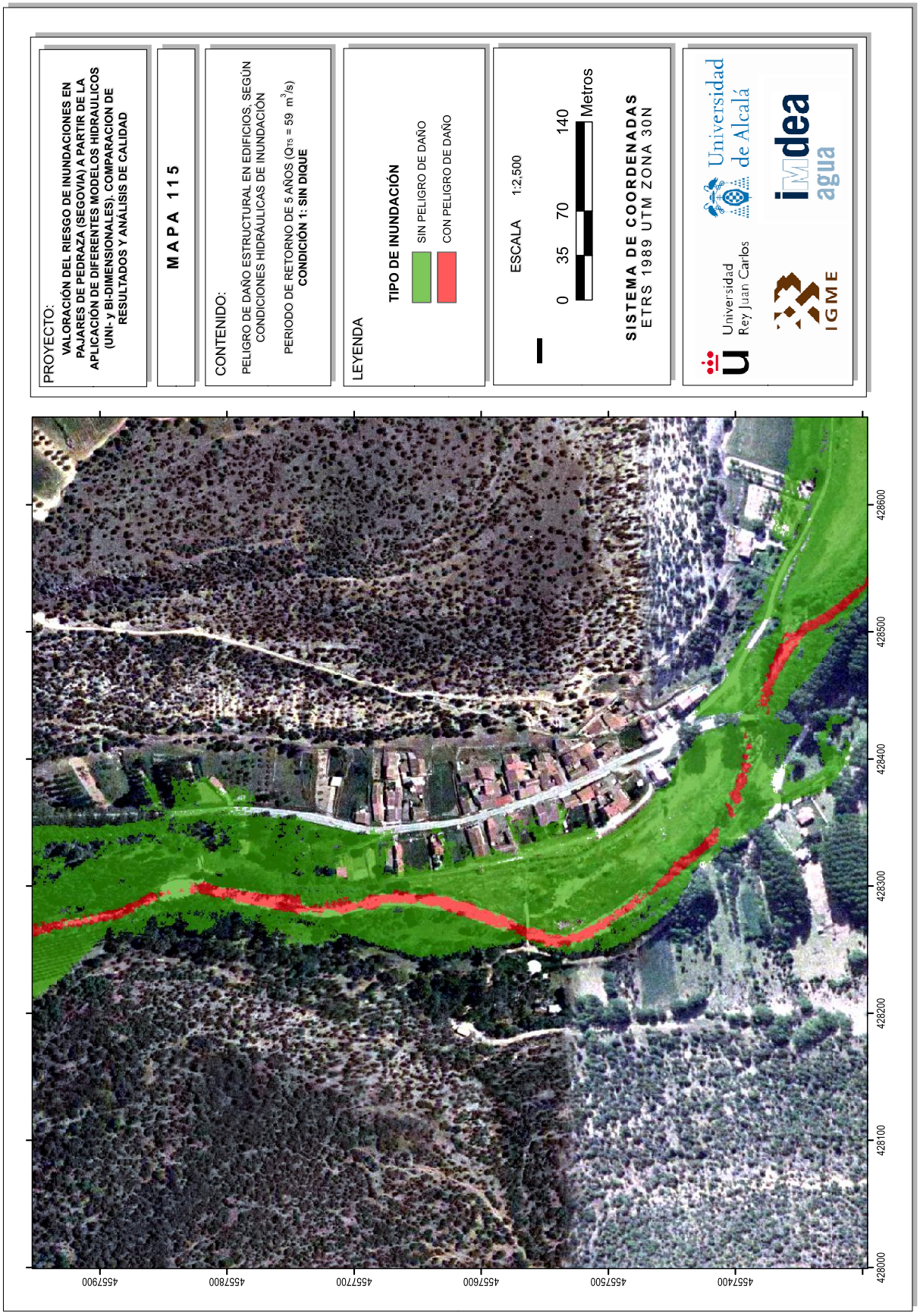
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 110
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

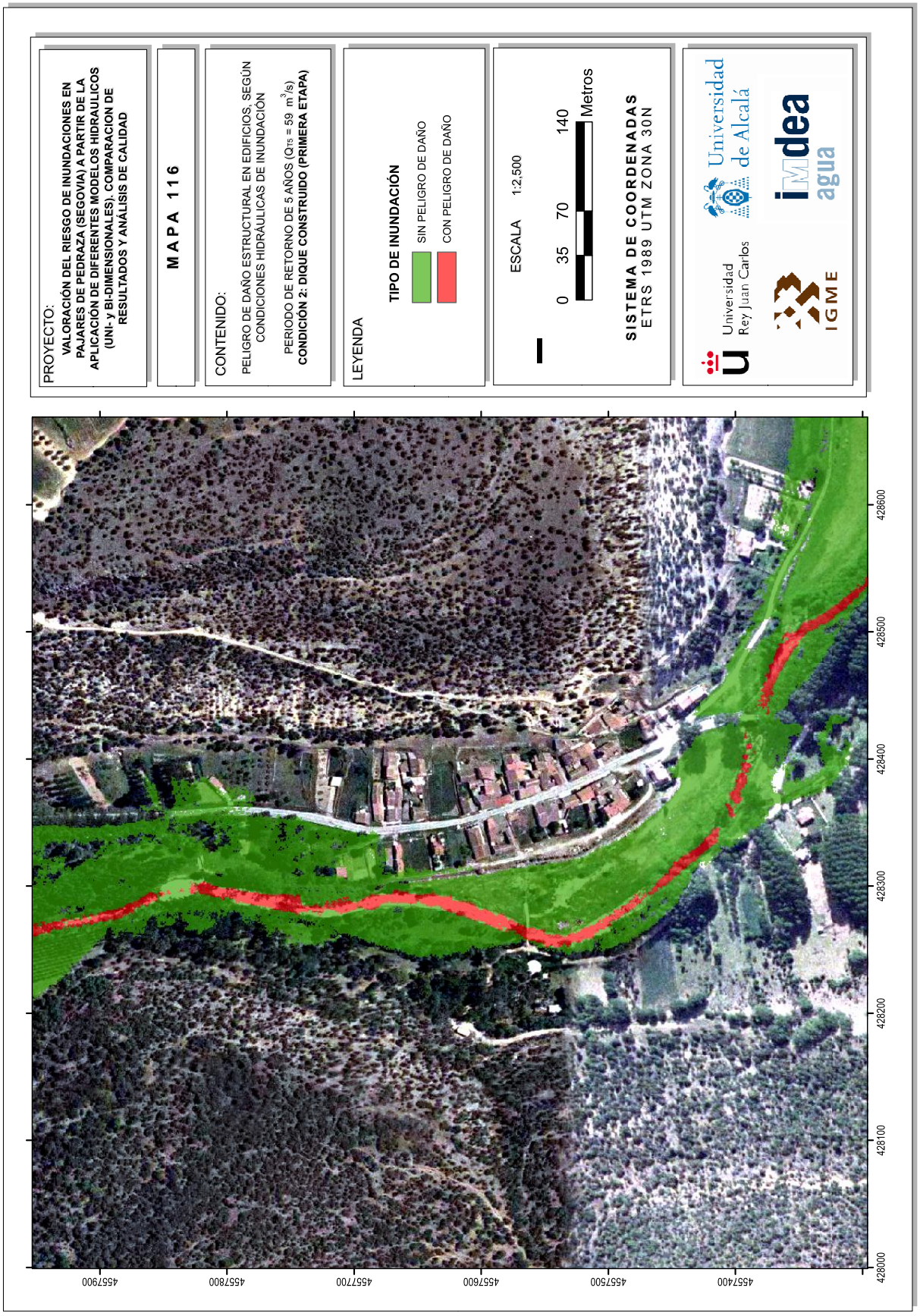
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 111
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

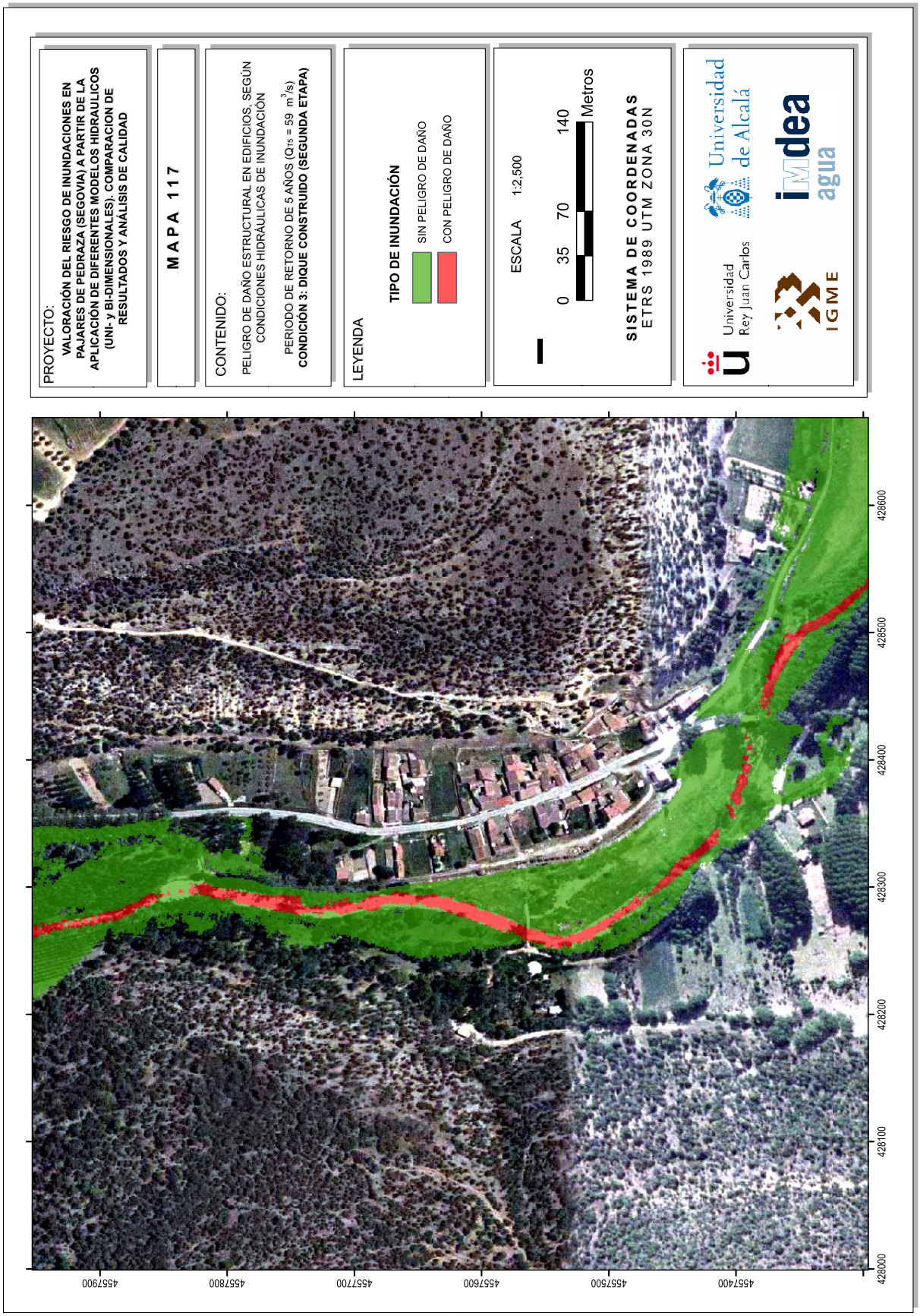

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 112
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

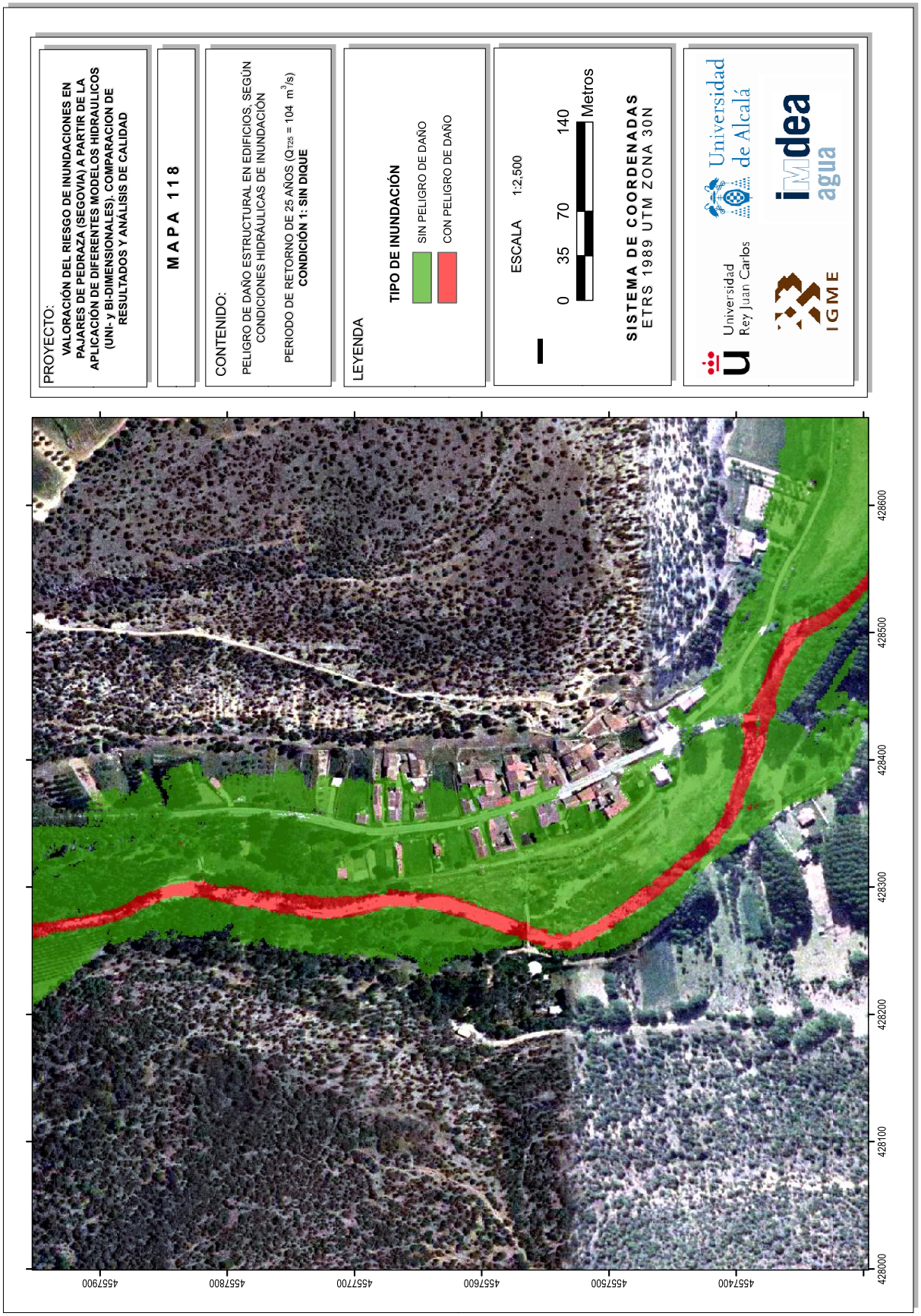

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 113
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

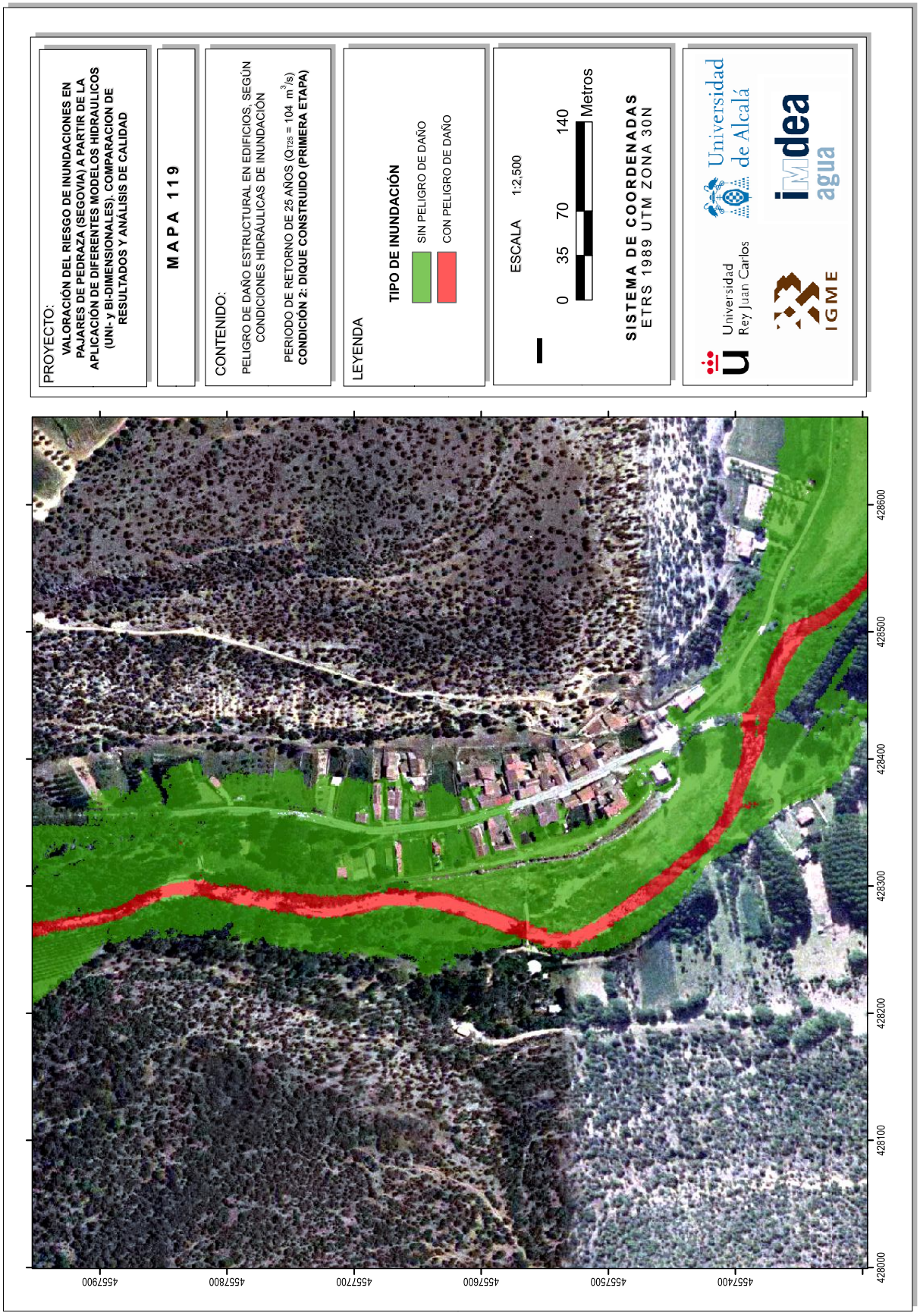

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 114
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LIGERAS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

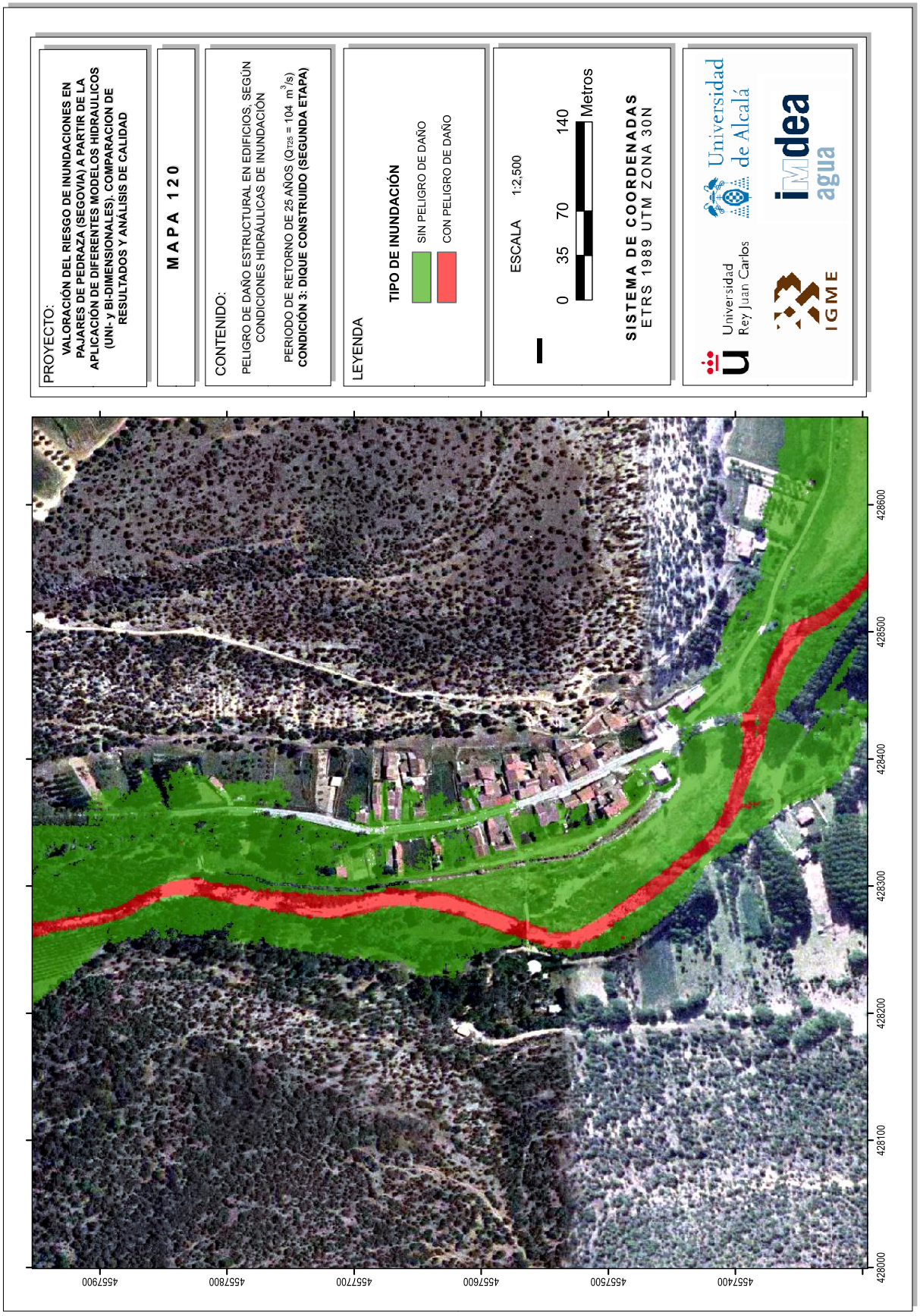

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 115
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS ($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000

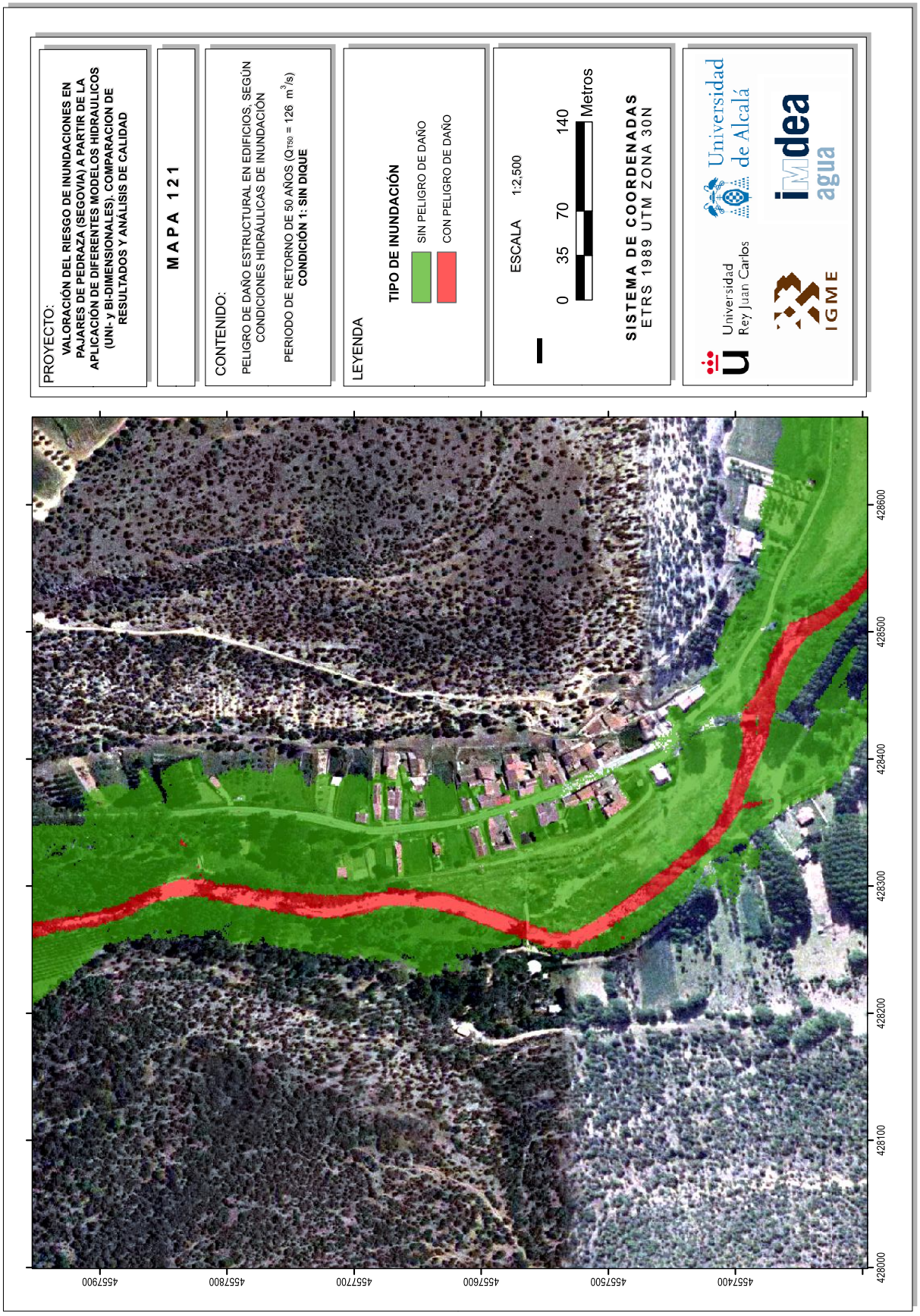

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 116
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (QT5 = 59 m3/s)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457900
457800
457700
457600
457500
457400

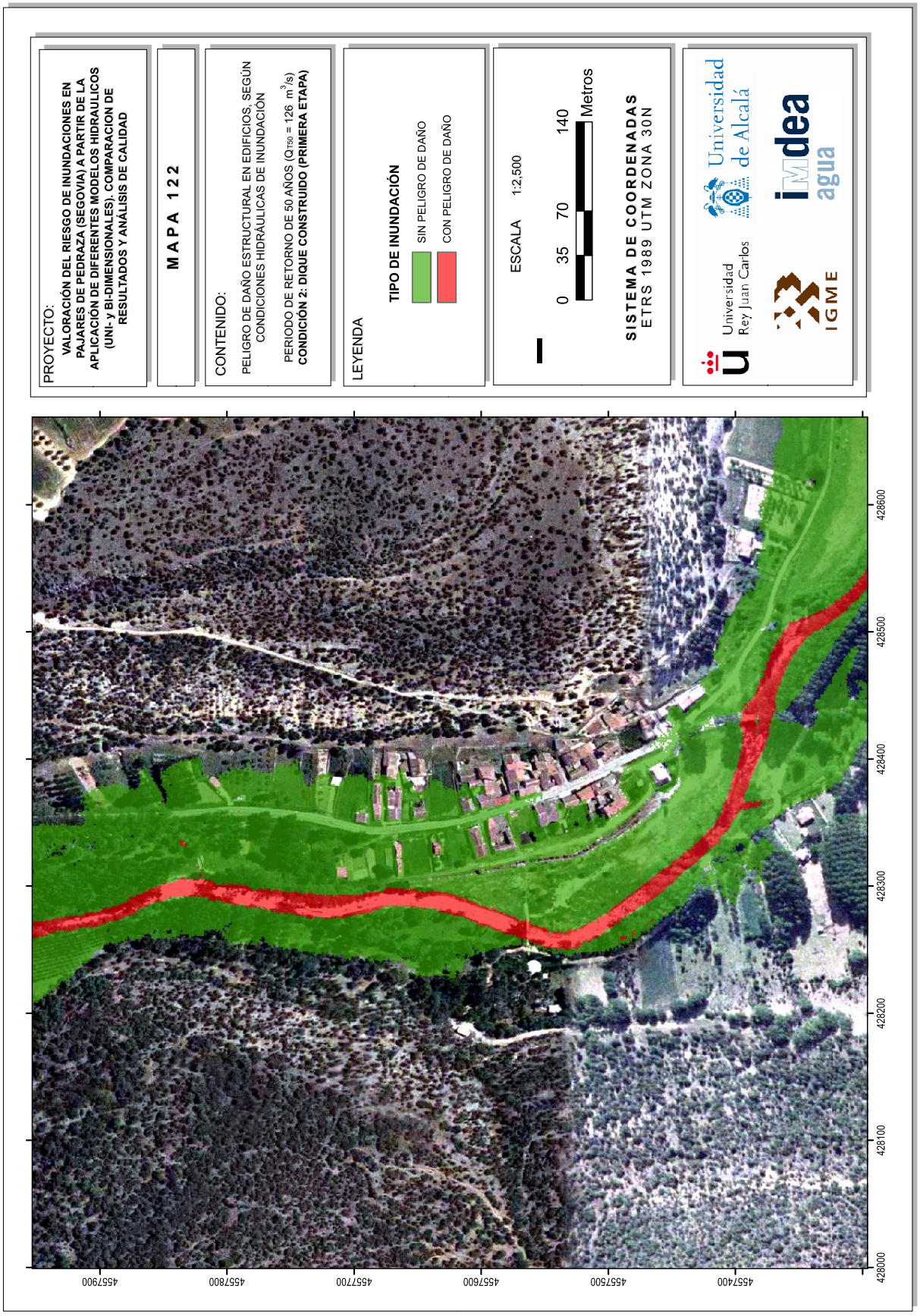

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 117
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS ($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

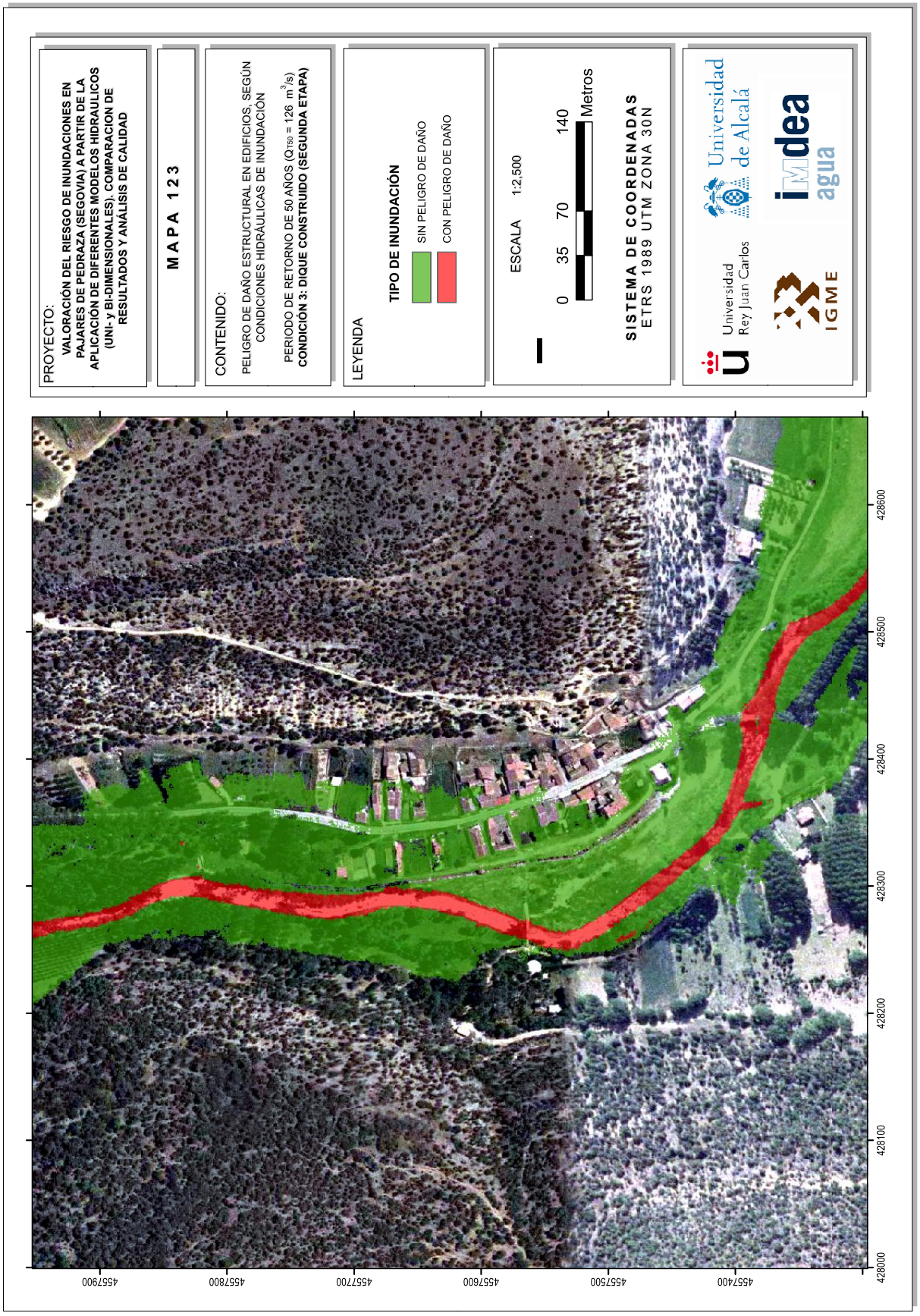

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 118
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 119
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 120
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 121
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 122
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 123
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

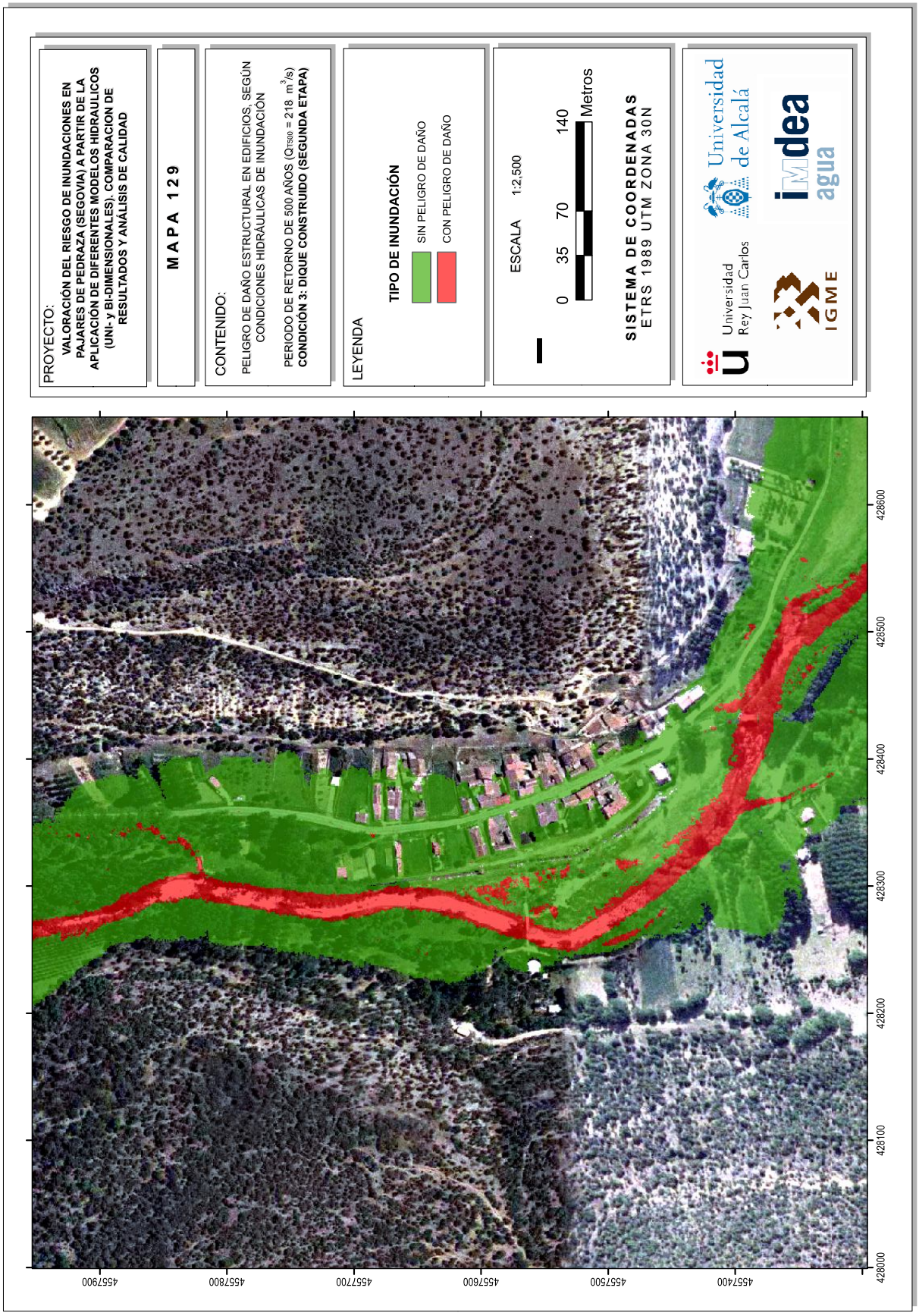
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 124
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 125
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

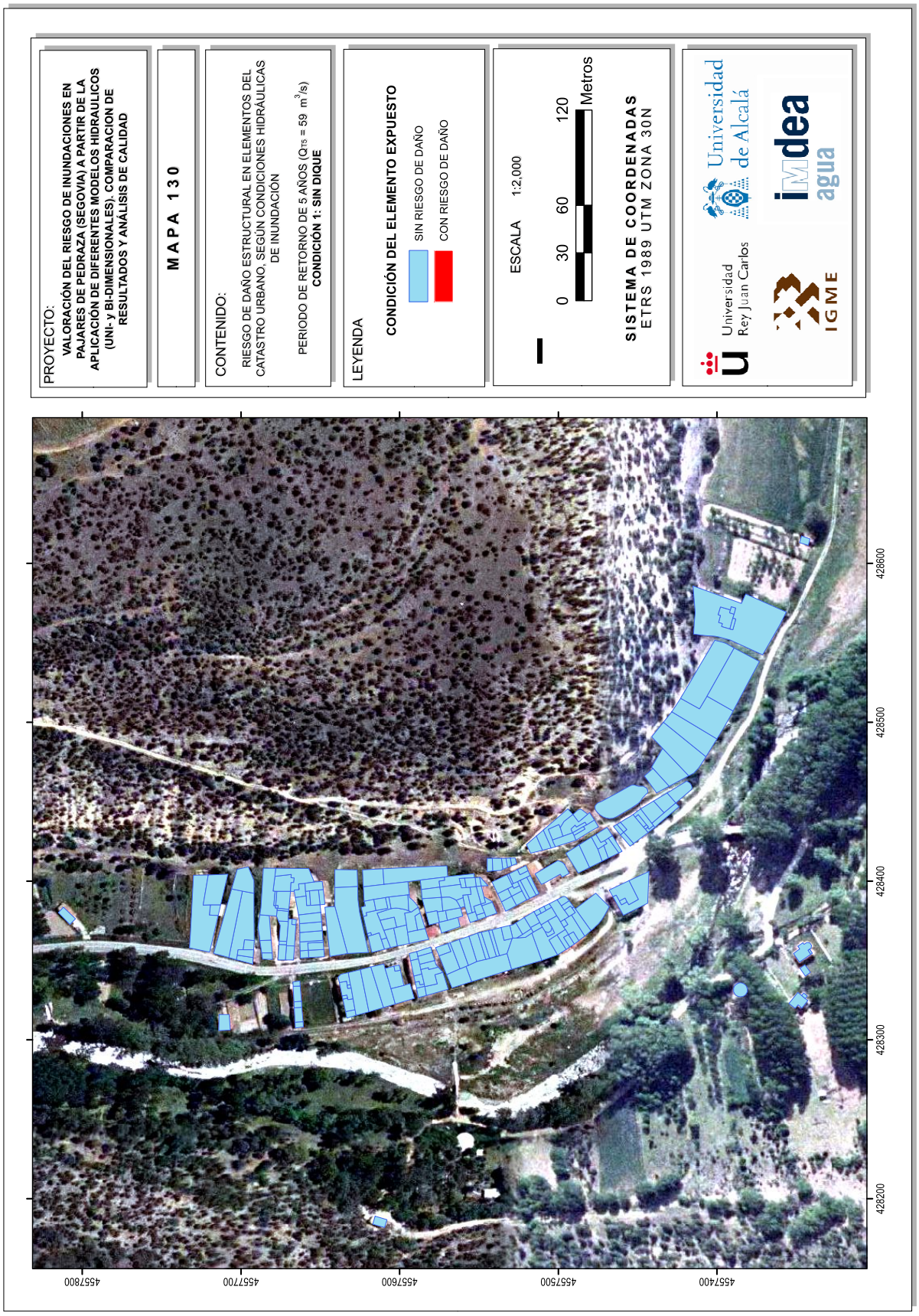
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 126
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
4557900
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400

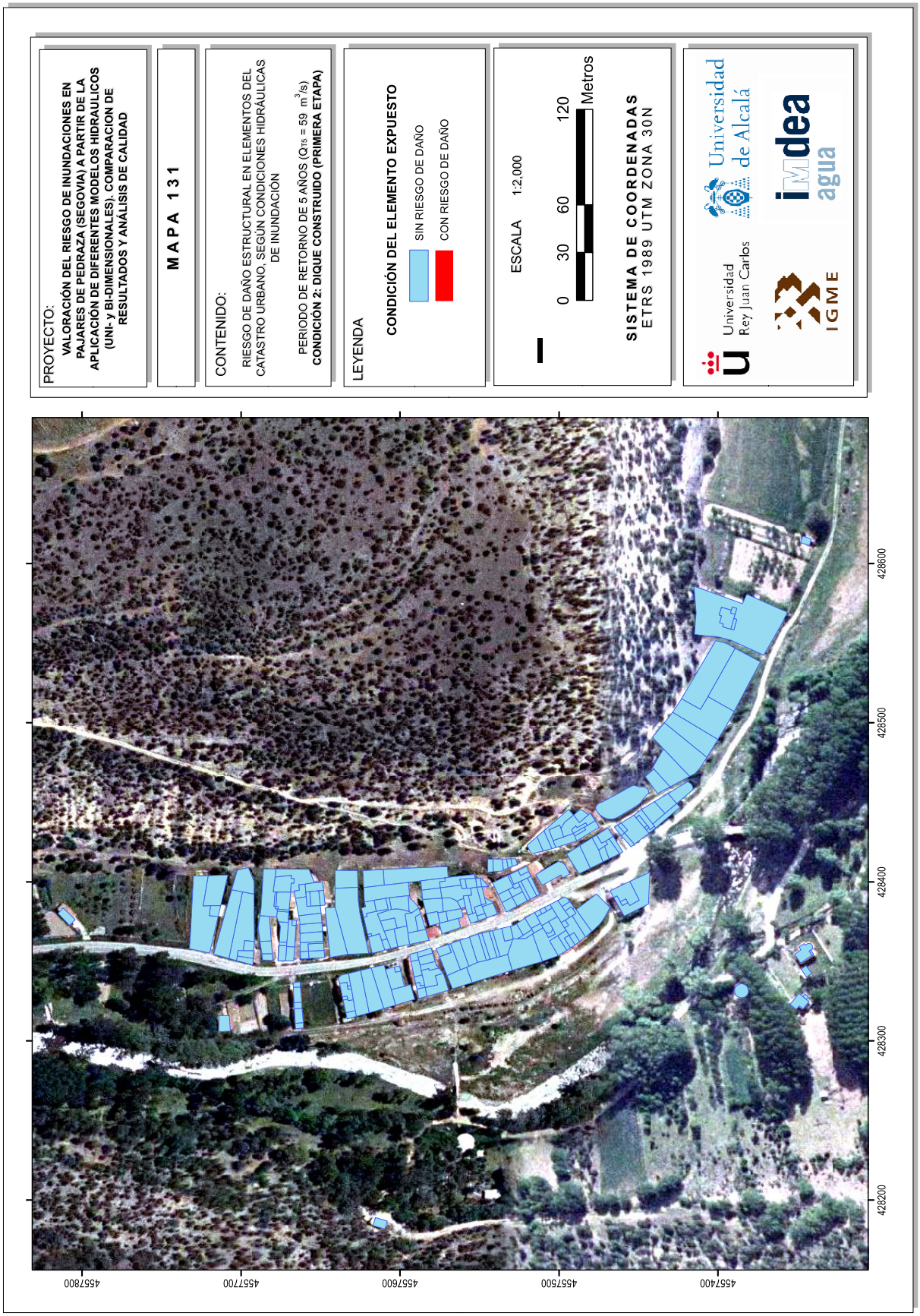
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 127
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

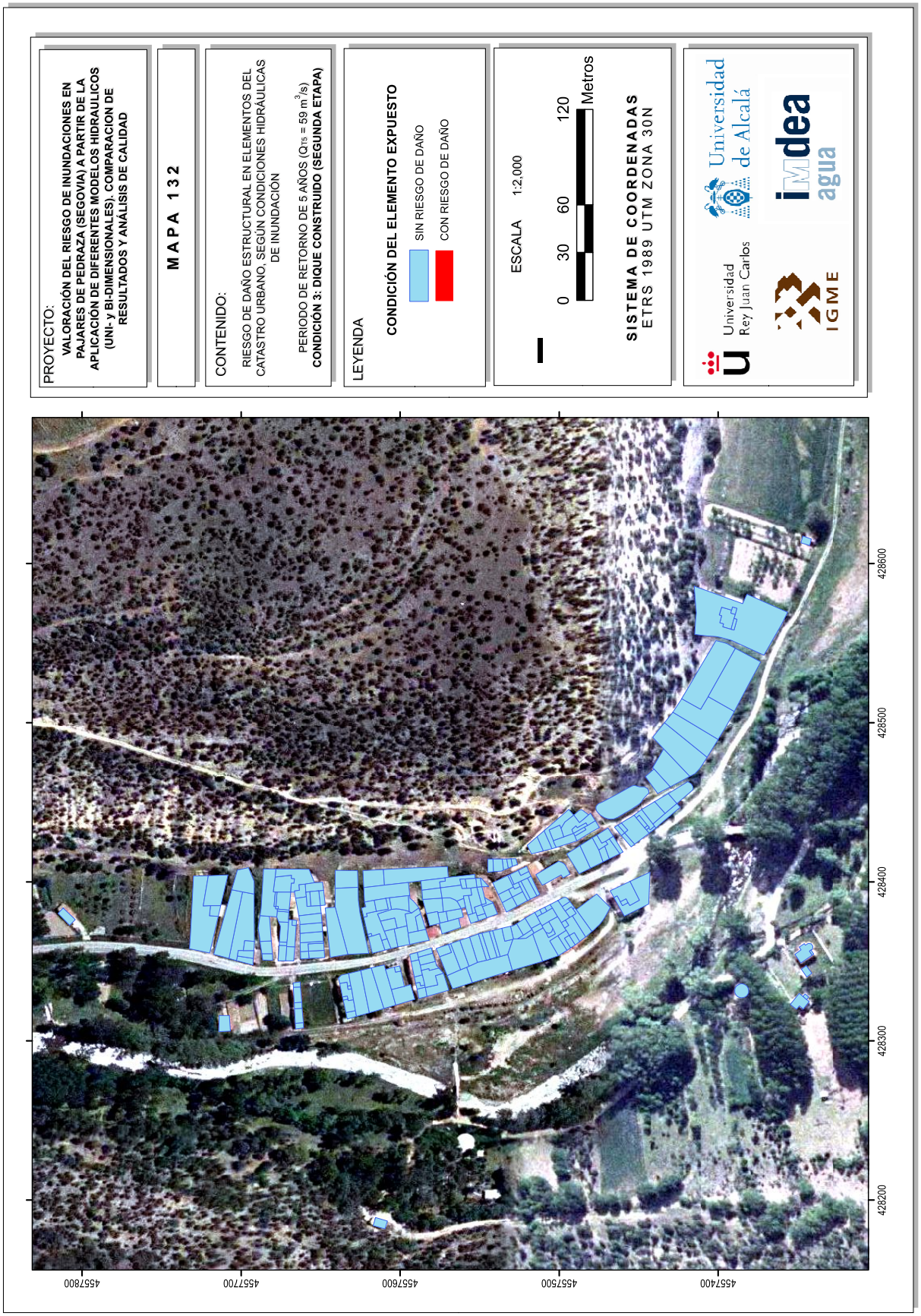
PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 128
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

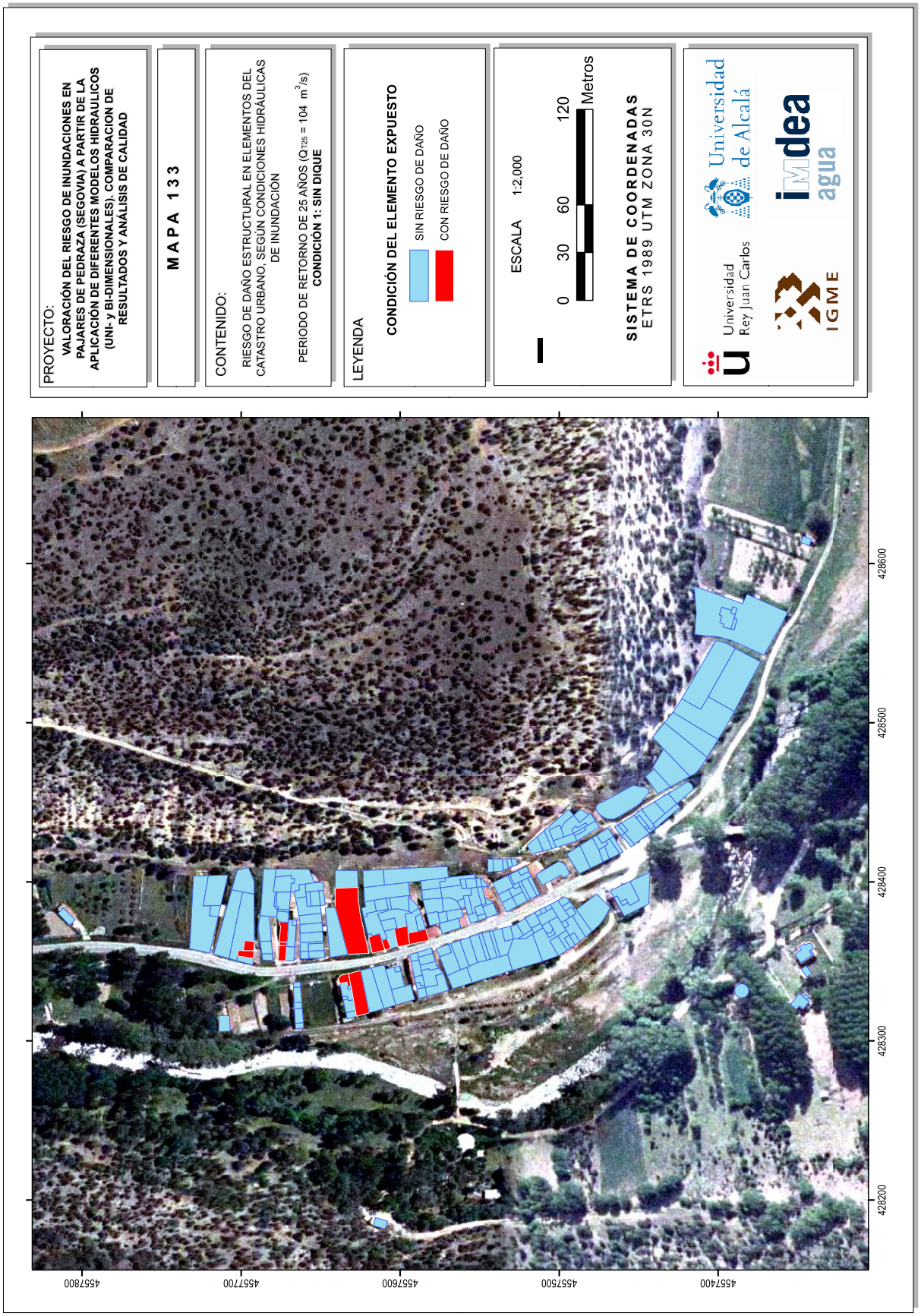

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 129
CONTENIDO:
PELIGRO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
TIPO DE INUNDACIÓN
SIN PELIGRO DE DAÑO
CON PELIGRO DE DAÑO
ESCALA 1:2,500
0 35 70 140 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
iMdea agua
428600
428500
428400
428300
428200
428100
428000
457400
457500
457600
457700
457800
457900

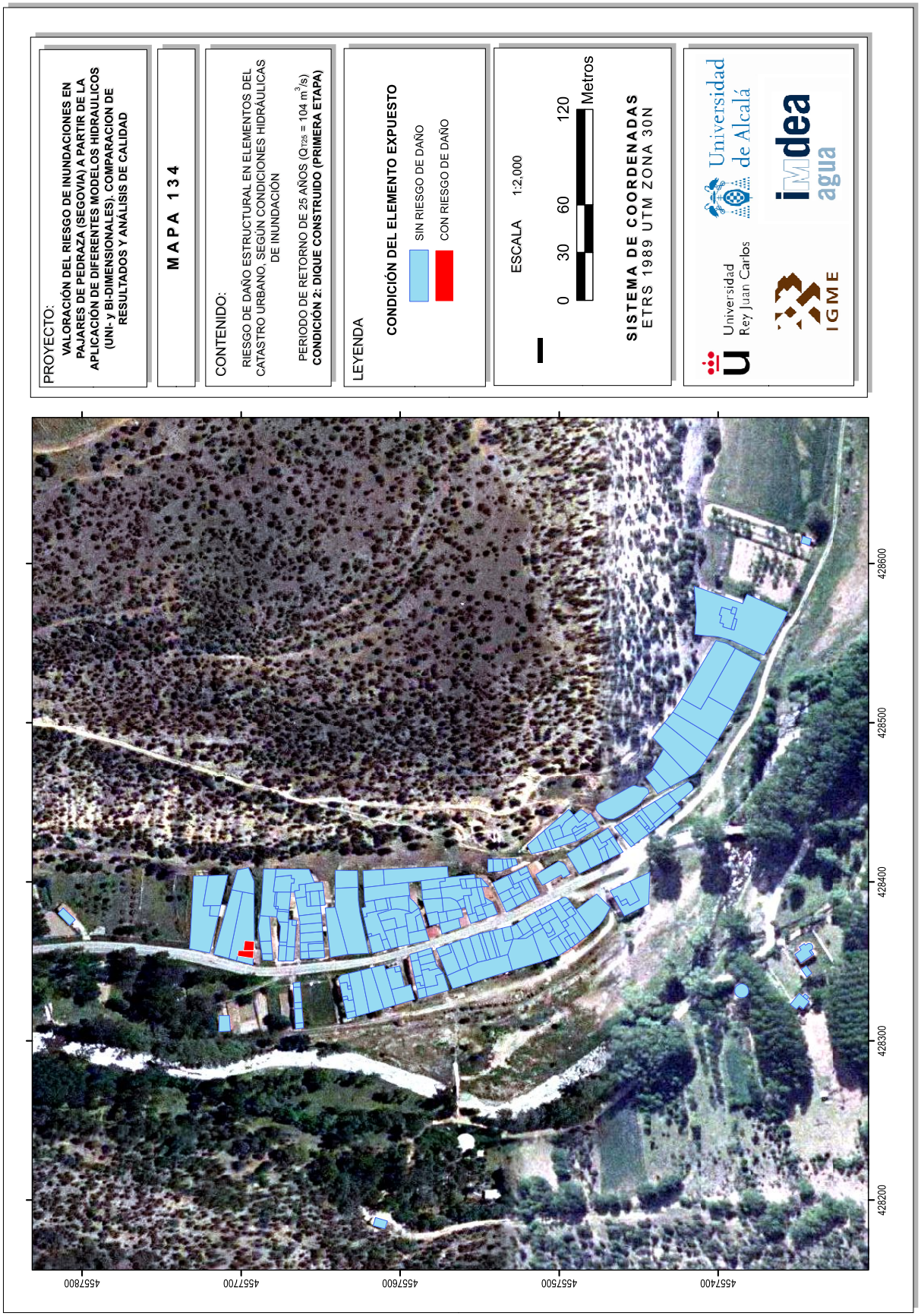
## 10.9. ANEXO 9. MAPAS DE CATASTRO URBANO EXPUESTO A RIESGO DE DAÑOS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO Y CONDICIONES TOPOGRÁFICAS.

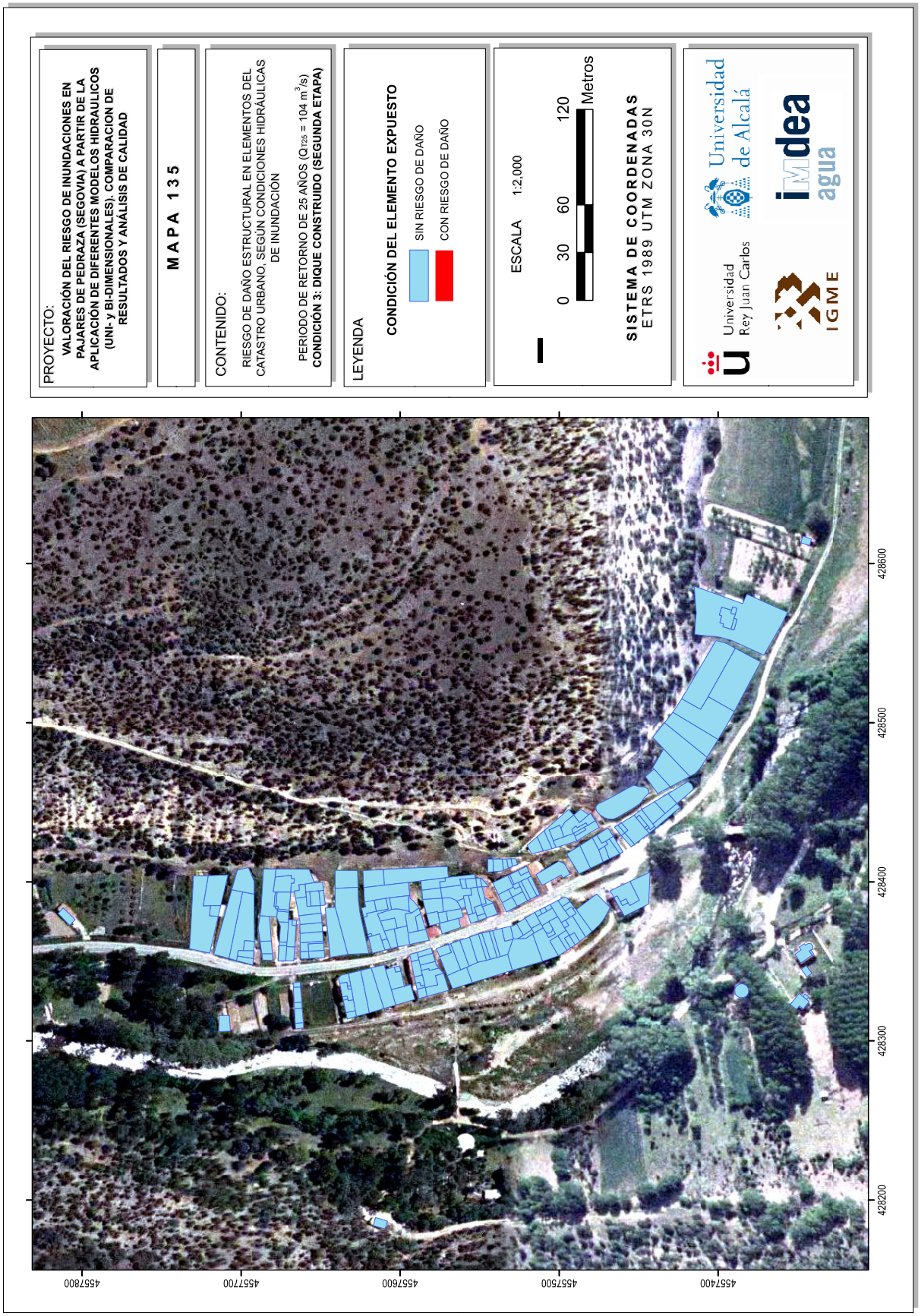


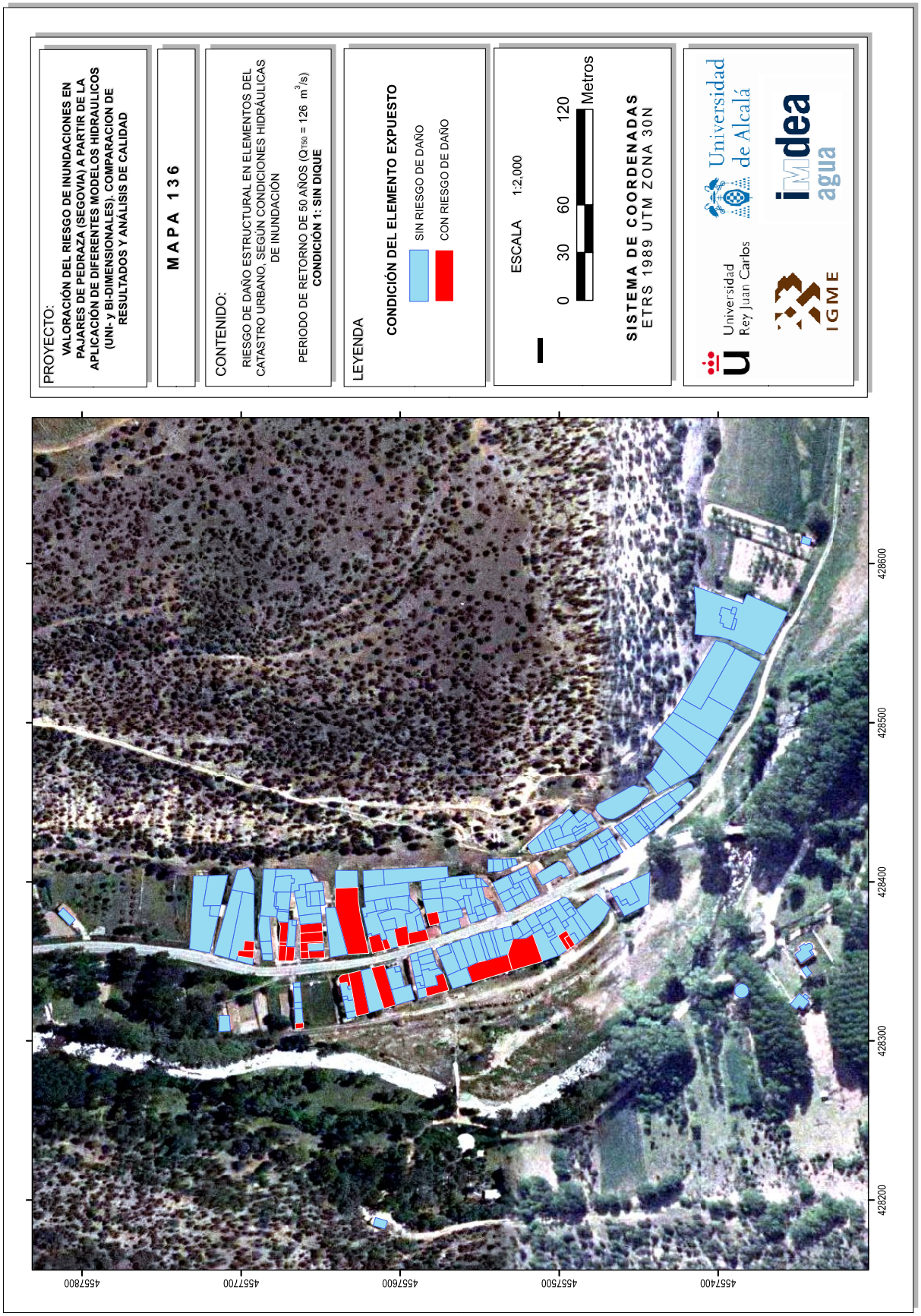

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 131
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS ($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800

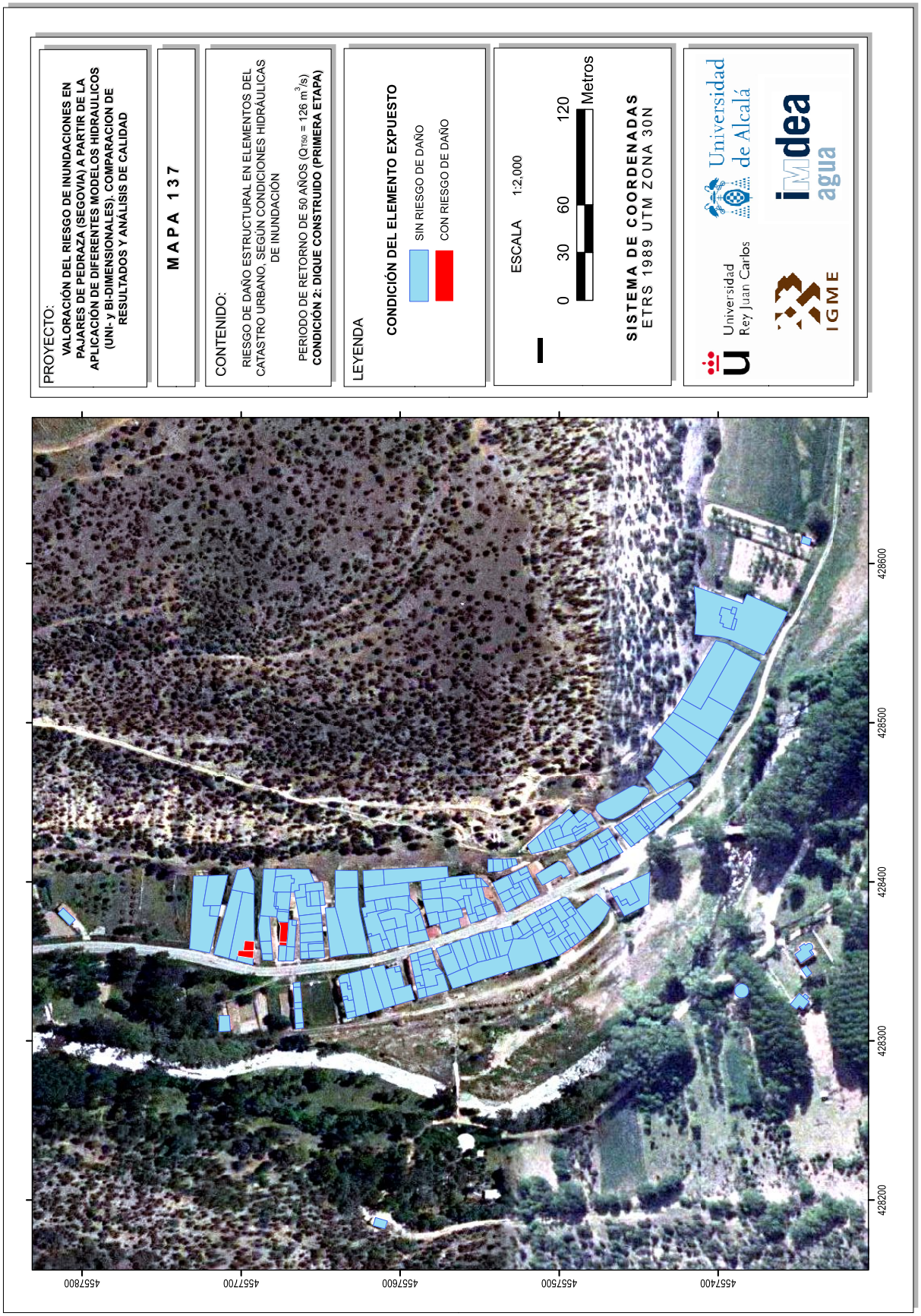

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 132
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS ($Q_{T5}$ = 59 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800

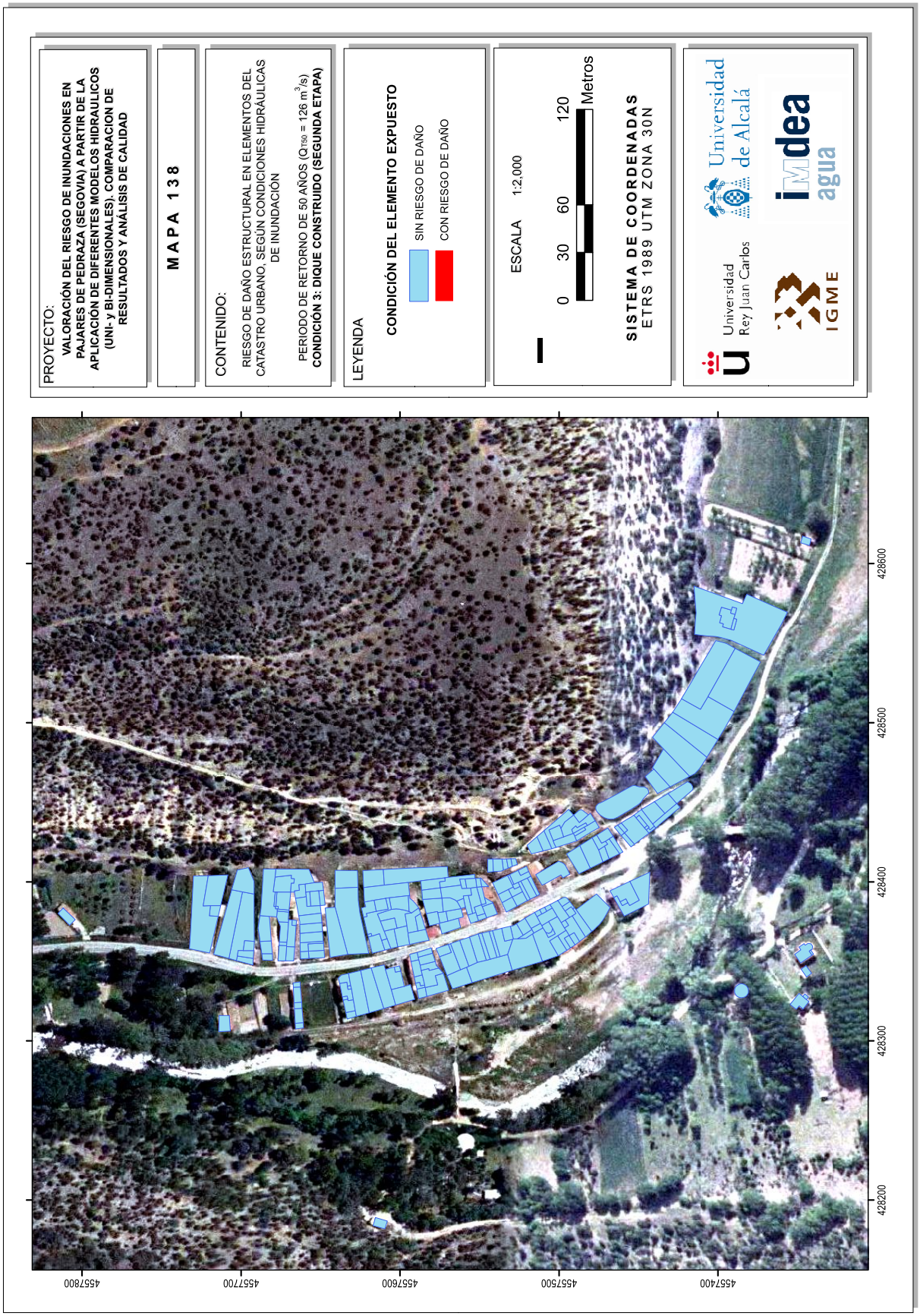

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 133
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557800
4557700
4557600
4557500
4557400
428600
428500
428400
428300
428200

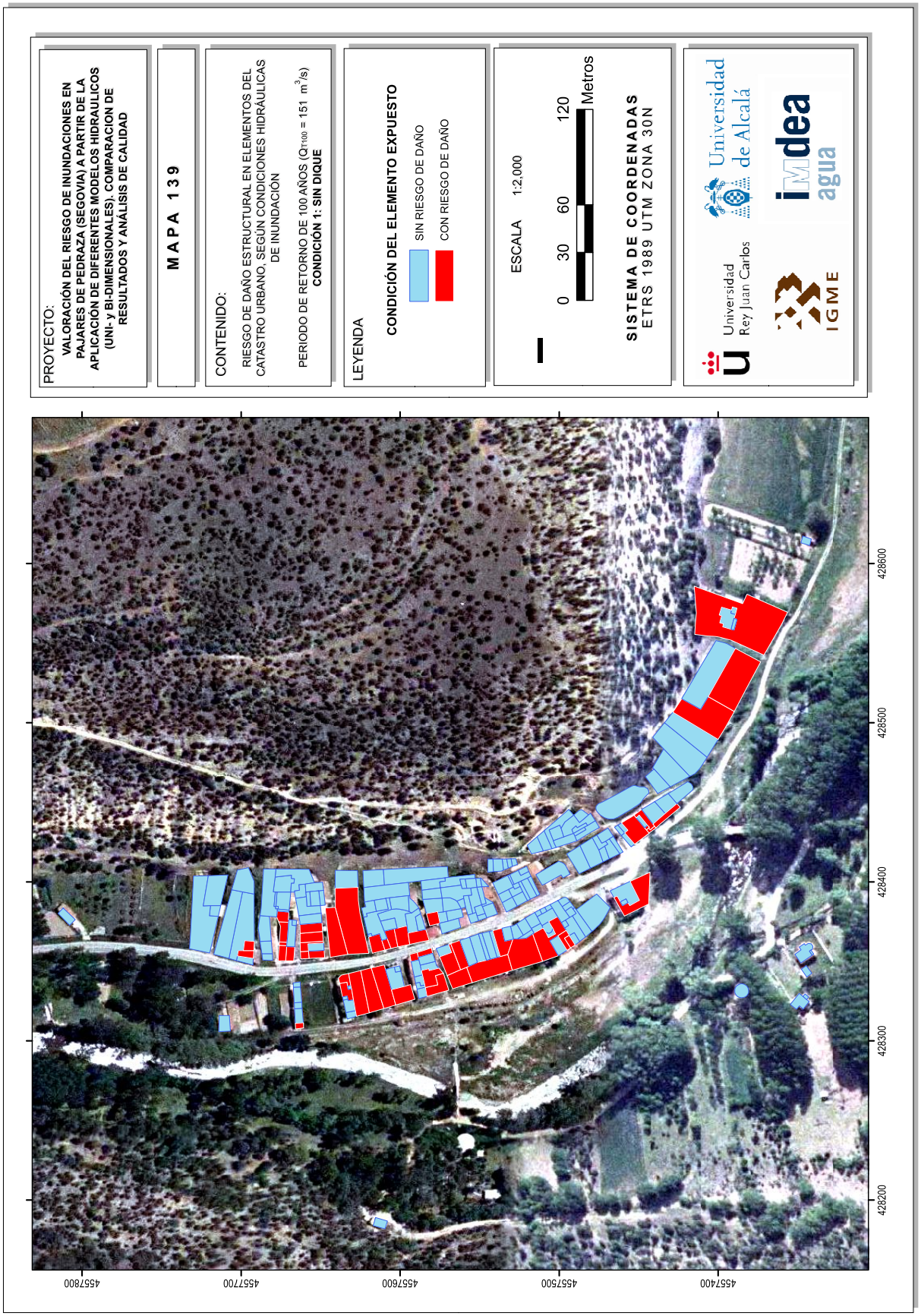

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 134
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800

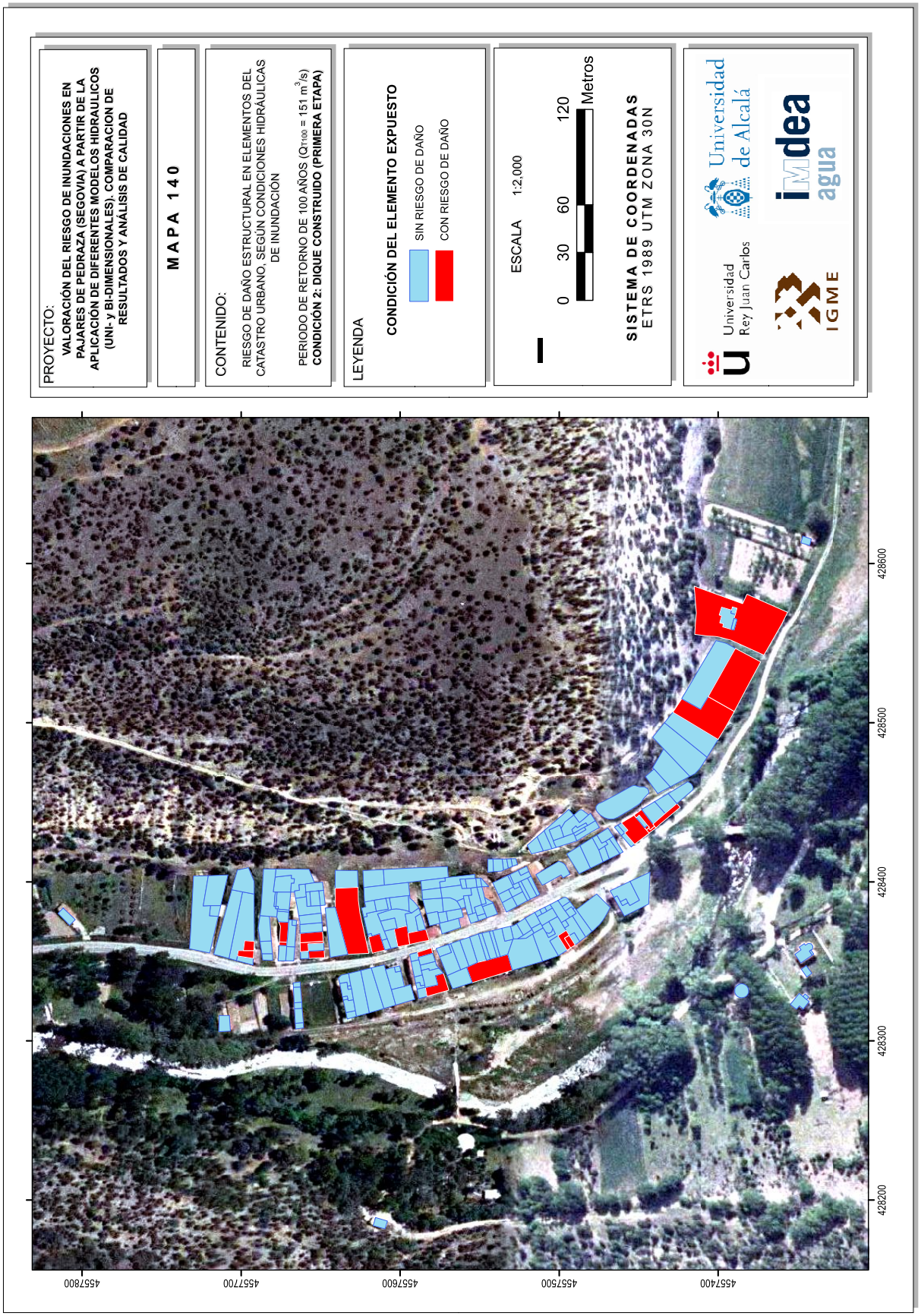

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 135
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS ($Q_{T25}$ = 104 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800

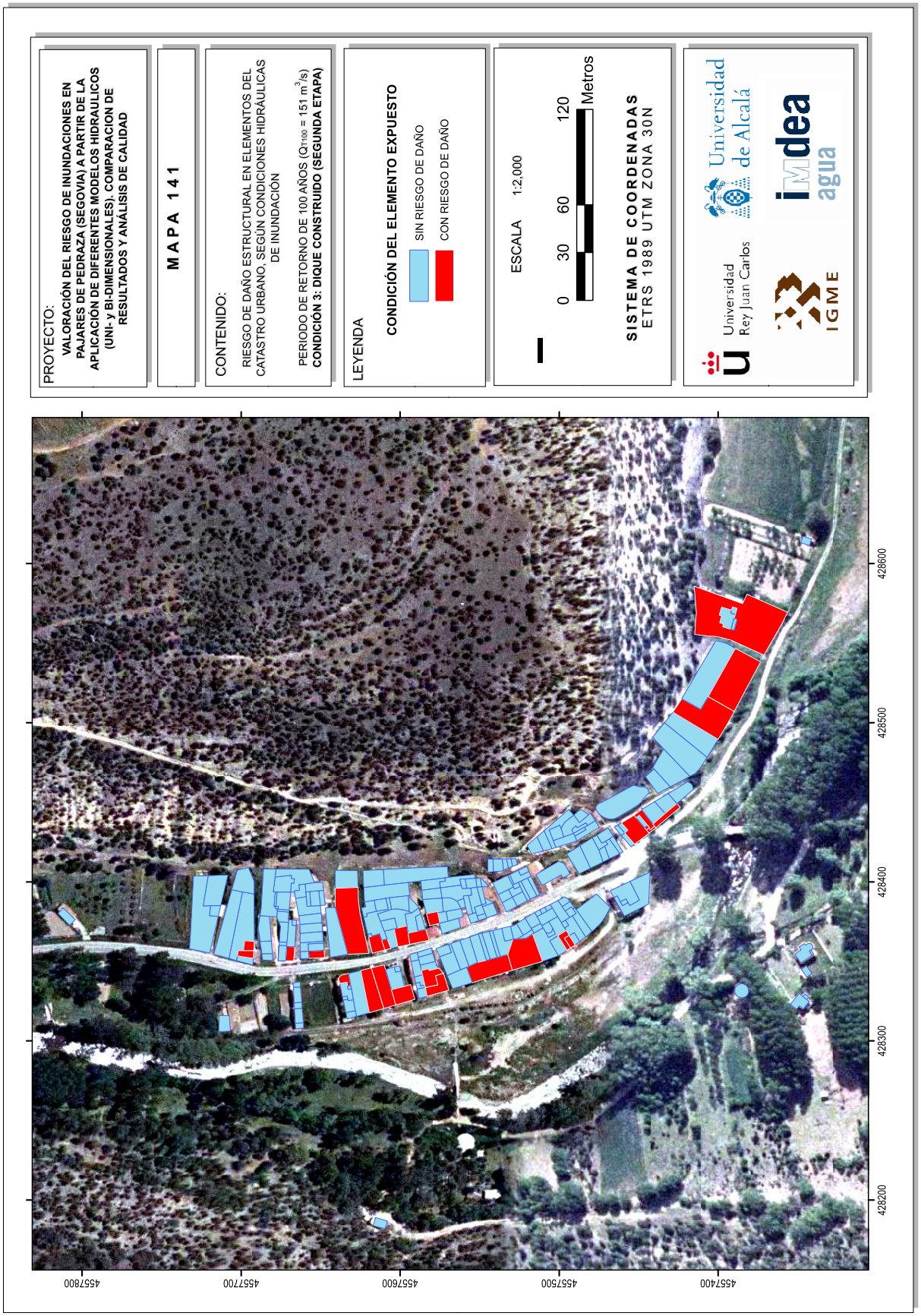

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 136
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800

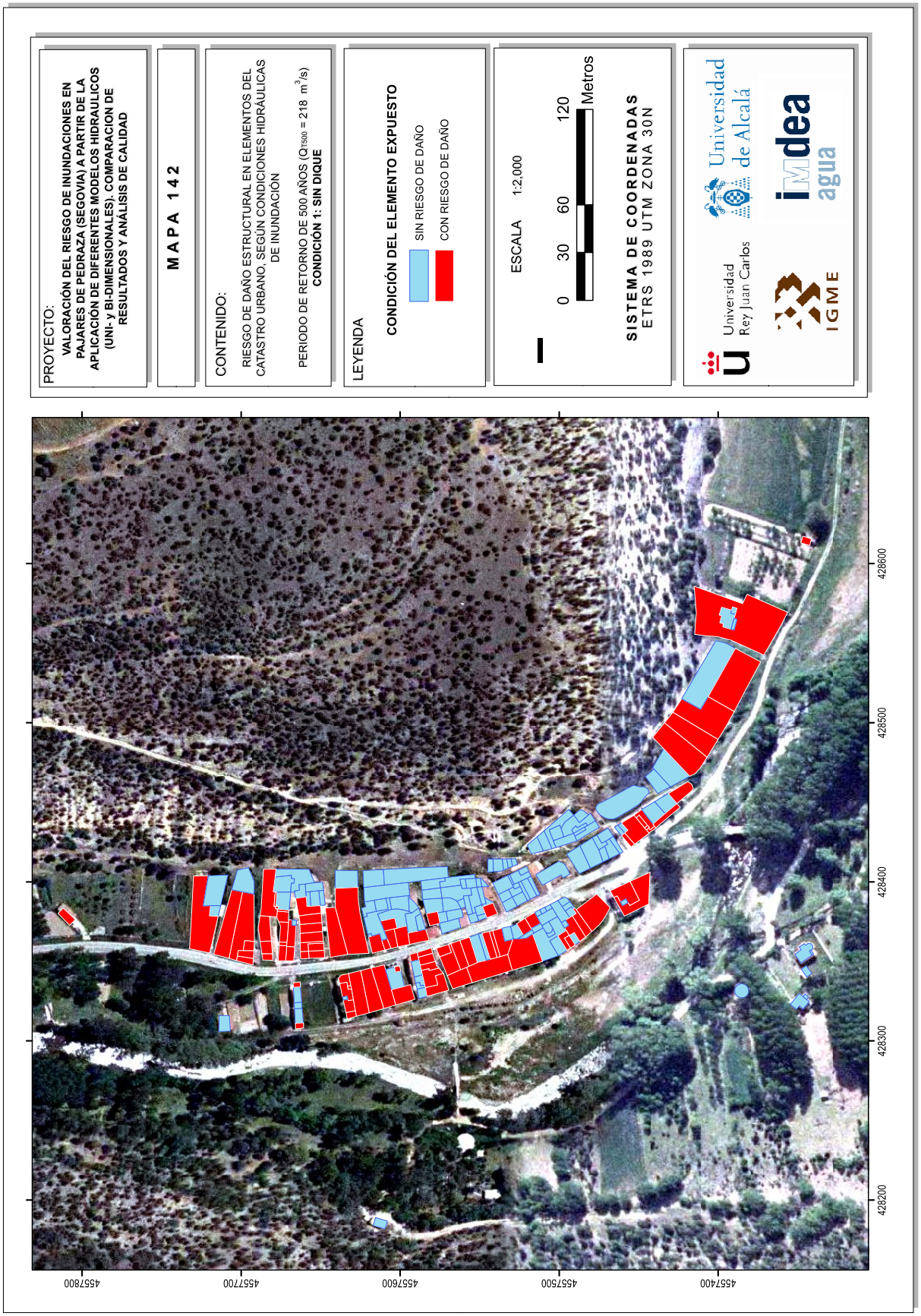

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 137
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457800
457700
457600
457500
457400

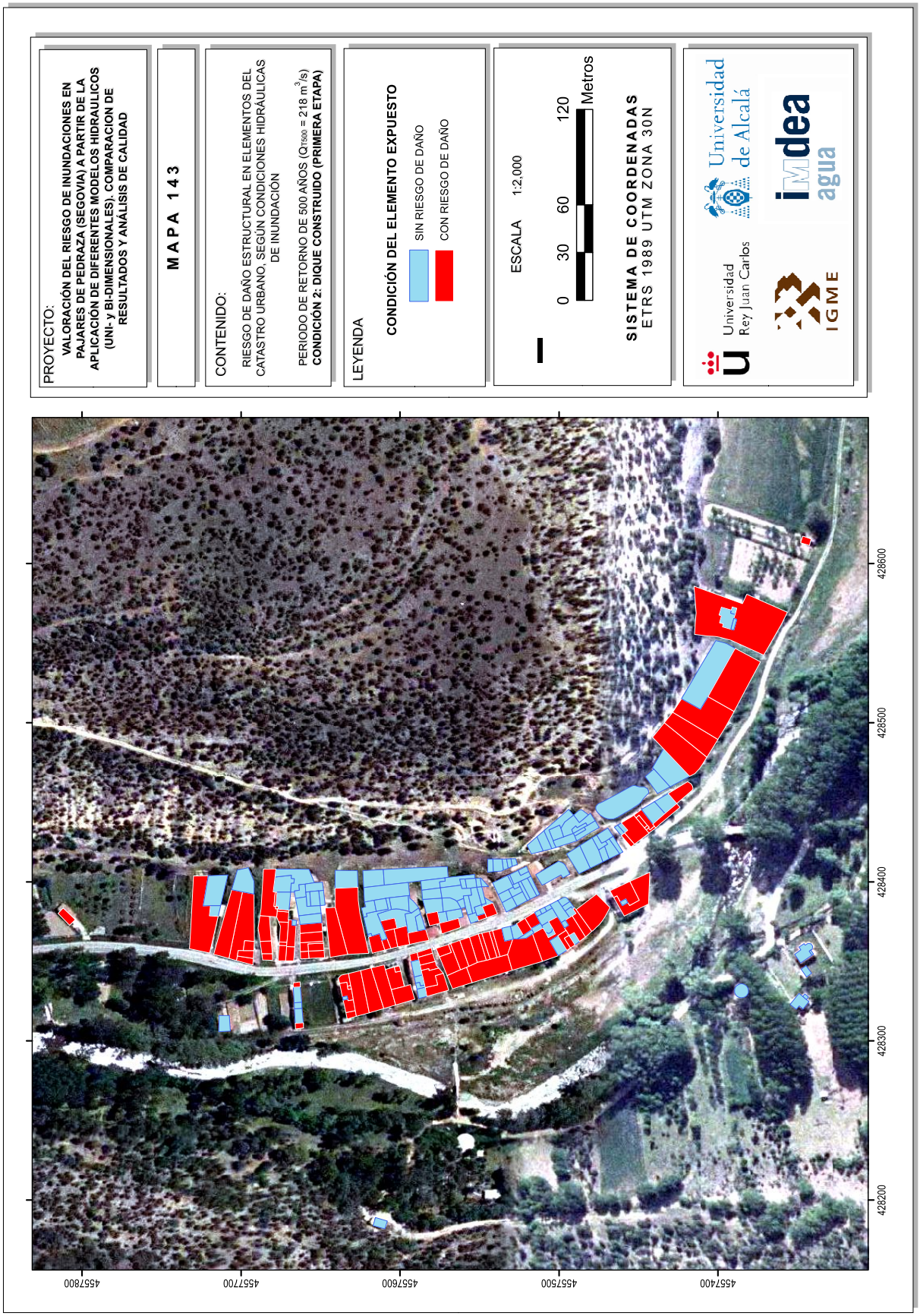

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 138
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS ($Q_{T50}$ = 126 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800

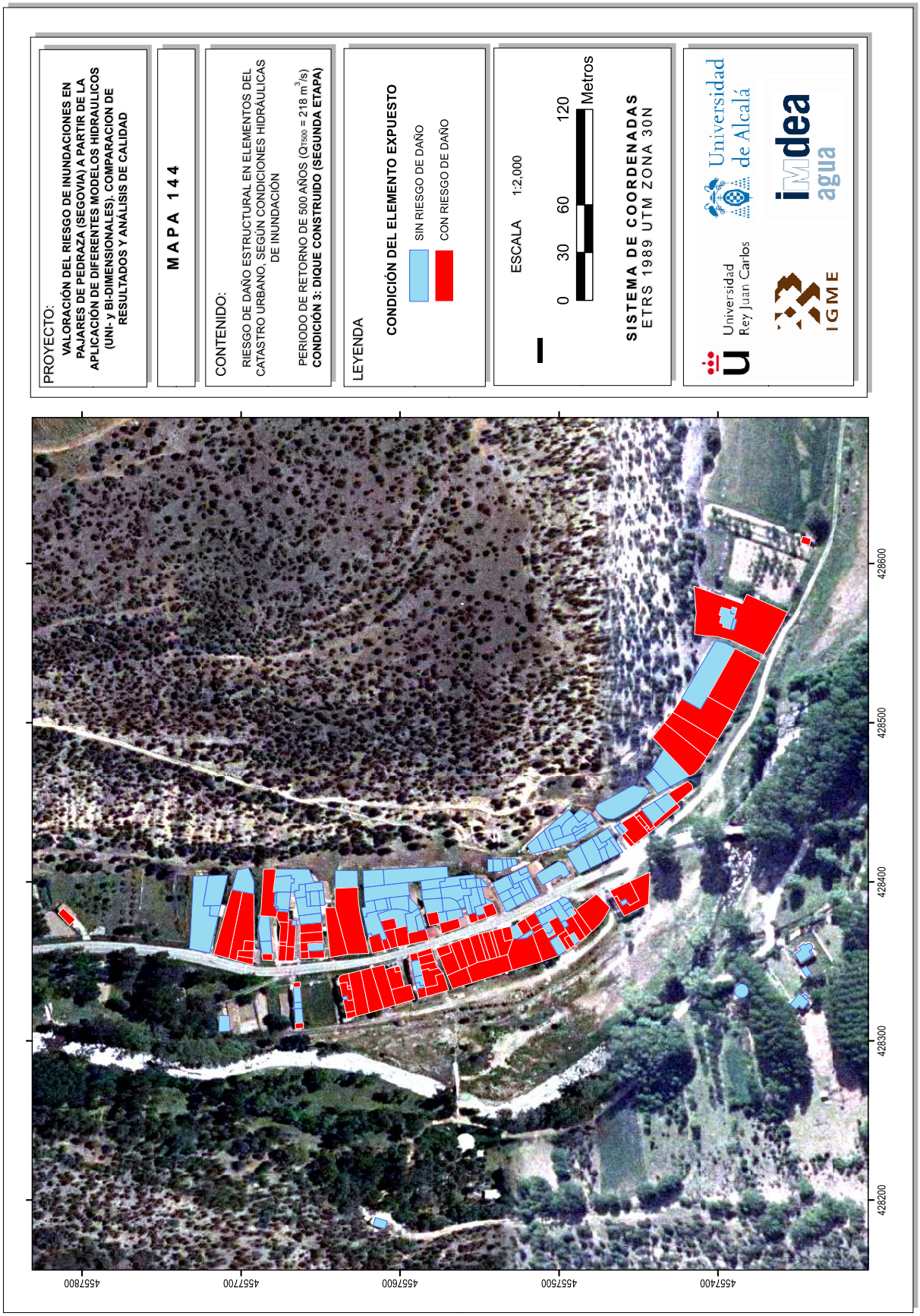

PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 139
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
4557400
4557500
4557600
4557700
4557800
428600
428500
428400
428300
428200


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 140
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 141
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS ($Q_{T100}$ = 151 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 142
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 1: SIN DIQUE
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 143
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 2: DIQUE CONSTRUIDO (PRIMERA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457400
457500
457600
457700
457800


PROYECTO:
VALORACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN PAJARES DE PEDRAZA (SEGOVIA) A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES MODELOS HIDRAULICOS (UNI- y BI-DIMENSIONALES). COMPARACION DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CALIDAD
MAPA 144
CONTENIDO:
RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN ELEMENTOS DEL CATASTRO URBANO, SEGÚN CONDICIONES HIDRÁULICAS DE INUNDACIÓN
PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS ($Q_{T500}$ = 218 $m^3/s$)
CONDICIÓN 3: DIQUE CONSTRUIDO (SEGUNDA ETAPA)
LEYENDA
CONDICIÓN DEL ELEMENTO EXPUESTO
SIN RIESGO DE DAÑO
CON RIESGO DE DAÑO
ESCALA 1:2,000
0 30 60 120 Metros
SISTEMA DE COORDENADAS
ETRS 1989 UTM ZONA 30N
Universidad de Alcalá
Universidad Rey Juan Carlos
IGME
idea agua
428600
428500
428400
428300
428200
457800
457700
457600
457500
457400

escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

**máster universitario**

en hidrología y gestión de recursos hídricos

**proyectos 2014**

# Adsorción y toxicidad de contaminantes emergentes en fangos activos

autora

**Georgiana Amariei**

directores

**Dr. Pedro Letón García (UAH)**

**Dra. Ana Karina Boltes Espínola (UAH)**

Alcalá de Henares, 16 de Junio de 2014

## AGRADECIMIENTOS

Con estas líneas pretendo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que durante este año de trabajo han estado a mi lado y que de una u otra forma han contribuido a que este trabajo haya llegado a buen fin.

Especialmente quisiera mostrar mi agradecimiento a D. Pedro Letón García, por tener siempre la puerta abierta para resolver dudas, atender quejas y en general, solucionar todo tipo de problemas que han surgido en el desarrollo del trabajo. Para mí no solo ha sido el mejor Director de Trabajo Fin de Master que he podido tener, sino que me ha demostrado en todo momento que es un amigo al que siempre podré recurrir.

A Dña. Ana Karina Boltes, quisiera agradecerle su estrecha colaboración en muchas de las tareas realizadas, así como su completa disposición a resolver cualquier duda o problema que se haya podido plantear.

Le agradezco a Ramón la guía indiscutible de mis primeros pasos en la técnica de cromatografía liquida de alta presión.

Quiero mostrar un agradecimiento especial a mi compañera del Master y amiga, Marta, que siempre ha confiado en mi capacidad para finalizar este trabajo animándome a seguir hasta el final.

A todos mis compañeros del Departamento de Ingeniería Química, UAH, como a los compañeros del Master, les agradezco toda la ayuda que me han prestado así como los buenos momentos que he pasado en su compañía.

Le doy las gracias a mi hermana, Mihaela, que de tanto escucharme conoce mi trabajo tan bien como yo, por ser mi peor crítico y a la vez mi gran apoyo.

Pero mi mayor agradecimiento se lo debo a mis padres, por apoyarme, desde muy lejos, en todas las decisiones que he tomado a lo largo de la vida, hayan sido buenas o malas, y especialmente por enseñarme a luchar por lo que quiero y a terminar lo que he empezado.

Si alguna de las personas que han pasado por mi vida en este último año no se encontrara en estas líneas espero que no se sienta ofendida por ello, ya que puede estar segura de que responde a uno de mis habituales despistes.

## ÍNDICE

1. Resumen ..... 268
2. Introducción ..... 268
2.1. Contaminates Emergentes ..... 268
2.1.1. Triclosan ..... 268
2.1.2. Ibuprofeno ..... 269
2.2. Procesos de adsorción en fangos activados ..... 269
2.3. Toxicidad en fangos activados ..... 270
2.3.1. Evaluación de la toxicidad mediante ensayos de respirometría ..... 270
2.3.2. Evaluación de la toxicidad mediante viabilidad celular con marcador FDA ..... 270
2.3.3. Efecto Combinado en mezclas ..... 271
2.4. Objetivo ..... 271
3. Materiales y métodos ..... 271
3.1. Preparación del Fango ..... 271
3.2. Estudios de adsorción ..... 272
3.2.1. Reactivos químicos ..... 272
3.2.2. Equipamiento ..... 272
3.2.3. Metodología experimental ..... 272
3.3. Estudios de Toxicidad ..... 273
3.3.1. Reactivos químicos ..... 273
3.3.2. Equipamiento ..... 273
3.3.3. Metodología experimental ..... 273
4. Resultados y discusión ..... 275
4.1. Estudios de adsorción ..... 275
4.1.1. Cinética de adsorción ..... 275
4.1.2. Mecanismos de adsorción ..... 275
4.2. Estudios de Toxicidad en Fangos Activados ..... 277
4.2.1. Ensayos de Respirometría ..... 277
4.2.2. Ensayos de viabilidad con marcador FDA ..... 280
4.2.3. Estudio del efecto tóxico combinado en mezclas ..... 282
5. Conclusiones ..... 283
5.1. Estudios de Adsorción ..... 283
5.2. Estudios de Toxicidad ..... 283
6. Bibliografía ..... 283
7. Anexos ..... 285
7.1. Anexo I. Pendientes coRrespondiente a la tasa de respiración para IBU, TCS y mezcla ..... 285
7.2. Anexo II. Emisión de fluorescencia para IBU, TCS y mezcla ..... 286

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Composición agua residual sintética ..... 272
**Tabla 2.** Parámetros de los modelos de adsorción Langmuir y Freundlich ..... 277
**Tabla 3.** Parámetros de la ecuación efecto-mediano en ensayos de respirometría ..... 278
**Tabla 4.** Valores $EC_{50}$ y $EC_{20}$ [mg/L] en ensayos de resiprometría ..... 279
**Tabla 5.** Parámetros de la ecuación dosis-mediano en ensayos de viabilidad celular ..... 281
**Tabla 6.** Valores $EC_{50}$ y $EC_{20}$ [mg/L] en ensayos de viabilidad celular ..... 281
**Tabla 7.** Valores del Índice de Combinación (IC) de la combinación binaria IBU+TCS en ensayos de respirometría y viabilidad celular ..... 282

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Sistema empleada para producción de Fango Activado. . . . . 271

**Figura 2.** Recta de calibrado densidad óptica vs concentración de biomasa . . . . . 272

**Figura 3.** Montaje experimental para ensayos de respirometría: Oximetro (Hansatech). . . . . 274

**Figura 4.** Luminometro Thermo Scientific™ FL, Ascent y microplaca . . . . . 274

**Figura 5.** Cinetica de adsorción en fango activado. . . . . 275

**Figura 6.** Isotermas de adsorción de IBU, TCS y mezcla sobre fango activado . . . . . 276

**Figura 7.** Isotermas de adsorción de IBU, TCS y mezcla sobre fango inactivado. . . . . 276

**Figura 8.** Pendientes corespondiente a la tasa de respiración para IBU . . . . . 278

**Figura 9.** Pendientes corespondiente a la tasa de respiración para TCS . . . . . 278

**Figura 10.** Pendientes corespondiente a la tasa de respiración para mezcla IBU+TCS . . . . . 278

**Figura 11.** Curva dosis-efecto en ensayos de respirometría para IBU. . . . . 279

**Figura 12.** Curva dosis-efecto en ensayos de respirometría para TCS. . . . . 279

**Figura 13.** Curva dosis-efecto en ensayos de respirometría para mezcla IBU+TCS . . . . . 279

**Figura 14.** Emisión de fluorescencia para IBU . . . . . 280

**Figura 15.** Emisión de fluorescencia para TCS . . . . . 280

**Figura 16.** Emisión de fluorescencia para mezcla IBU+TCS . 280

**Figura 17.** Curva dosis-efecto en ensayos de viabilidad celular para IBU . . . . . 281

**Figura 18.** Curva dosis-efecto en ensayos de viabilidad celular para TCS . . . . . 281

**Figura 19.** Curva dosis-efecto en ensayos de viabilidad celular para mezcla IBU+TCS . . . . . 281

**Figura 20.** Índice de combinación de la mezcla IBU+TCS en ensayos de respirometría . . . . . 282

**Figura 21.** Índice de combinación de la mezcla IBU+TCS en ensayos de viabilidad celular . . . . . 282

## INDICE DE ABREVIATURAS

**PPCP:** Pharmaceuticals and Personal Care Products

**AINE:** Anti-inflammatory Drug and Analgesic

**IBU:** Ibuprofeno

**TCS:** Triclosan

**EDAR:** Estación de Depuración de Aguas Residuales

**FDA:** Diacetato de Fluoresceína

**OUR:** Oxygen Uptake Rate

**HRT:** Hydraulic Retention Time

**HPLC:** High Performance Liquid Chromatography

**DSMO:** Dimetil sulfoxido

**RFU:** Relative Fluorescence Units

## 1. RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Master se lleva a cabo una investigación sobre el comportamiento de Ibuprofeno y Triclosan, individualmente y en combinación binaria, al entrar en contacto con una población de fangos activados procedentes de un sistema de laboratorio. Este comportamiento incluye tanto los mecanismos de adsorción como los efectos tóxicos en la comunidad microbiana de un fango activo.

Con carácter preliminar, se ha realizado por un lado, un estudio bibliográfico sobre el estado del arte en materia de los contaminantes emergentes en procesos de fangos activados. Revisando la literatura, hay un número limitado de publicaciones sobre la toxicidad de los contaminantes emergentes en fangos activados, y sólo se han realizado validaciones individuales. Además se realizó y optimizó una metodología para la producción de fango activado a nivel de laboratorio.

Llegados a este punto, el trabajo plantea, por una parte, los mecanismos de adsorción mediante la realización de isotermas, evaluando los resultados con los modelos de Freundlich y Langmuir, para dos tipos de fango, tanto de forma individual como en mezcla.

Por otro lado, los efectos de toxicidad se evaluaron utilizando dos métodos de análisis: mediante el consumo de oxígeno por técnicas respirométricas y la viabilidad celular mediante el marcador FDA. La toxicidad de cada uno de los compuestos y su mezcla se estudiaron para diferentes concentraciones de fango.

Los resultados obtenidos demuestran que el fango tiene mayor capacidad de adsorción para Triclosan que para Ibuprofeno, siguiendo en todos los casos el modelo de Freundlich. Por otro lado Triclosan presenta una mayor toxicidad que el Ibuprofeno en fango activado, siendo la respirometría una técnica más sensible que la viabilidad celular.

El carácter innovador y abierto que confiere este estudio de investigación hace que la parte de Toxicidad en Fangos Activados haya sido aceptada para una comunicación oral en el Congreso **ANQUE-ICCE-BIOTEC2014.**

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. CONTAMINATES EMERGENTES

En los últimos años, se ha producido un gran interés en la investigación sobre el efecto de los denominados contaminantes emergentes.

Los ''contaminantes emergentes'' se corresponden en la mayoría de los casos con los contaminantes no regulados, que pueden tener efectos tóxicos en el medio ambiente. La característica de estos grupos de contaminantes es la persistencia en el medio ambiente debida no la presencia en concentraciones altas sino a la introducción de forma continua en el medio ambiente. Ejemplos de compuestos que han surgido recientemente como relevantes para esta clase de compuestos son: surfactantes, productos farmacéuticos y de cuidado personal (*Pharmaceuticals and Personal Care Products*, PPCP) y aditivos de la gasolina (Barceló et al, 2003).

Dado que los contaminantes emergentes incluyen una amplia clase de compuestos y considerando que este estudio debe estar acotado, en este caso nos limitamos a trabajar y estudiar los fármacos y productos de cuidado personal (PPCP). La presencia de productos farmacéuticos y de cuidado personal en el medio ambiente acuático se han detectado con frecuencia en todo el mundo y se ha mencionado como uno de los problemas ambientales prioritarios (Al-Odaini et al, 2010).

Los PPCPs incluyen una variedad de sustancias químicas, incluidos los medicamentos humanos y veterinarios, utilizados para prevenir o tratar enfermedades humanas y animales y los desinfectantes y fragancias utilizadas en productos de cuidado personal (por ejemplo, lociones, productos de limpieza corporal y protectores solares) y productos químicos de uso doméstico para mejorar la calidad de vida de cada día.

Estos contaminantes procedentes generalmente de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, sistemas de tratamiento in-situ descentralizado, fábricas, hospitales y actividades urbanas, se incorporan al medio ambiente de manera continua (Daughton y Ternes, 1999; Fenech et al, 2013; Liu y Wong, 2013; Verlicchi et al, 2012) y llegan a detectarse en diferentes ambientes acuáticos, como aguas residuales, aguas superficiales, aguas subterráneas, e incluso el agua potable en todo el mundo (Benotti et al, 2009; Lapworth et al, 2012; Zhang et al, 2013). Se espera que la emisión de estos productos en el medio ambiente aumente debido al aumento de las actividades humanas (Liu et al, 2013).

Los PPCPs en general son persistentes o pseudo-persistentes, debido a la emisión continua, en el medio ambiente y muchos son tóxicos para los organismos no-objetivo. También tienen potencial de bioacumulación en organismos de diferentes niveles tróficos (Liu et al, 2013).

Por lo tanto, desde mediados de la década de 1990, los estudios relacionados con la incidencia, efectos y riesgos de los PPCPs en el medio ambiente se han más que duplicado o incluso triplicado.

Revisando la literatura científica en materia de PPCPs que incluye una amplia gama de compuestos, cabe destacar como dos de los compuestos más estudiados el Triclosan y el Ibuprofeno (Daughton y Ternes, 1999; Kummerer, 2009; Lozano et al, 2013; Sanderson y Thomsen, 2009; Zhang et al, 2014).

#### 2.1.1. TRICLOSAN

Triclosan ($C_{12}H_7Cl_3O_2$) en adelante TCS, es un agente antimicrobiano sintético y conservante común que ha sido incorporado en más de 700 diferentes productos para el cuidado personal y para el sector textil, incluyendo desodorantes, jabones, pastas de dientes y diversos productos de plástico. La producción anual en Europa es de aproximadamente 350 t de TCS para aplicaciones comerciales. El uso de productos de cuidado personal que contienen TCS contaminaron las aguas residuales, arroyos, agua de mar, sedimentos, la sangre y la orina (Queckenberg et al, 2010).

Las concentraciones de TCS en la entrada y el efluente de un EDAR fueron estudiados por muchos investigadores encontrándose valores desde 0,01 hasta 16 mg/l en el afluente y desde 0,01 a 2,7 mg/L en el efluente, lo que sugiere eficiencias de eliminación de 58 a 97% para plantas con filtro percolador y 95-98% para las plantas de fangos activados. La biodegradación de TCS en las plantas de tratamiento de aguas residuales y posteriormente en el medio ambiente se ha convertido recientemente en un tema de investigación de interés (Roh et al, 2009). El alto coeficiente de partición octanol-agua de TCS con valores de log $k_{ow}$ entre 4,5 a 4,8 (Banihashemi y Droste, 2014), podría conducir a un 30-50% de eliminación de TCS debido a la adsorción en los biosólidos de EDAR. El resto del porcentaje, hasta el 95-98%, se le puede atribuir a la degradación biológica.

### 2.1.2. IBUPROFENO

El ibuprofeno ($C_{13}H_{18}O_2$), en adelante IBU, pertenece a una amplia familia de medicamentos clasificados como fármacos anti-inflamatorios no esteroideos (*Anti-inflammatory Drug and Analgesic*, AINE), y es uno de los ingredientes farmacéuticos activos más utilizado en todo el mundo. Debido a su alto consumo, IBU ha sido el tercer producto farmacéutico más vendido en España durante los últimos años y a su ubicuidad, en el medio ambiente y el potencial impacto ecológico en el ámbito acuático son una causa de preocupación. Varios autores han encontrado ibuprofeno en los diferentes compartimentos ambientales como los sedimentos, la superficie, las aguas subterráneas e incluso en agua potable (Caliman y Gavrilescu, 2009; Gros et al, 2009; Santos et al, 2010; Teijon et al, 2010).

La presencia de ibuprofeno en las aguas residuales, su eliminación y transformación a lo largo de los procesos de tratamiento en EDAR también se ha estudiado (Farré et al, 2008; Onesios et al, 2009; Teijon et al, 2010). Su elevada tasa de eliminación general en las EDAR (alrededor de 90%), se puede atribuir principalmente a la biodegradación (Onesios et al, 2009) en combinación con procesos de adsorción (Jelic et al, 2011).

Para estos contaminantes emergentes hay varios estudios del comportamiento en los distintos compartimentos del medio ambiente. Sin embargo, se sabe poco acerca del comportamiento de los mismos en los fangos activados, proceso secundario clásico en el tratamiento de aguas residuales urbanas.

## 2.2. PROCESOS DE ADSORCIÓN EN FANGOS ACTIVADOS

Los procesos que se producen cuando entran en contacto los fangos activados con estos compuestos emergentes dentro del tratamiento secundario, son la biodegradación y la adsorción (Hyland et al, 2012; Jelic et al, 2011; Maeng et al, 2011.; Yang et al, 2012).

Los procesos de adsorción en los fangos activados son de especial interés debido a que la extracción del exceso de fangos producidos en las EDAR representa una vía de eliminación importante y por otro lado la adsorción es a menudo la primera etapa en la degradación biológica.

La operación de adsorción supone la separación de un componente o componentes de una corriente de un gas o mezcla de una solución debido a su retención en la superficie de un sólido, llamado adsorbente.

El proceso de adsorción se caracteriza por el equilibrio de adsorción, que expresa la distribución cuantitativa, al equilibrio, de la sustancia adsorbida entre la fase adsorbente y la fase acuosa, y por la cinética, que describe el mecanismo del proceso de adsorción y la velocidad con la que se lleva a cabo el proceso.

La relación de distribución entre el adsorbente y el adsorbente del agua, a una temperatura dada, después de un tiempo de contacto suficiente para establecer el equilibrio, se expresa por la isoterma de adsorción. Es una representación gráfica que permite la evaluación cuantitativa de la dependencia del coeficiente de adsorción (q) en función de la concentración en equilibrio del compuesto en la solución ($C_e$), a temperatura constante.

Son dos los modelos matemáticos más utilizados para describir el fenómeno de adsorción:

#### Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir es el tipo más común, que se describe para la adsorción gas-sólido, la adsorción de gas-líquido y la adsorción líquido-sólido. Corresponde a la adsorción química monocapa. Se puede describir por la ecuación 1:

$$q = q_m - \frac{b - C_e}{1 + b \cdot C_e} \qquad (1)$$

donde:

$q_m$: coeficiente másico máximo de adsorción

b: parámetro de Langmuir

$C_e$: concentración en equilibrio

La linealización de esta ecuación:

$$\frac{C_i}{q} = \frac{1}{q_m - b} + \frac{1}{q_m} \cdot C_i \qquad (2)$$

permite determinar los parámetros de Langmuir, es decir, el coeficiente de adsorción máxima y la constante b, con el grafico $C_i/q = f(C_i)$.

#### Isoterma Freundlich

Una ecuación que muestra la evolución experimental de las isotermas, es también la parabólica de Freundlich, válida para concentraciones medias y bajas del adsorbato en solución (ecuación 3):

$$q_i = k \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \qquad (3)$$

donde

k, $\frac{1}{n}$: parámetros de Freundlich

$q_i$: coeficiente másico de adsorción

$C_i$: concentración en equilibrio

También es importante el reparto de PPCPs entre las fases sólida y líquida debido a la gran concentración de biomasa y sólidos en suspensión asociados. Muchos estudios sobre la adsorción de contaminantes emergentes se centran sólo en la medición de la concentración de los mismos en la fase líquida (Feng et al, 2010; Seyhi et al, 2011). En cambio, sólo en los últimos años los investigadores han empezado a estudiar los contaminantes emergentes en la fase sólida a concentraciones muy bajas (Nie et al, 2009; Stevens-Garmon et al, 2011).

Por lo tanto en este estudio la adsorción de IBU y TCS en fango activado o inactivado fueron investigados en paralelo mediante la medición de la concentración tanto en fase líquida como en fase sólida con el fin de distinguir las propiedades fisicoquímicas de adsorción y los procesos de biodegradación.

## 2.3. TOXICIDAD EN FANGOS ACTIVADOS

En la actualidad, la toxicología alcanza enorme trascendencia social debido al importante número de sustancias químicas comercializadas y su posible impacto sobre la salud pública y ambiental.

Generalmente en la evaluación de la toxicidad de este tipo de compuestos sobre el medio natural se suelen utilizar objetivos estándar, como algas, *Vibrio fischery*, *Daphnia magna* (Backhaus et al, 2011; Dave y Herger, 2012; Liu et al, 2011) mientras que se estudió muy poco el efecto de estos productos sobre fangos activados (Pasquini et al, 2013; Stasinakis et al, 2007).

Entre los trabajos realizados sobre la toxicidad en fango activados cabe decir que muy pocas usaron ensayos de respirometría (Stasinakisa et al, 2008) y en ningún caso la muerte celular con el marcador diacetato de fluoresceína (*fluorescein diactetate*, FDA), muy utilizado en resistencia a antibióticos como ensayo de viabilidad pero en ningún caso como ensayo de evaluación toxicológica.

### 2.3.1. EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD MEDIANTE ENSAYOS DE RESPIROMETRÍA

La respirometría es una técnica basada en la medición del consumo de oxígeno o tasa de respiración (*Oxygen Uptake Rate*, OUR), por parte de los microorganismos presentes en el fango activo.

Las bacterias aerobias requieren oxígeno para el mantenimiento, crecimiento y división de la célula. Por lo tanto, la velocidad con que toman el oxígeno o velocidad de respiración es un parámetro útil para establecer cuando una bacteria está en un estado normal, activo y saludable. La velocidad de respiración responde rápidamente a la presencia de inhibidores. Sin embargo, no todos los inhibidores afectan los procesos de respiración de la bacteria. Una célula puede incluso consumir oxígeno después de haber perdido su capacidad para crecer y dividirse, es decir estar activa pero no viable. La pérdida de respiración significa la muerte de la célula y, por lo tanto, puede ser una medida de toxicidad aguda.

La medición de la velocidad de respiración puede realizarse de distintas formas, una de ellas es el uso de electrodos de oxígeno de célula galvánica. Las muestras son introducidas en un recipiente que contiene un electrodo, el cual detecta el decrecimiento en las concentraciones de oxígeno disuelto en función del tiempo. El intervalo de tiempo considerado para la detección de la inhibición de la respirometría en los procedimientos del test es muy corto (<10 min) para evitar cualquier interferencia causada por biodegradación de los compuestos utilizados. La pendiente de la recta resultante es la velocidad de respiración en $mgO_2/L{\cdot}min$.

El método de toxicidad basado en la inhibición de la respiración de los fangos activados es un ensayo normalizado (OCDE 209) y de referencia ya que es simple, tiene una buena reproducibilidad y los microorganismos son representativos de la biomasa ensayada.

### 2.3.2. EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD MEDIANTE VIABILIDAD CELULAR CON MARCADOR FDA

La citotoxicidad celular se define como una alteración de las funciones celulares básicas que conlleva a un daño que puede ser detectado, siendo uno de ellos el método de viabilidad celular con marcador FDA, técnica basada en la medición de las células viables presentes en una biomasa.

El ensayo descrito por Chand et al, 1994 se basa en el principio de que sólo las células vivas convierten el FDA en fluoresceína. Las células viables tienen la capacidad de incorporar el compuesto FDA, no polar, no fluorescente y de hidrolizarlo rápidamente en su interior, debido a la actividad de la enzima acetil esterasa, y transformándolo en fluoresceína, compuesto polar fluorescente que es retenido dentro de la célula. Las células no viables no tienen la actividad esterasa y no producen fluorescencia. De esta manera solo las células viables provocan una fluorescencia de color verde brillante. Fluoresceína puede entonces ser detectada mediante la medición de la fluorescencia o absorbancia de la muestra.

Los ensayos con marcador FDA como una medida de toxicidad se basará por tanto en la generación de una diferencia detectable entre la fluoresceína producida en la presencia de células vivas en comparación con la producida por las células muertas o estáticas.

El uso del método de la viabilidad celular con marcador FDA como una medida de la toxicidad se utilizó por primera vez por Kramer y Guilbault 1963 y ahora es ampliamente utilizado como un indicador de la viabilidad de células. Se han reportado varias publicaciones en las cuales se determina la toxicidad utilizado la viabilidad celular en algas marinas (Gaume et al, 2012; Gilroy et al, 2014) y células vegetales (Brausch y Rand, 2011), pero no hay ninguna publicación que utiliza este método para la evaluación de la toxicidad en fangos activados.

Las ventajas de utilizar el marcador FDA son la velocidad a la que se pueden obtener los resultados, el pequeño volumen de muestra necesario para análisis y la reducción del riesgo de contaminación en comparación con los ensayos más tradicionales.

### 2.3.3. EFECTO COMBINADO EN MEZCLAS

Los contaminantes no aparecen por separado en el medio ambiente acuático, aparecen como mezclas complejas, cuyos efectos combinados pueden presentar toxicidad para la biota acuática.

Los métodos actuales de evaluación de toxicidad por lo general se centran en la evaluación de sustancias químicas individuales (Dave y Herger, 2012; Ellesat et al, 2010), que pueden subestimar el riesgo asociado a la acción tóxica de las mezclas; por esta razón, en los últimos años existe un número creciente de estudios realizados para mezclas complejas de compuestos (Backhaus et al, 2011; Beyer et al, 2014; Quinn et al, 2009; Petersen et al, 2014).

La evaluación de toxicidad de compuestos combinados no es un tema fácil. El efecto combinado de los productos químicos puede ser estudiado por la aplicación de los dos más utilizado modelos de predicción de efectos aditivos: la adición de concentración (CA) y la acción independiente (IA). Estos conceptos fueron introducidos por primera vez por Loewe y Muischnek (1926) y Bliss (1939) respectivamente y se basan en la suposición de que todos los compuestos en una mezcla afectan al mismo objetivo y que los compuestos actúan de forma similar (CA) o diferente (IA). A medida que los modelos se usan como punto de referencia para los efectos aditivos, las desviaciones de los modelos indican interacciones tales como la sinergia (más de efectos aditivos) y antagonismo (menos de efectos aditivos).

Sin embargo, las interacciones toxicológicas, sinergias o antagonismos, entre los compuestos y sus efectos pueden ocurrir independientemente del modo de acción; por otra parte, en la mayoría de los casos, los mecanismos de acción se conocen, pero el modo de acción tóxica puede permanecer desconocida (Chou, 2006; Cleuvers, 2003).

Para superar este inconveniente, se puede aplicar un método utilizado mucho en farmacología para interpretar las interacciones entre medicamentos; este método, denominado como la ecuación de efecto mediano (ecuación 4) y el índice de combinación, IC, (Chou, 2006) permite determinaciones cuantitativas de las interacciones químicas, donde IC <1, 1, y > 1 indican sinergia, efecto aditivo y antagonismo respectivamente (ecuación 5):

$$\frac{f_a}{f_u} = \left(\frac{D}{D_m}\right)^m \qquad (4)$$

Donde: $D$ es la dosis; $D_m$ es la dosis que provoca el 50% de inhibición; $f_a$ es la fracción afectada por la dosis $D$; $f_u$ es la fracción sin afectar; $m$ es el exponente de Hill.

$$(IC)\frac{n}{x} = \sum_{j=1}^{n} \frac{(D)_j}{D_{x_j}} = \sum_{j}^{n} \frac{(D_x)1 - n\{[D]_j / \sum_1^n [D]\}}{(D_m)_j \{(f_{ax})_j / [1 - (f_{ax})_j]\}^{1/mj}} \qquad (5)$$

donde:

$(IC)_x^n$ es el índice de combinación de n productos químicos a x% inhibición; $(D_x)_{1-n}$ es la suma de la dosis de n productos químicos que en combinación ejerce x% inhibición; $\{[D]_j / \sum_1^n [D]\}$ es la proporcionalidad de la dosis de cada uno de n productos químicos que en combinación ejerce inhibición de x% y $(D_m)_j \{(f_{ax})_j / [1 - (f_{ax})_j]\}^{1/mj}$ es la dosis de cada compuesto que ejerce la inhibición de x%.

El método tiene en cuenta tanto la potencia como las formas de la curva de dosis-efecto de cada sustancia química y no requiere el conocimiento previo de los mecanismos de acción de cada producto químico. El método ha sido informatizado, lo que permite una simulación automatizada de sinergismo y antagonismo en diferentes concentraciones y en diferentes niveles de efecto de los productos químicos en una mezcla (Rodea et al, 2010).

## 2.4. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es investigar el comportamiento de Ibuprofeno y Triclosan individualmente y en combinación binaria al entrar en contacto con una población de fangos activados procedentes de un proceso de tratamiento secundario de aguas residuales. Este comportamiento incluye tanto los mecanismos de adsorción como los efectos tóxicos en la microflora de un fango activo.

Para alcanzar estos objetivos se estudió, por una parte, los mecanismos de adsorción mediante la realización de isotermas, evaluando los resultados con los modelos de Freundlich y Langmuir, para dos tipos de fango, tanto de forma individual como en mezcla.

Por otro lado, los efectos de toxicidad se evaluaron mediante el consumo de oxígeno por técnicas respirométricas y la viabilidad celular mediante el marcador FDA. La toxicidad de cada uno de los compuestos y su mezcla se estudiaron para diferentes concentraciones de fango.

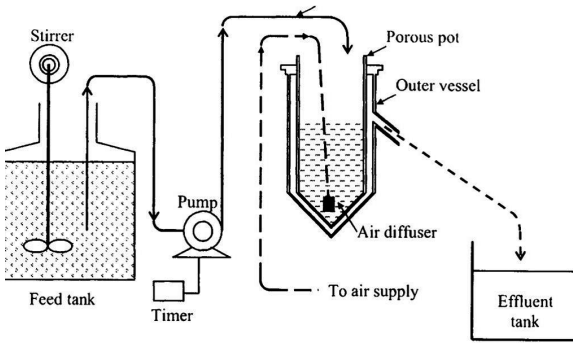
# 3. MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1. PREPARACIÓN DEL FANGO

**Fango Activado**

El fango utilizado se obtiene con un reactor de flujo en continuo, de 5L (figura 1), alimentado con agua residual sintética, con tiempo de retención hidráulica (HRT) de 24h.

*Figura 1. Sistema empleada para producción de Fango Activado*




El agua residual sintética (tabla I) está compuesto de agua destilada, suplementado con nutrientes, oligoelementos, tal y

como se describe en la norma OCDE 209, utilizada en ensayos de respirometría. Este agua residual sintética es muy utilizada como agua residual que simula las condiciones de las aguas residuales urbanas (Banihashemi y Droste, 2014).

*Tabla 1. Composición agua residual sintética*

| Reactivo | Cantidad [g] |
|---|---|
| Peptona | 1,6 |
| extracto de carne | 1,1 |
| Urea | 0,3 |
| $CaC1_2*2H_2O$ | 0,04 |
| NaCl | 0,07 |
| $MgSO_4*7H2O$ | 0,02 |
| $K_2HPO_4$ | 0,28 |

Para comprobar que se ha alcanzado el régimen estacionario en este reactor se determinaron los siguientes parámetros: DQO 400 mg/L, TSS 4185mg/L y pH 6,9.

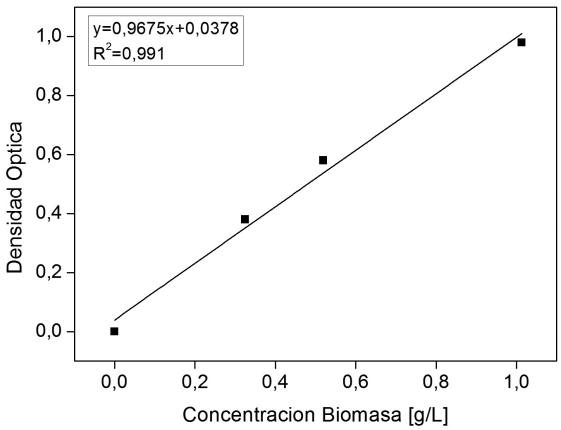
**Fango Inactivado**

La inactivación del fango se realizó mediante tratamiento térmico, autoclavando a una temperatura de 112 °C durante 20 minutos.

**Recta de calibración**

Dado que la concentración del fango es muy importante para toda la experimentación se determinó la recta de calibrado que relaciona la densidad óptica (absorbancia) con concentración de fango (figura 2):

*Figura 2. Recta de calibrado densidad óptica vs concentración de biomasa*




## 3.2. ESTUDIOS DE ADSORCIÓN

### 3.2.1. REACTIVOS QUÍMICOS

Los reactivos químicos utilizados en los ensayos fueron:

- Ibuprofeno sal, $C_{13}H_{18}O_2Na$ (Panreac)
- Triclosan, $C_{12}H_7Cl_3O_2$ (Panreac)
- Tampón fosfato: $NaH_2PO_4$, $Na_2HPO_4$

### 3.2.2. EQUIPAMIENTO

Los dispositivos utilizados en este trabajo fueron:

- HPLC Agilent Technologies 1200, EIW-051
- Espectrofotometro Shimadzu UV-1800
- Agitador orbital Bunsen AO-400
- Centrifuga Multifuge Heraeus
- Baño de ultrasonidos

### 3.2.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para los estudios de adsorción se obtuvieron muestras tanto de la fase líquida como sólida, empleando la siguiente metodología experimental:

#### 3.2.3.1. Realización del ensayo

En seis Erlenmeyer de 100 mL de capacidad se añadieron 10 mL que contenían una concentración de fango activado (o inactivado) de 2000 mg/L y 5 diferentes concentraciones iniciales de tóxicos (5-50 mg/L de IBU y 0,5-5 mg/L de TCS). Las muestras se agitaron a 200 rpm y a 25 °C utilizando un agitador orbital hasta alcanzar estado de equilibrio. El tiempo de equilibrio fue de 1 hora, determinado por estudios de cinética preliminares. El volumen de las muestras se centrifugó a 10.000 rpm, 25 °C durante 10 min. A continuación, el líquido sobrenadante del tubo se filtró a través de un filtro de jeringa Milipore de 0,22 µm de tamaño de poro y se almacenó a 4 °C hasta analizar con cromatografía líquida de alta presión (HPLC). A la fase sólida, torta de fango, se añadió 5 ml de acetonitrilo y se sonicaron durante 30 min para la extracción de tóxicos del fango. Después del proceso de extracción, todo el volumen de muestra se centrifugó, se filtró y se almacenó hasta analizar con cromatografía líquida de alta presión (HPLC).

Cada experimento se repitió dos veces en condiciones idénticas.

#### 3.2.3.2. Análisis de muestras

Una vez finalizado el proceso de preparación de las muestras, se procedió a la determinación de concentración de los compuestos.

Las concentraciones de IBU y TCS se midieron usando un HPLC (Agilent Technologies 1200) equipado con una columna analítica de fase reversa Promosil C18 (4,6 x 150 mm, 60

mm), un detector de Diodos y autosampler. Se usó como fase móvil una mezcla acetonitrilo/agua (70:30, v/v), un flujo de 1 mL $min^{-1}$, un volumen de inyección de 50 µL, a temperatura del ambiente, una presión de aproximadamente 57 bares y a una longitud de onda de 264 nm para IBU y para TCS, El volumen inyectado eluyó fuera de la columna a los 10 min, el tiempo de retención fue de 4,35 min para el IBU y de 6,70 min para el TCS.

3.2.3.3. Tratamiento de datos

El mecanismo de adsorción de los tóxicos en el fango se estudió utilizando los modelos de Freundlich y Langmuir, descritos en la introducción. Estas isotermas estudian la concentración de tóxicos medida en la fase sólida ($q_e$) como una función de la concentración de equilibrio del mismo en la solución (Ce).

*Isoterma de Langmuir*

Considerando la fase líquida, está descrita por la ecuación 6:

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{b}{k_L} c_e + \frac{1}{k_L} \qquad (6)$$

donde $k_L$ y b representan las constantes de Langmuir. La constante *b* se relaciona con la entalpía neta del proceso de adsorción. La isoterma de Langmuir sugiere una adsorción monocapa, dando a entender que un número limitado de sitios están disponibles para la adsorción sobre una superficie, y asumiendo una distribución homogénea de la energía de adsorción.

*Isoterma Freundlich*

Considerando la fase líquida, está descrita por la ecuación 7:

$$\ln_{q_e} = \ln_{k_F} + \frac{1}{n} \ln_{c_e} \qquad (7)$$

donde $k_F$ es la constante de isoterma Freundlich relacionada a la capacidad de adsorción y *n* muestra la intensidad de adsorción. El modelo Freundlich supone que hay múltiples sitios de absorción que actúan en paralelo; por lo tanto, cada sitio puede ser expuesto a diferente energía libre de adsorción. El modelo Freundlich también es válido para la adsorción heterogénea sobre una superficie que contiene varios sitios.

Se realizaron balances de materia para todos los ensayos de adsorción para asegurar la integridad de los experimentos.

## 3.3. ESTUDIOS DE TOXICIDAD

El estudio de la toxicidad se llevó a cabo con el fin de observar los efectos que producen los dos contaminantes, tanto por individual como combinados sobre el fango activado.

El efecto producido sobre el fango activado puede utilizarse como un reflejo de las consecuencias que podrían ocasionar en los procesos de tratamiento biológico con fangos activados.

### 3.3.1. REACTIVOS QUÍMICOS

Los reactivos químicos utilizados en los ensayos fueron:

- Ibuprofeno sal, $C_{13}H_{18}O_2Na$ (Panreac)
- Triclosan, $C_{12}H_7Cl_3O_2$ (Panreac)
- Tampón fosfato: $NaH_2PO_4$, $Na_2HPO_4$
- Agua residual sintética

### 3.3.2. EQUIPAMIENTO

Los dispositivos utilizados en este estudio fueron:

- Luminometro FLUOROSKAN ASCENT FL. Thermo Scientific
- Oximetro OXYGRAPH SYSTEM (Hansatech)
- Espectrofotometro Shimadzu UV-1800
- Agitador orbital Bunsen AO-400

### 3.3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos de toxicidad permiten analizar el posible efecto tóxico que un compuesto químico provoca en un fango activo específico.

Sobre una misma muestra por un lado, se determina la respiración de los microorganismos del agua residual objeto de estudio y por otra parte, se determina la muerte celular mediante el marcador FDA.

*Realización del ensayo*

En seis Erlenmeyer de 100 mL se introdujeron 10 mL que contenían una misma concentración de fango activado, cinco con diferentes concentraciones iniciales de contaminantes, y uno sin tóxico, (blanco) que servirá como referencia para el cálculo de la toxicidad. Se realizaron tres tandas, una para concentraciones de IBU de entre 75- 1200mg/L, otra para TCS de 0,5-6,5 mg/L y una última para su mezcla, con concentraciones en relación a los EC20 obtenidos para los compuestos individuales.

Esto mismo se repitió para 5 concentraciones de fango (125-2000mg/L).

Las muestras se agitaron a 200 rpm y a 25 °C utilizando un agitador orbital durante 1 hora para, en todo momento, mantener un aporte continuo de oxígeno, de forma que los fangos se encontraran en condiciones saturadas del mismo. Se alimentaron con 0,5 mL de agua residual sintética para evitar la fase de respiración endógena por falta de sustrato.

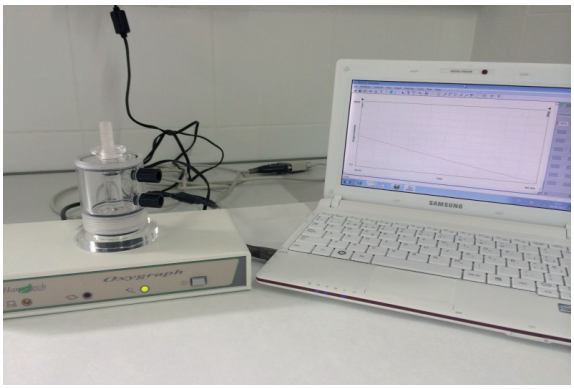
**Respirometría**

*Análisis de muestras*

Una vez transcurrido el tiempo de contacto se procedió a medir la variación de la concentración de oxígeno disuelto. Para la realización de ensayo de respirometría según la norma OCDE

209 se utilizó un montaje experimental como el que se muestra en la figura 3:

*Figura 3. Montaje experimental para ensayos de respirometría: Oximetro (Hansatech)*



Para ello, se pipetean 2 ml de la muestra y se añaden a la cubeta de medida del equipo.

La variación de la concentración de oxígeno disuelto de la misma dentro del recipiente se registró cada segundo durante 5 min a través de un sistema de adquisición de datos. En este punto se repitieron los pasos descritos anteriormente para las muestras con la sustancias tóxicas de interés, incluido el blanco.

El control de calidad tanto del método de medida de toxicidad aguda por respirometría, como del buen funcionamiento del equipo, se lleva a cabo mediante el análisis de una disolución de 3,5-diclorofenol de concentración 5mg/L y una disolución de sulfato de cobre(II) pentahidrato de 58 mg/L de concentración. Ambas deben producir un 50% de inhibición sobre los fangos activados en los rangos que recomienda la norma OCDE 209 (2 -25 mg/L para 3,5- diclorofenol y 53-155 mg/L para sulfato de cobre(II) pentahidrato).

*Tratamiento de datos*

Terminado el ensayo, se graficó la variación de la concentración de oxígeno en función del tiempo para cada caso. La pendiente de la recta obtenida se interpreta como la velocidad de consumo de oxigeno (OUR) de los microorganismos. En todos los casos, se comparó la OUR del fango activado con tóxico frente al fango activado sin tóxico (blanco) y se calculó el porcentaje de inhibición provocado por la presencia del tóxico.

El porcentaje de inhibición se calculó a través de la ecuación 8:

$$\%Inhibición = \left(\frac{OUR_{Blanco} - OUR_{Tóxico}}{OUR_{Blanco}}\right) \times 100 \qquad (8)$$

donde $OUR_{Blanco}$ es la pendiente del resiprograma sin tóxico(blanco) y $OUR_{Toxico}$ es la pendiente del resiprograma con tóxico.

Con los datos obtenidos se procedió a graficar el porcentaje de inhibición calculado en función de la concentración de la sustancia tóxica para determinar la concentración que provoca la inhibición de la actividad respiratoria en un 50% ($EC_{50}$) y en un 20% ($EC_{20}$) para cada uno de los tóxicos.

Los valores del $EC_{50}$ y/o $EC_{20}$ obtenidos para los compuestos individuales se utilizaron para diseñar las mezclas.

**Viabilidad celular con marcador FDA**

En paralelo a las mediciones de respirometría se realizaron las mediciones de viabilidad celular con marcador FDA.

*Analisis de muestras*

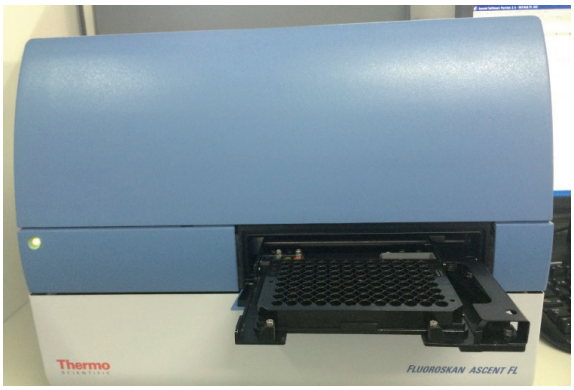
Dada la novedad de realización de este tipo de ensayo en fangos activados fue necesario establecer un protocolo simplificado para las muestra de fango activado que se basa en la adición de una solución de FDA como estándar interno para la mediciones. La solución de FDA (20mg FDA: 10ml Dimetil sulfoxido, *Dimethyl sulfoxide*, DSMO) se preparó para evitar los potenciales problemas que pueden aparecer en el uso del marcador. La primera es la hidrólisis de FDA a fluoresceína en ausencia de células vivas y la segunda es la extinción de la fluorescencia por las soluciones ensayadas.

Las muestras analizadas proceden de los mismos Erlenmeyer que los utilizados para el ensayo de respirometría, y por lo tanto, con las mismas concentraciones son las sustancias tóxicas de interés y el blanco. La única diferencia es que se analiza también el agua residual sintética, para comprobar que el medio de alimentación no presenta microorganismos que puedan interferir en la medición de las muestras de fango activado.

Los ensayos se realizaron usando placas de 96 pocillos de microtitulación (de micropocillos ™ Black F96, Nunc; Fisher). En cada pocillo se introdujeron 195 µl de las muestras y 5 µl solución de marcador FDA. Cada muestra se analizó por duplicado.

La fluorescencia se midió usando un luminometro con lector de microplacas (Thermo Scientific™ FL, Ascent) a una longitud de onda de excitación de 485 nm y una longitud de onda de emisión de 528 nm (fluorescencia de verde). La emisión de fluorescencia se expresó como Unidades Relativas de Fluorescencia (RFU). Los valores de la fluorescencia se registraron a cada 5 minutos durante 30 min a través de un sistema de adquisición de datos. El tiempo de análisis incluye un periodo de incubación, los primeros 5 minutos, a una temperatura de 29,9 °C

*Figura 4. Luminometro Thermo Scientific™ FL, Ascent y microplaca*



*Tratamiento de datos*

Terminado el ensayo, se graficó la variación de la fluorescencia en función del tiempo para cada caso. Para ello se restó de cada muestra analizada la fluorescencia de la solución de prueba con agua residual sintética. Esta vez la curva señal-tiempo no es lineal, lo que hace que el cálculo de la inhibición se realice en cada momento de medición ($t_x$).

Para el cálculo de la inhibición fue comparado el valor de la fluorescencia del fango activado con tóxico frente al fango activado sin tóxico (blanco) y se calculó el porcentaje de inhibición provocado por la presencia del tóxico. El porcentaje de inhibición se calculó a través de la ecuación 9:

$$\%Inhibición(t_x) = \left(\frac{RFU_{Blanco(t_x)} - RFU_{Tóxico(t_x)}}{RFU_{Blanco(t_x)}}\right) \times 100 \qquad (9)$$

donde $RFU_{Blanco(tx)}$ es la fluorescencia de la muestra sin tóxico(blanco) a tiempo ¨x¨ y $RFU_{Toxico(tx)}$ es es la fluorescencia de la muestra con tóxico a tiempo ¨x¨.

Con los datos obtenidos se procedió a representar el porcentaje de inhibición calculado en función de la concentración de la sustancia tóxica para determinar la concentración que provoca la muerte celular de un 50% ($EC_{50}$) y de un 20% ($EC_{20}$) para cada uno de los tóxicos.

Los valores del $EC_{50}$ y/o $EC_{20}$ obtenidos para los compuestos individuales se utilizaron para diseñar las mezclas.

# 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

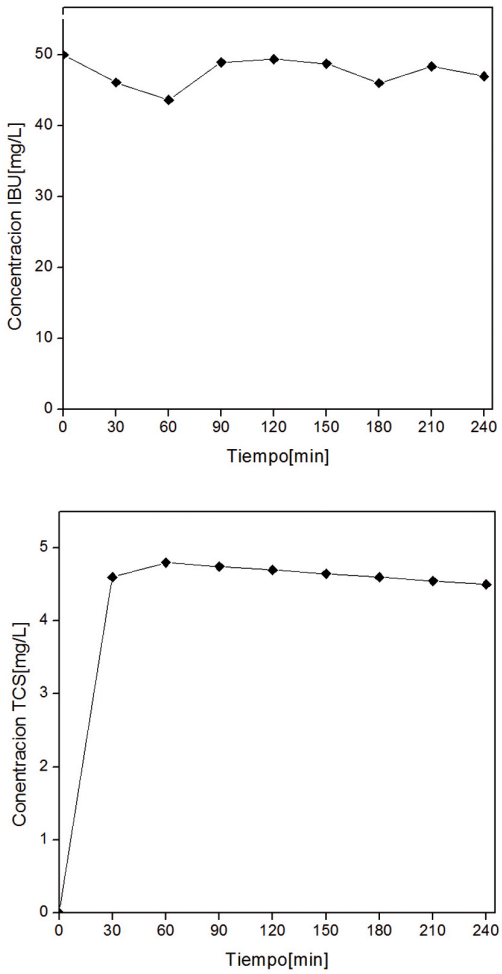
## 4.1. ESTUDIOS DE ADSORCIÓN

Los experimentos de adsorción se llevaron a cabo tal y como han sido descritos en el capítulo de *Materiales y Métodos*.

### 4.1.1. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

Se realizaron estudios de cinética de adsorción, como estudio previo, para establecer el tiempo de contacto necesario para alcanzar el equilibrio y estudiar posibles efectos que pudieran aparecer. En la siguiente grafica se muestran los resultados obtenidos para los ensayos realizados con IBU y TCS (figura 5):

*Figura 5. Cinetica de adsorción en fango activado*




Como se puede observar, la adsorción es muy rápida para ambos compuestos, alcanzándose un máximo de adsorción a los 60 minutos de contacto.

En la literatura se reportaron resultados similares, que sugieren una adsorción físico-química de los compuestos seleccionados inmediata en el fango, en los primeros 30 min del experimento (Banihashemi y Droste, 2014; Collado et al, 2012; Zhang et al, 2014).

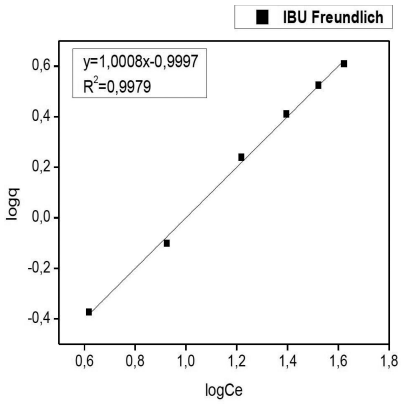
Los ensayos de adsorción se realizaron finalmente a tiempo de contacto de 1 hora.

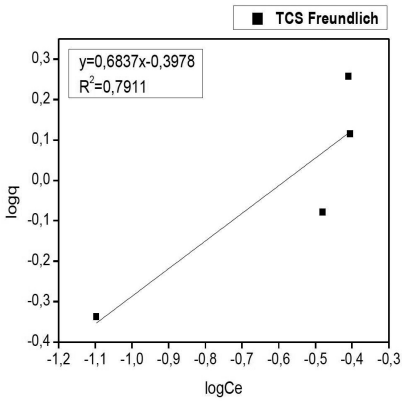
### 4.1.2. MECANISMOS DE ADSORCIÓN

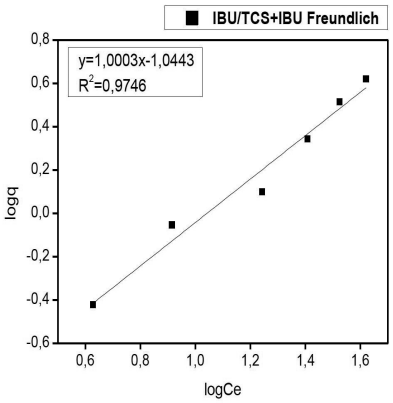
El estudio de los experimentos termodinámicos de adsorción se realizó para concentraciones entre 75 y 1200 mg/L de IBU, y 0,5-5 mg/L de TCS y la mezcla de los mismos. La concentración de fangos utilizada fue de 2 mg/L. Esta serie de experimentos se repitió para fango inactivado.

Los datos de adsorción fueron modelados utilizando las ecuaciones Langmuir y Freundlich. Las formas de la isoterma Freundlich se muestran en las figuras 6 y 7:

*Figura 6. Isotermas de adsorción de IBU, TCS y mezcla sobre fango activado*



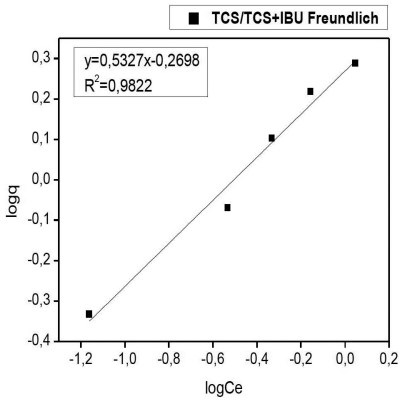
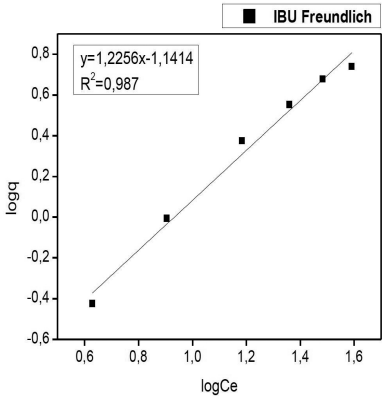
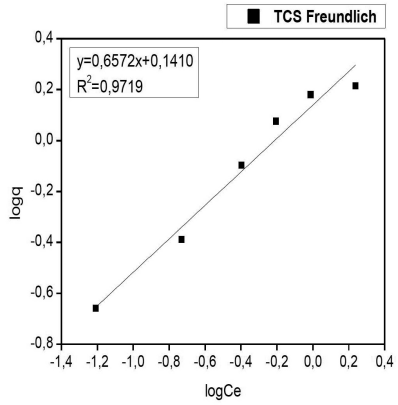
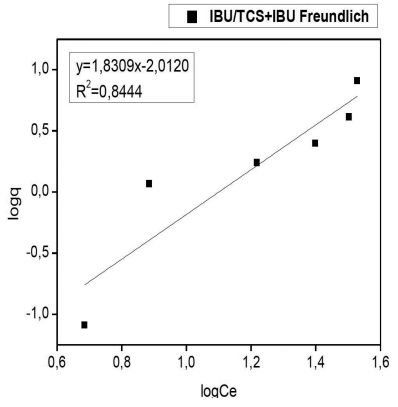
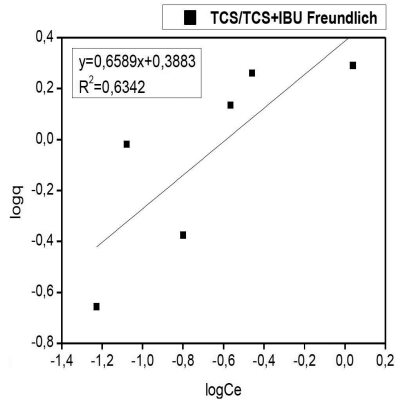




*Figura 7. Isotermas de adsorción de IBU, TCS y mezcla sobre fango inactivado.*



Los resultados obtenidos para los parámetros de la isoterma de Freundlich y de Langmuir en el caso de la adsorción del IBU, TCS y su mezcla en el fango activado y fango inactivado, se presentan en la tabla 2.

En todos los casos, individuales, mezclas, fangos activos, fangos inactivos se ajusta mejor Freundlich, utilizando como criterio los coeficientes de correlación.

Comparando los resultados para los compuestos individuales se observó que en general el tipo de fango no influye el mecanismo de adsorción de los tóxicos. En el equilibrio, TCS mostró una mayor tendencia a adsorber en la biomasa que el IBU. Estos resultados podrían explicarse por el valor del parámetro k y por el coeficiente de reparto octanol-agua más alto de TCS (log Kow = 4,2-4,8), frente al IBU (log Kow = 2,48-3,3). Estos resultados están en acuerdo con estudios de adsorción de los compuestos seleccionado encontrados en la literatura (Banihashemi y Droste, 2014; Vasiliadou et al, 2013; Yu y Wu, 2012).

El resultado del estudio de adsorción mostró resultados similares tanto en fango activado como en fango inactivado. Sin embargo, el fango inactivado, mostró una capacidad de adsorción ligeramente mayor que el fango activado. Esto podría ser debido a las características morfológicas diferentes de biomasa después del tratamiento térmico, en cual el contenido de agua, el tamaño de partícula y la viscoelasticidad de fango disminuye, mientras que el área de superficie específica del flóculo de fango aumenta. (Feng et al, 2014).

Comparando los resultados de la mezcla con respecto a los ensayos individuales, no hay prácticamente diferencia entre el mecanismo de estos compuestos.

Por lo tanto, los resultados presentados en este estudio indican que al asumir el estado de equilibrio en los sistemas de tratamiento biológicos es válida la aparición de fenómenos de adsorción, especialmente en el caso de triclosan.

## 4.2. ESTUDIOS DE TOXICIDAD EN FANGOS ACTIVADOS

Todos los experimentos se realizaron utilizando fango procedente del Sistema de Fango Activado descrito en el apartado *Materiales y Métodos,* al igual que el utilizado en los ensayos de adsorción.

Debido al hecho de que los compuestos ensayados eran de toxicidad desconocida sobre fangos activados, inicialmente se realizaron pruebas para determinar el intervalo de las concentraciones de compuestos tóxicos que deben utilizarse en los ensayos definitivos.

Finalmente, se eligieron para TCS concentraciones en el intervalo de 0,05-6,5 mg/L y para IBU concentraciones en el intervalo de 75-1200 mg/L.

El tiempo de exposición a tóxicos era otro parámetro desconocido. Para determinar si el tiempo de exposición al toxico afecta la inhibición, fue seleccionada una concentración de cada compuesto (6,5 mg/L de TCS y 1200 mg/L IBU) y se determinó la inhibición producida cada 30 minutos, a lo largo de 4 h.

De acuerdo con los resultados obtenidos no se observó variación significativa de inhibición en función de tiempo. Estos resultados indican que IBU y TCS actúan de forma instantánea en la respiración bacteriana. Los ensayos de toxicidad se realizaron finalmente a tiempo de exposición de 1 hora, por razón de manejo experimental

La toxicidad se estudió para cuatro concentraciones de fango activado, 0,125 g/L; 0,25 g/L; 0,5 g/L; 1 g/L y 2g/L.

### 4.2.1. ENSAYOS DE RESPIROMETRÍA

A continuación, a modo de ejemplo, en las figuras 8-10 se presentan los graficas de concentración de oxigeno *vs* tiempo, donde se puede observar que son rectas. La pendiente se corresponde con la OUR, y se ve que cuanto mayor es la concentración de toxico menor es la pendiente, tanto para TCS e IBU como para su mezcla.

*Tabla 2. Parámetros de los modelos de adsorción Langmuir y Freundlich*

| | | | Langmuir | | | Freundlich | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fango | Tóxico | | $q_{max}$ [mg/g] | a [L/mg] | $R^2$ | K [mg/g] | 1/n | $R^2$ |
| Fango Activado | IBU | | - | - | 0,004 | 0,368 | 1,001 | 0,99 |
| | TCS | | - | - | 0,279 | 1,488 | 0,683 | 0,79 |
| | IBU + TCS | IBU | - | - | 0,028 | 0,351 | 1,003 | 0,97 |
| | | TCS | 2,719 | 2,084 | 0,92 | 1,309 | 0,532 | 0,98 |
| Fango Inactivado | IBU | | - | - | 0,43 | 0,319 | 1,222 | 0,99 |
| | TCS | | - | - | 0,95 | 1,151 | 0,657 | 0,97 |
| | IBU + TCS | IBU | | | 0,38 | 0,133 | 1,830 | 0,84 |
| | | TCS | 2,981 | 1,997 | 0,60 | 1,474 | 0,658 | 0,63 |

Los resultados mostrados se corresponden con la concentración de 1g/L de fango activado.

*Figura 8. Pendientes corespondiente a la tasa de respiración para IBU*

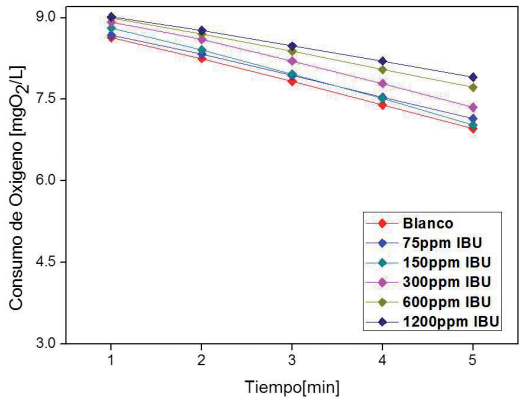



*Figura 9. Pendientes corespondiente a la tasa de respiración para TCS*

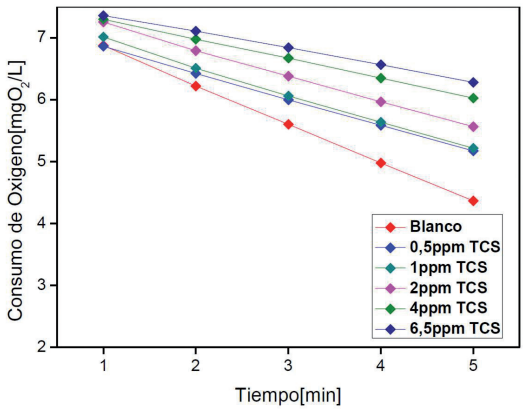
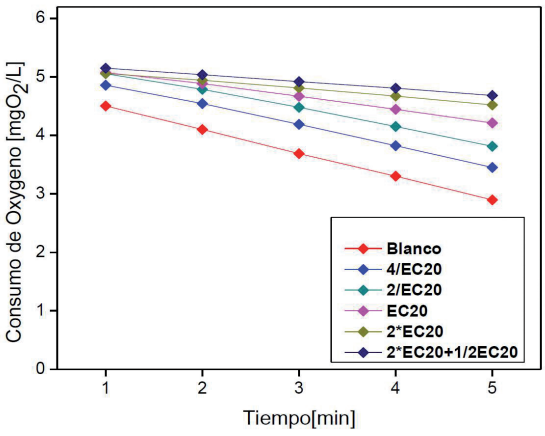



*Figura 10. Pendientes corespondiente a la tasa de respiración para mezcla IBU+TCS*




Para el resto de concentraciones de fango activado ensayadas (0,125g/L, 0,25g/L, 0,5g/L y 2g/L) los gráficos se presentan en el Anexo I, destacando que todos siguen la misma tendencia.

Una vez calculadas las inhibiciones, tal y como se explicó en el apartado de Metodología, ese analizaron usando la ecuación del efecto-mediano que se basa en el principio del efecto mediano Chou, 1976, que demuestra que existe una relación unívoca entre la dosis y el efecto independientemente del número de sustratos o productos y del mecanismo de acción o inhibición.

En esta ecuación Dm es la dosis requerida para producir el efecto mediano ($EC_{50}$); m es el coeficiente de Hill utilizado para determinar la forma de la curva de dosis-efecto, hiperbólica (m=1), sigmoidal positivo (m> 1) o sigmoidal negativo (m <1). Haciendo la representación gráfica conforme con la ecuación linealizada se obtienen los parámetros. Los resultados para todos los casos se muestran en la tabla 3:

*Tabla 3. Parámetros de la ecuación efecto-mediano en ensayos de respirometría*

| | | Parámetros dosis-efecto | | |
|---|---|---|---|---|
| Tóxico | Conc. Fango [g/L] | $D_m$ [mg/L] | m | $R^2$ |
| IBU | 0,125 | 64,16 | 0,42 | 0,93 |
| | 0,25 | 372,75 | 0,46 | 0,96 |
| | 0,5 | 2951,86 | 0,21 | 0,88 |
| | 1 | 7427,44 | 0,38 | 0,97 |
| | 2 | 4071,05 | 1,04 | 0,97 |
| TCS | 0,125 | 0,32 | 0,45 | 0,89 |
| | 0,25 | 2,25 | 0,40 | 0,93 |
| | 0,5 | 1,86 | 0,60 | 0,98 |
| | 1 | 5,49 | 0,50 | 0,96 |
| | 2 | 1359,78 | 0,24 | 0,97 |
| IBU+TCS | 0,125 | 33,48 | 0,89 | 0,98 |
| | 0,25 | 63,07 | 0,73 | 0,97 |
| | 0,5 | 109,79 | 0,57 | 0,94 |
| | 1 | 1893,86 | 1,02 | 0,99 |
| | 2 | 953,45 | 1,17 | 0,92 |

Se puede observar que el coeficiente de correlación en todos los casos es elevado.

De la misma forma, con los valores de estos parámetros, se pueden generar las curvas teóricas de dosis-efecto. Estas se muestran en las figuras 11-13 junto con los datos experimentales:

*Figura 11. Curva dosis-efecto en ensayos de respirometría para IBU*

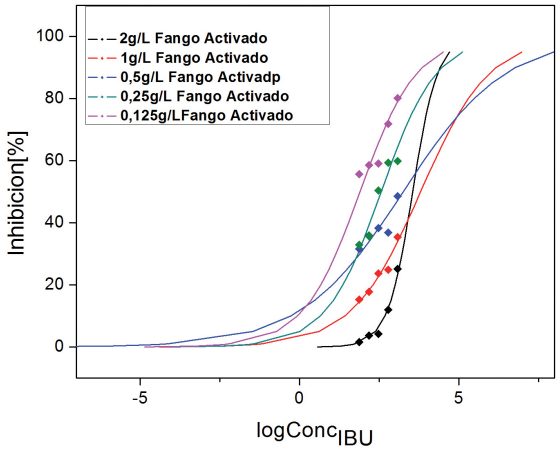
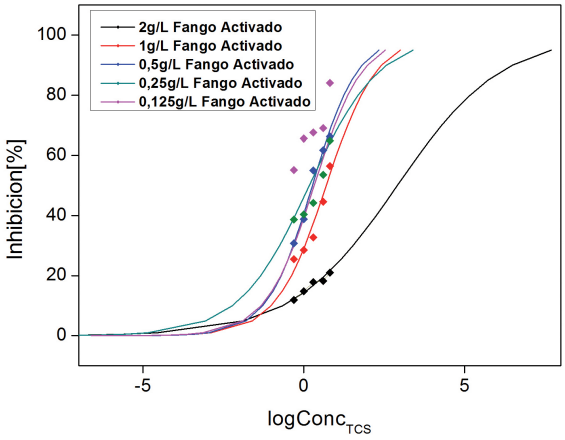



*Figura 12. Curva dosis-efecto en ensayos de respirometría para TCS*

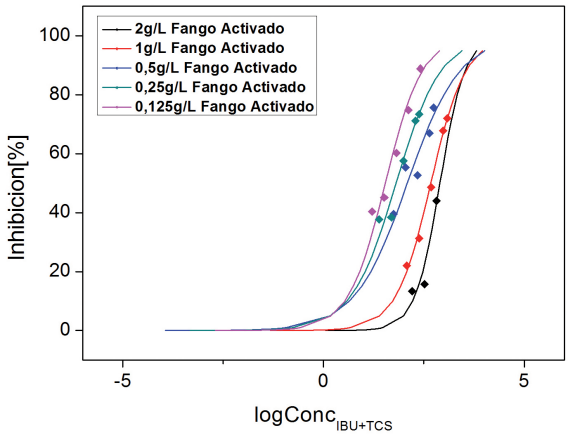



Las líneas continuas representan las curvas teóricas generadas para cada concentración de fango y los puntos son los datos experimentales correspondientes a cada concentración de fango.

Debido a la baja solubilidad del TCS en agua, en muchos casos con la máxima solubilidad no se ha llegado al 50% inhibición, por ello usamos valores de $EC_{20}$ para llevar a cabo las mezclas.

En la tabla 4 se muestran los valores del $EC_{50}$ y $EC_{20}$ calculados a partir de la ecuación del efecto mediano, tanto para IBU y TCS como para su mezcla.

*Figura 13. Curva dosis-efecto en ensayos de respirometría para mezcla IBU+TCS*




Las concentraciones de compuestos tóxicos que causaron reducción de 50% en el consumo de oxígeno del fango varían de manera significativa para los compuestos examinados.

De acuerdo con los valores de $EC_{50}$ reportados en la tabla 4 resultó un aumento de toxicidad con la disminución de concentración del fango activado tanto para los compuestos por individual como para la mezcla de los mismos.

Teniendo en cuenta que la toxicidad está directamente relacionada con biodegradabilidad de compuestos tóxicos, esta observación indica que los cambios en la concentración del fango podrían posiblemente afectar la adsorción y biodegradabilidad del IBU y TCS.

Es de destacar que para el caso de concentración 2g/L de fango activado los valores del $EC_{50}$ son extremadamente elevados en todos los caso. Esto es debido a que experimentalmente no se obtienen valores de inhibición mayores del 20%, siendo el $EC_{50}$ un valor extrapolado con el consiguiente valor de error asociado.

TCS es más tóxico que el IBU. La actividad bacteriostática del TCS ha sido reportada en la literatura y parece que TCS bloquea la biosíntesis de lípidos (McMurry y col., 1998). En este estudio se han encontrado valores del $EC_{50}$ que oscilan entre 1,50 y 5,04 mg/L, para las diferentes concentraciones de fango activado, salvo para el caso de concentración de 2g/L de fango donde el valor obtenido es de 817,15 mg/L. Los valores obtenidos en este estudio se corroboran con las concentraciones del $EC_{50}$ típicas de TCS encontradas en los estudios de toxicidad cuales varían entre 0,5 y 30 mg/L (Stasinakis et al, 2007). El valor medio de las concentraciones encontrados en las aguas residuales es de 860 ng/L (Rosal et al, 2010), mucho más bajas que las concentraciones que dan inhibición.

*Tabla 4. Valores $EC_{50}$ y $EC_{20}$ [mg/L] en ensayos de resipirometría*

| | Concentración Fango Activado | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,125g/L | | 0,25g/L | | 0,5g/L | | 1g/L | | 2g/L | |
| Tóxico | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ |
| IBU | 4,60 | 78,58 | 23,00 | 366,44 | 93,80 | 1933,00 | 201,50 | 1328,49 | 1008,08 | 3536,71 |
| TCS | 0,19 | 2,13 | 0,05 | 1,50 | 0,19 | 1,86 | 0,41 | 5,04 | 4,52 | 817,15 |
| IBU +TCS | 7,98 | 34,60 | 10,85 | 64,37 | 15,11 | 122,34 | 117,21 | 407,43 | 297,18 | 799,68 |

Con respecto al IBU, a pesar del hecho que se ha considerado responsable de interrupción endocrina en varios organismos acuáticos, su efecto sobre fangos ha sido poco estudiado. En el presente estudio, se observó que la toxicidad del IBU en fangos activados fue extremadamente baja, con valores del $EC_{50}$ entre 78,58 y 3536,71 mg/L, para diferentes concentraciones de fango activado. Con respecto a la toxicidad de IBU en fangos activos no se han reportado valores al respecto. Estas concentraciones son significativamente más altos que las concentraciones encontradas en las aguas residuales, de 2687 ng/L (Rosal et al., 2010). Por lo tanto, parece que la inhibición de los fangos activados es poco probable debida a la presencia de IBU.

Con respecto a las mezclas los valores del $EC_{50}$, estimado como la suma de las concentraciones de ambos, obtenidos varian desde 34,60 mg/L hasta 799,68 mg/L. El comportamiento de estos dos compuestos en la mezcla se va estudiar en el apartado *Efecto Combinado*, dado que el valor del $EC_{50}$ no es suficiente para establecer las posibles interacciones entre ellos.

### 4.2.2. ENSAYOS DE VIABILIDAD CON MARCADOR FDA

Se realizaron experimentos de toxicidad usando el marcador con el fin de evaluar la toxicidad con esta técnica, aplicada a fangos por primera vez, y poder comparar resultados con respirometría.

A continuación, a modo de ejemplo, en las figuras 14-16 se presentan los graficas de la señal de fluorescencia vs tiempo, donde se puede observar que no son rectas, como en caso de los ensayos de respirometría.

Los resultados mostrados se corresponden con la concentración de 1g/L de fango activado:

*Figura 14. Emisión de fluorescencia para IBU*

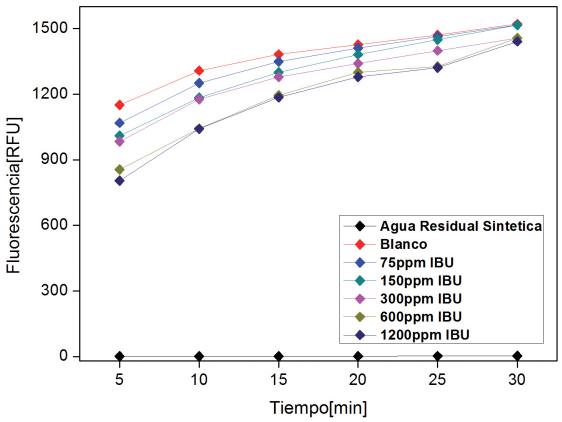



*Figura 15. Emisión de fluorescencia para TCS*

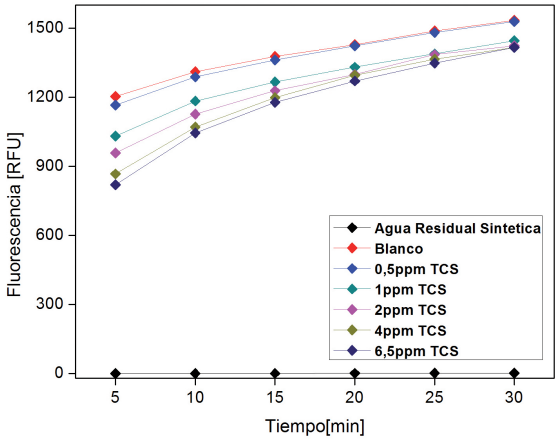
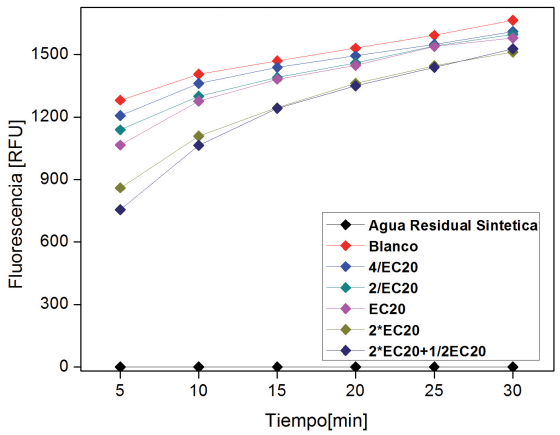



*Figura 16. Emisión de fluorescencia para mezcla IBU+TCS*




Para el resto de concentraciones de fango activado ensayadas (0,125g/L, 0,25g/L, 0,5g/L y 2g/L) los gráficos se presentan en el Anexo II, destacando que todos siguen la misma tendencia.

Para analizar el efecto de IBU, TCS y su mezcla en fangos activados mediante el método de viabilidad celular con FDA y comparar los resultados con los datos reportados anteriores para la respirometría, se determinaron valores del $EC_{50}$ en presencia de diferentes concentraciones de fango activado a tiempo de 5 minutos.

Una vez calculadas las inhibiciones se analizaron usando la ecuación del efecto-mediano, que demuestra que existe una relación unívoca entre la dosis y el efecto independientemente del número de sustratos o productos y del mecanismo de acción o inhibición.

En esta ecuación Dm es la dosis requerida para producir el efecto mediano ($EC_{50}$); m es el coeficiente de Hill utilizado para determinar la forma de la curva de dosis-efecto, hiperbólica (m=1), sigmoidal positiva (m>1) o sigmoidal negativo (m<1). Haciendo la representación gráfica conforme con la ecuación linealizada se obtienen los parámetros. Los resultados para todos los casos se muestran en la tabla 5:

*Tabla 5. Parámetros de la ecuación dosis-mediano en ensayos de viabilidad celular*

| Tóxico | Conc. Fango [g/L] | Parámetros dosis-efecto $D_m$ [mg/L] | m | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| IBU | 0,125 | 632,54 | 0,96 | 0,98 |
| | 0,25 | 650,88 | 1,48 | 0,98 |
| | 0,5 | 1713,23 | 0,66 | 0,93 |
| | 1 | 4516,51 | 0,63 | 0,95 |
| | 2 | 10695,1 | 0,50 | 0,97 |
| TCS | 0,125 | 1,93 | 0,87 | 0,95 |
| | 0,25 | 4,51 | 1,34 | 0,99 |
| | 0,5 | 7,34 | 1,56 | 0,98 |
| | 1 | 10,78 | 0,95 | 0,93 |
| | 2 | 71,54 | 0,85 | 0,97 |
| IBU+TCS | 0,125 | 73,24 | 1,36 | 0,98 |
| | 0,25 | 147,338 | 2,27 | 0,99 |
| | 0,5 | 508,130 | 0,95 | 0,95 |
| | 1 | 1893,86 | 1,02 | 0,99 |
| | 2 | 1518,84 | 1,72 | 0,98 |

Se puede observar que el coeficiente de correlación en todos los casos es elevado.

De la misma forma con los valores de estos parámetros se pueden generar las curvas teóricas de dosis-efecto. Estas se muestran en las figuras 17-19 junto con los datos experimentales:

*Figura 17. Curva dosis-efecto en ensayos de viabilidad celular para IBU*

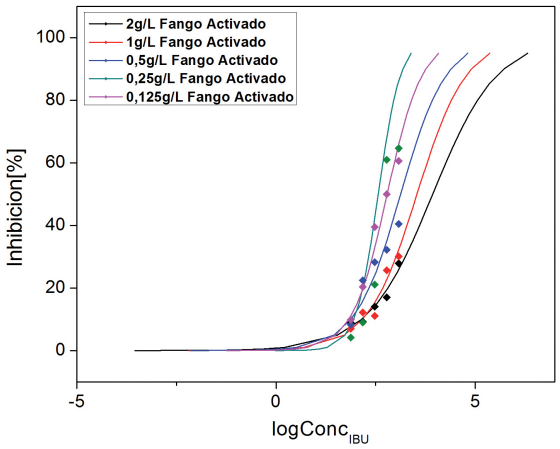



*Figura 18. Curva dosis-efecto en ensayos de viabilidad celular para TCS*

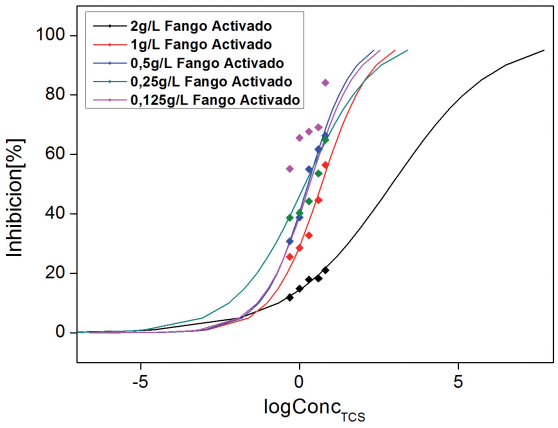
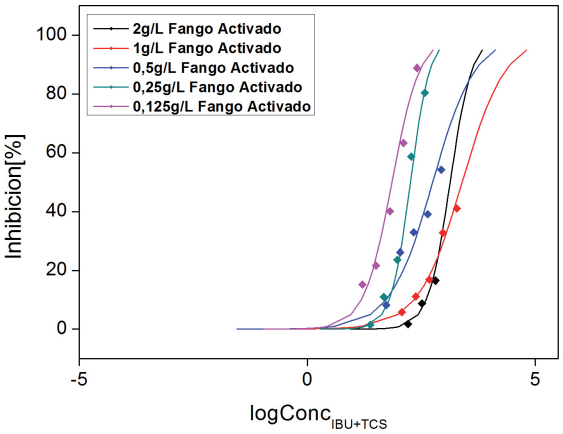



*Figura 19. Curva dosis-efecto en ensayos de viabilidad celular para mezcla IBU+TCS*




Las líneas continuas representan las curvas teóricas generadas para cada concentración de fango y los puntos son los datos experimentales correspondientes a cada concentración de fango.

En la tabla 6 se muestran los valores del $EC_{50}$ y $EC_{20}$ calculados a partir de la ecuación del efecto mediano, tanto para IBU y TCS como para su mezcla.

*Tabla 6. Valores $EC_{50}$ y $EC_{20}$ [mg/L] en ensayos de viabilidad celular*

| | Concentración Fango Activado | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,125g/L | | 0,25g/L | | 0,5g/L | | 1g/L | | 2g/L | |
| Tóxico | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ | $EC_{20}$ | $EC_{50}$ |
| IBU | 64,25 | 342,5 | 95,3 | 629,8 | 217,3 | 1351,0 | 474,5 | 3455,4 | 637,7 | 8515,3 |
| TCS | 0,94 | 2,56 | 2,11 | 4,47 | 2,46 | 4,6 | 2,45 | 8,57 | 11,95 | 53,51 |
| IBU+TCS | 27,44 | 71,85 | 80,21 | 145,74 | 125,34 | 462,66 | 487,54 | 1848,41 | 655,78 | 1408,63 |

De manera similar a los resultados anteriores obtenidos para respirometría, se observó que, usando el marcador FDA, TCS es mucho más tóxico que el IBU con valores del $EC_{50}$ que oscilan entre 2,56 y 53,51 mg/L, para diferentes concentraciones de fango activado.

También, se observó que la toxicidad del IBU en fangos activados fue muy baja, con valores del $EC_{50}$ entre 342,5 y 8515,3mg/L, para diferentes concentraciones de fango activado.

De acuerdo con los valores de $EC_{50}$ reportados en la tabla VI resultó un aumento de toxicidad con la disminución de concentración del fango activado.

Sin embargo, los valores del $EC_{50}$ estimadas para IBU y TCS son más altos que los obtenidos en experimentos de respirometría, lo que indica la menor sensibilidad de ensayo FDA a los tóxicos. Los tóxicos afectan a la actividad respiratoria más que a la viabilidad: pueden disminuir su actividad respiratoria sin afectar la viabilidad celular.

A mayores concentraciones de lodos se le puede atribuir una fracción mucho mayor de bacterias, mayor superficie que sea expuesta a la misma concentración de tóxico. Esto está en acuerdo con las observaciones anteriores, de inhibición más baja para TCS, IBU y su mezcla obtenidas a concentraciones mayores de fango activado.

### 4.2.3. ESTUDIO DEL EFECTO TÓXICO COMBINADO EN MEZCLAS

Para realizar este estudio se utilizó la ecuación del índice de combinación IC. El Software CompuSyn se utilizó para el cálculo los valores de IC (Rodea et al, 2010). Con este método de índice de combinación, se evaluó la naturaleza de las interacciones entre IBU y TCS, tanto en respirometría como en la viabilidad celular con marcador FDA.

Los valores de los parámetros Dm y m para los compuestos individuales y para su mezcla se utilizaron para calcular el sinergismo o antagonismo en la base de la ecuación IC (Chou, 2006); IC <1, 1, y> 1 indican sinergia (Syn), efecto aditivo (Add), y antagonismo (Ant) respectivamente.

Los valores del IC para ambos marcadores de toxicidad en tres niveles de dosis representativas ($EC_{10}$, $EC_{50}$ y $EC_{95}$) se resumen en la tabla 7.

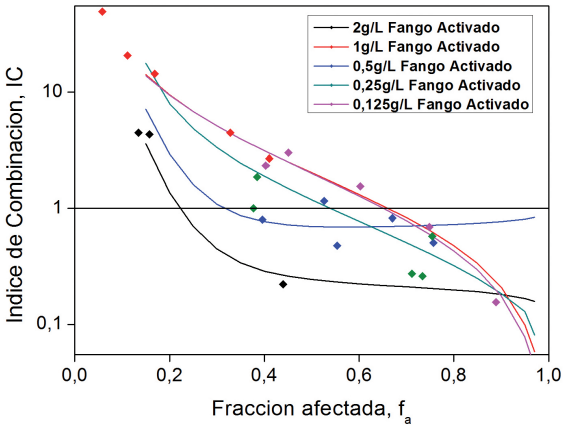
*Tabla 7. Valores del Índice de Combinación (IC) de la combinación binaria IBU+TCS en ensayos de respirometría y viabilidad celular*

| Tóxico | Conc. Fango Activado | Valores IC | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Respirometría | | | Viabilidad celular | | |
| | | $EC_{10}$ | $EC_{50}$ | $EC_{95}$ | $EC_{10}$ | $EC_{50}$ | $EC_{95}$ |
| IBU + TCS | 0.125g/L | 23,34 | 1,99 | 0,07 | 1,57 | 0,66 | 0,21 |
| | 0.25g/L | 7,93 | 0,77 | 0,03 | 1,74 | 0,93 | 0,40 |
| | 0.5 g/L | 26,77 | 0,70 | 0,81 | 1,27 | 1,36 | 3,60 |
| | 1 g/L | 24,79 | 2,02 | 0,10 | 2,64 | 1,32 | 0,81 |
| | 2 g/L | 14,91 | 0,24 | 0,17 | 4,55 | 0,53 | 0,07 |

Se genera un gráfico, en el cual se muestra la evolución del IC (sinergismo, antagonismo, efecto aditivo) entre IBU y TCS en función de la fracción afectada ($f_a$). Este gráfico permite una presentación visual simplificada de los resultados generales.

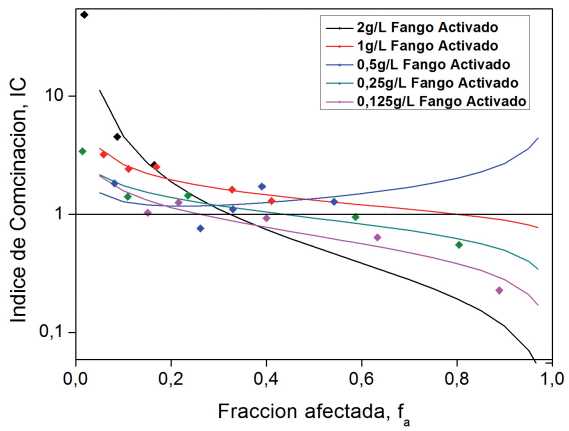
Como se puede observar en la figura 20, en los ensayos de respirometría, la combinación binaria IBU+TCS mostró un ligero antagonismo para valores bajos de fracción afectada y un ligero sinergismo para valores más altos de fracción afectada. Esta evolución es habitual en los ensayos de toxicidad en general. Las líneas representan los valores teóricos y los puntos representan los datos experimentales.

*Figura 20. Índice de combinación de la mezcla IBU+TCS en ensayos de respirometría*




Por otro lado, en la figura 21 se muestran los resultados para los ensayos de viabilidad celular, donde se puede observar un comportamiento semejante al caso anterior, destacando quizá que todos los valores son más cercanos a 1 tanto en la zona sinérgica como antagónica. En la viabilidad celular con FDA la combinación binaria IBU+TCS mostró un ligero antagonismo para valores bajos de fracción afectada y un ligero sinergismo para valores más altos de fracción afectada.

*Figura 21. Índice de combinación de la mezcla IBU+TCS en ensayos de viabilidad celular*



# 5. CONCLUSIONES

## 5.1. ESTUDIOS DE ADSORCIÓN

- En el equilibrio, TCS mostró una mayor tendencia a adsorber en el fango activado e inactivado que el IBU.
- El fango activado presenta una menor capacidad de adsorción que el fango inactivados, para ambos compuestos.
- El tipo de fango, y la presencia de la mezcla no afecta al mecanismo de adsorción de los compuestos, ajustándose en todo caso al modelo de Freundlich.

## 5.2. ESTUDIOS DE TOXICIDAD

- Triclosan presenta una mayor toxicidad para todos los casos ensayados, con valores de $EC_{50}$ entre 1,5 y 800 mg/L mientras que para Ibuprofeno entre 78 y 3500 mg/L.
- Al aumentar la concentración de fango se observó una disminución de la toxicidad de TCS e IBU, tanto en respirometría como en la muerte celular, siendo más afectada la muerte celular.
- Los experimentos mostraron que la respirometría es más sensible que la viabilidad celular, tanto para los compuestos individuales como en mezcla. Por ejemplo, 0,5mg/L de TCS y 211,3mg/L de IBU, redujeron significativamente la tasa de respiración, mientras que 3,05 mg/L de TCS y 402,25 mg/L de IBU, no inhibieron la muerte celular.
- A valores bajos de inhibición, el índice de combinación de la mezcla binaria IBU+TCS proporciona un efecto antagónico, mientras que a valores altos de inhibición proporciona un efecto sinérgico. Esta tendencia se encontró en todos los casos, siendo menos marcada en la viabilidad celular.

# 6. BIBLIOGRAFÍA

Al-Odaini NA, Zakaria MP, Yaziz MI, Surif S. 2010. *Multi-residue analytical method for human pharmaceuticals and synthetic hormones in river water and sewage effluents by solid-phase extraction and liquid chromatography–tandem mass spectrometry.* Journal of Chromatography A, 1217, 6791-6806.

Banihashemi B, Droste RL. 2014. *Sorption–desorption and biosorption of bisphenol A, triclosan, and 17α-ethinylestradiol to sewage sludge.* Science of the Total Environment, 487, 813–821.

Barceló D, Petrović M, Gonzalez S. 2003. *Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water.* TrAC Trends in Analytical Chemistry, 22, 685-696.

Benotti MJ, Brownawell BJ. 2009. *Microbial degradation of pharmaceuticals in estuarine and coastal seawater.* Environmental Pollution, 157, 994-1002.

Beyer J, Petersen K, Song Y, Ruus A, Grung M, Bakke T, Tollefsen KE. 2014. *Environmental risk assessment of combined effects in aquatic ecotoxicology: A discussion paper.* Marine Environmental Research, 96, 81-91.

Brausch JM, Rand GM. 2011. *A review of personal care products in the aquatic environment: Environmental concentrations and toxicity.* Chemosphere, 82, 1518-1532.

Chena X, Nielsena JL, Furgal K, Liua Y, Lolas IB, Bester K. 2011. *Biodegradation of triclosan and formation of methyl-triclosan in activated sludge under aerobic conditions.* Chemosphere, 84, 452–456.

Chou TC, 2006. *Theoretical basis, experimental design, and computerized simulation of synergism and antagonism in drug combination studies.* Pharmacol. Rev, 58, 621–681.

Cleuvers M. 2003. *Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects.* Toxicology Letter, 142 (3), 185–194.

Cruz Moreno-Bondi M, Dolores Marazuela M, Herranz S, Rodriguez E. 2009. *An overview of sample preparation procedures for LC–MS multiclass antibiotic determination in environmental and food samples.* Anal Bioanal Chem, 395, 921–946.

Daughton CG, Ternes TA. 1999. *Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change?* Environ Health Persp, 107, 907–938.

Dave G, Herger G. 2012. *Determination of detoxification to Daphnia magna of four pharmaceuticals and seven surfactants by activated sludge.* Chemosphere, 88, 459-466.

Díaz-Cruz MS, García-Galán MJ, Guerra P, Jelic A, Postigo C, Eljarrat E. 2009. *Analysis of selected emerging contaminants in sewage sludge.* Trends Analitical Chemistry, 28, 1263–75.

Ellesat KS, Tollefsen KE, Åsberg A, Thomas KV, Hylland K. 2010. *Cytotoxicity of atorvastatin and simvastatin on primary rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) hepatocytes.* Toxicology in Vitro, 24, 1610-1618.

Escher BI, Baumgartner R, Koller M, Treyer K, Lienert J, McArdell CS. 2011. *Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospital wastewater.* Water Research, 45, 75–92.

Fenech C, Nolan K, Rock L, Morrissey A. 2013. *An SPE LC–MS/MS method for the analysis of human and veterinary chemical markers within surface waters: An environmental forensics application.* Environmental Pollution, 181, 250-256.

Feng Y, Zhang Z, Gao P, Su H, Yu Y, Ren N. 2010. *Adsorption behavior of EE2 (17 alphaethinylestradiol) onto the inactivated sewage sludge: kinetics, thermodynamics and influence factors.* Journal Hazard Materials, 175, 970–976.

Gaume B, Bourgougnon N, Auzoux-Bordenave S, Roig B, Le Bot B, Bedoux G.2012. *In vitro effects of triclosan and methyl-triclosan on the marine gastropod Haliotis tuberculata.* Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 156, 87-94.

Gilroy E, Klinck JS, Campbell SD, McInnis R, Gillis PL, de Solla SR. 2014. *Toxicity and bioconcentration of the pharmaceuticals moxifloxacin, rosuvastatin, and drospirenone to the unionid mussel Lampsilis siliquoidea.* Science of The Total Environment, 487, 537-544.

Honkisz E, Zieba-Przybylska D, Wojtowicz AK. 2012. *The effect of triclosan on hormone secretion and viability of human choriocarcinoma JEG-3 cells.* Reproductive Toxicology, 34, 385-392.

Hontela A, Habibi HR. 2013. *Personal Care Products in the Aquatic Environment: A Case Study on the Effects of Triclosan in Fish.* Fish Physiology, 33, 411-437.

Hyland KC, Dickenson ER, Drewes JE, Higgins CP. 2012. *Sorption of ionized and neutral emerging trace organic compounds onto activated sludge from different wastewater treatment configurations.* Water Research, 46, 1958–1968.

Jelic A, Gros M, Ginebreda A, Cespedes-Sánchez R, Ventura F, Petrovic M. 2011. *Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment.* Water Research, 45, 1165–1176.

Kümmerer K. 2009. *The presence of pharmaceuticals in the environment due to human use–present knowledge and future challenges;* Journal of Environmental Management, 90, 2354-2366.

Lapworth DJ, Baran N, Stuart ME, Ward RS. 2012. *Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence.* Environmental Pollution, 163, 287-303.

Li W, Shi Y, Gao L, Liu J, Cai Y. 2013. *Occurrence, distribution and potential affecting factors of antibiotics in sewage sludge of wastewater treatment plants in China*. Science of the Total Environment, 445–446, 306–313.

Liu JL, Wong MH. 2013. *Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): A review on environmental contamination in China*. Environment International, 59, 208-224.

Lozano N, Rice CP, Ramirez M, Torrents A. 2013. *Fate of Triclocarban, Triclosan and Methyltriclosan during wastewater and biosolids treatment processes.* Water Research, 47, 4519-4527.

Maeng SK, Sharma SK, Lekkerkerker-Teunissen K, Amy GL. 2011. *Occurrence and fate of bulk organic matter and pharmaceutically active compounds in managed aquifer recharge.* Water Research, 45, 3015–3033.

Nie Y, Qiang Z, Zhang H, Adams C. 2009. *Determination of endocrine-disrupting chemicals in the liquid and solid phases of activated sludge by solid phase extraction and gas chromatography– mass spectrometry.* Journal of Chromatography A, 1216, 7071–7080.

Pasquini L, Merlin C, Hassenboehler L, Munoz JF, Pons MN, Görner T. 2013. *Impact of certain household micropollutants on bacterial behavior. Toxicity tests/study of extracellular polymeric substances in sludge.* Science of The Total Environment,463–464, 355-365.

Petersen K, Heiaas HH, Tollefsen KE. 2014. *Combined effects of pharmaceuticals, personal care products, biocides and organic contaminants on the growth of Skeletonema pseudocostatum.* Aquatic Toxicology, 150, 45-54.

Petersen K, Heiaas HH, Tollefsen KE. 2014. *Combined effects of pharmaceuticals, personal care products, biocides and organic contaminants on the growth of Skeletonema pseudocostatum*; Aquatic Toxicology, 150, 45-54.

Quinn B, Gagné F, Blaise C. 2009. *Evaluation of the acute, chronic and teratogenic effects of a mixture of eleven pharmaceuticals on the cnidarian, Hydra attenuate*. Science of The Total Environment, 407, 1072-1079.

Rodea I, Petre AL, Boltes K, Legane S, Perdigon Melon JA, Rosal R, Fernandez-Pinasa F. 2010. *Application of the combination index (CI)-isobologram equation to study the toxicological interactions of lipid regulators in two aquatic bioluminescent organisms.* Water Research, 44, 427-438.

Roh H, Subramanya N, Zhao F, Yu CP, Sandt J, Chu KH.2009. *Biodegradation potential of wastewater micropollutants by ammonia-oxidizing bacteria*. Chemosphere, 77, 1084-1089.

Sanderson H, Thomsen M. 2009. *Comparative analysis of pharmaceuticals versus industrial chemicals acute aquatic toxicity classification according to the United Nations classification system for chemicals. Assessment of the (Q)SAR predictability of pharmaceuticals acute aquatic toxicity and their predominant acute toxic mode-of-action*. Toxicology Letters, 187, 84-93.

Saravanan M, Devi KU, Malarvizhi A, Ramesh M. 2012. *Effects of Ibuprofen on hematological, biochemical and enzymological parameters of blood in an Indian major carp, Cirrhinus mrigala.* Environmental Toxicology and Pharmacology, 34, 14-22.

Seyhi B, Drogui P, Buelna G, Blais JF. 2011. *Modeling of sorption of bisphenol A in sludge obtained from a membrane bioreactor process.* Chemical Engineering Journal, 172, 61–67.

Stasinakis AS, Petalas AV, Mamais D, Thomaidis NS, Gatidou G. 2007. Lekkas TD. *Investigation of triclosan fate and toxicity in continuous-flow activated sludge systems.* Chemosphere, 68, 375-381.

Stasinakis AS. 2012. *Review on the fate of emerging contaminants during sludge anaerobic digestion.* Bioresource Technology, 121, 432–440.

Stasinakisa AS, Mamaisb D, Thomaidisc NS, Danikab E, Gatidoua G, Lekkasa TD. 2008. *Inhibitory effect of triclosan and nonylphenol on respiration rates and ammonia removal in activated sludge system*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 70, 199–206.

Stevens-Garmon J, Drewes JE, Khan SJ, McDonald JA, Dickenson ER. 2011. *Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids.* Water Research, 45, 3417–3426.

Vasiliadou IA, Molina R, Martínez F, Melero JA. 2013. *Biological removal of pharmaceutical and personal care products by a mixed microbial culture: Sorption, desorption and biodegradation*. Biochemical Engineering Journal, 81, 108–119.

Verlicchi P, Galletti A, Petrovic M, Barcelo M. 2010. *Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options*; Journal of Hydrology, 389, 416-428.

Wang X, Liu Z, Wang W, Yan Z, Zhang C, Wang W, Chen L. 2014. *Assessment of toxic effects of triclosan on the terrestrial snail (Achatina fulica)*. Chemosphere, 108, 225-230.

Yang S, Lin C, Wu C, Ng K, Lin AY, Hong PA. 2012. *Fate of sulfonamide antibiotics in contact with activated sludge—sorption and biodegradation.* Water Research, 46, 1301–1308.

Yang X, Flowers RC, Weinberg HS, Singer PC. 2011. *Occurrence and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in an advanced wastewater reclamation plant*. Water research, 45, 5218-5228.

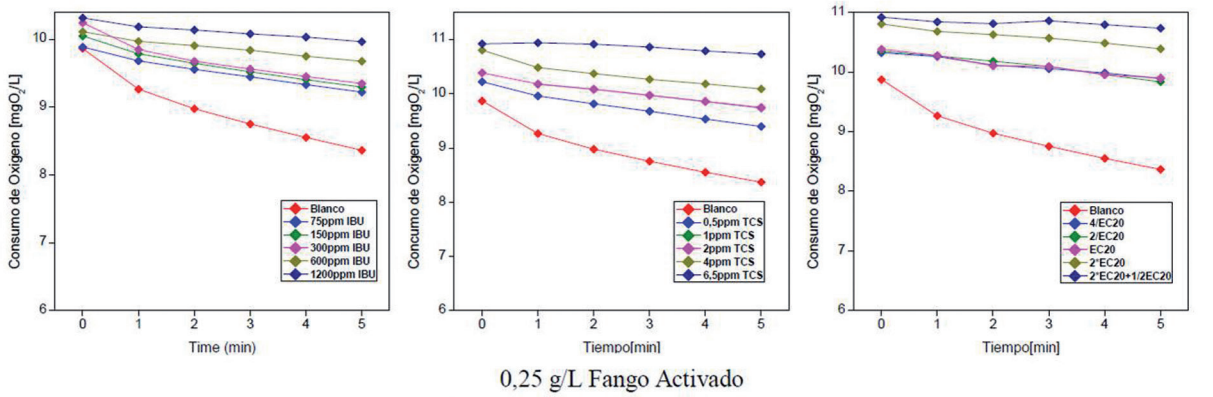
Yu Y, Wu L.2012. *Analysis of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products in sewage sludge by gas chromatography–mass spectrometry.* Talanta, 89, 258-263.

Zhang D, Gersberg RM, Tan SK. 2014. *Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems*. Environmental Pollution, 184, 620-639.

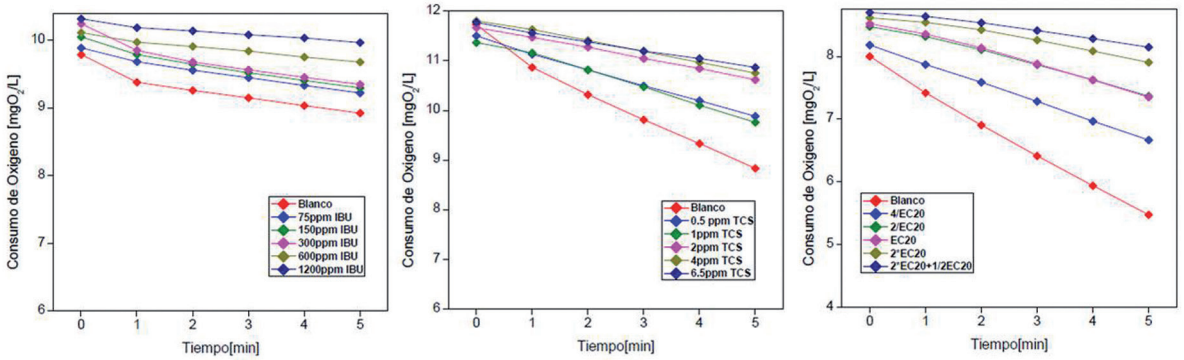
Zhang H, Liu P, Feng Y, Yang F. 2013. *Fate of antibiotics during wastewater treatment and antibiotic distribution in the effluent-receiving waters of the Yellow Sea, northern China*. Marine Pollution Bulletin, 73, 282-290.

# 7. ANEXOS

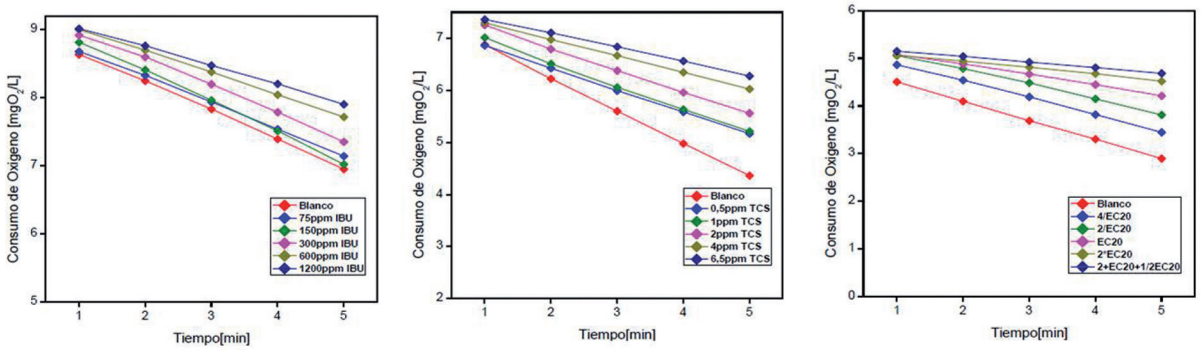
## 7.1. ANEXO I. PENDIENTES CORRESPONDIENTE A LA TASA DE RESPIRACIÓN PARA IBU, TCS Y MEZCLA



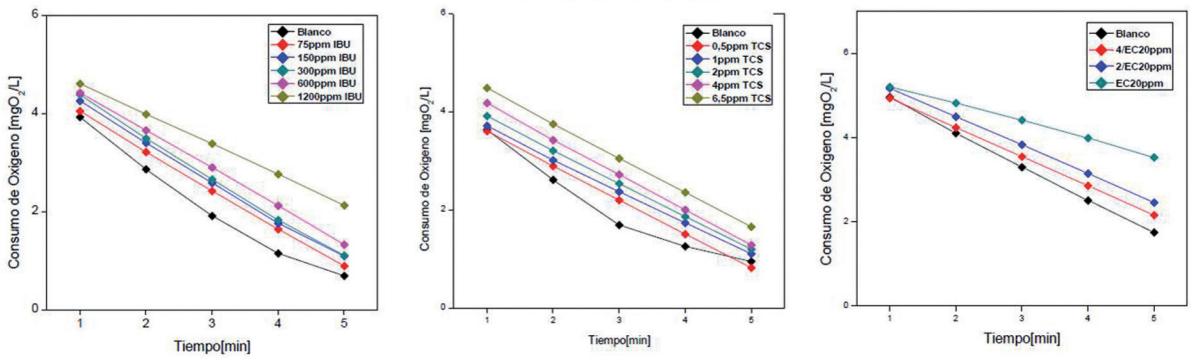

0,25 g/L Fango Activado



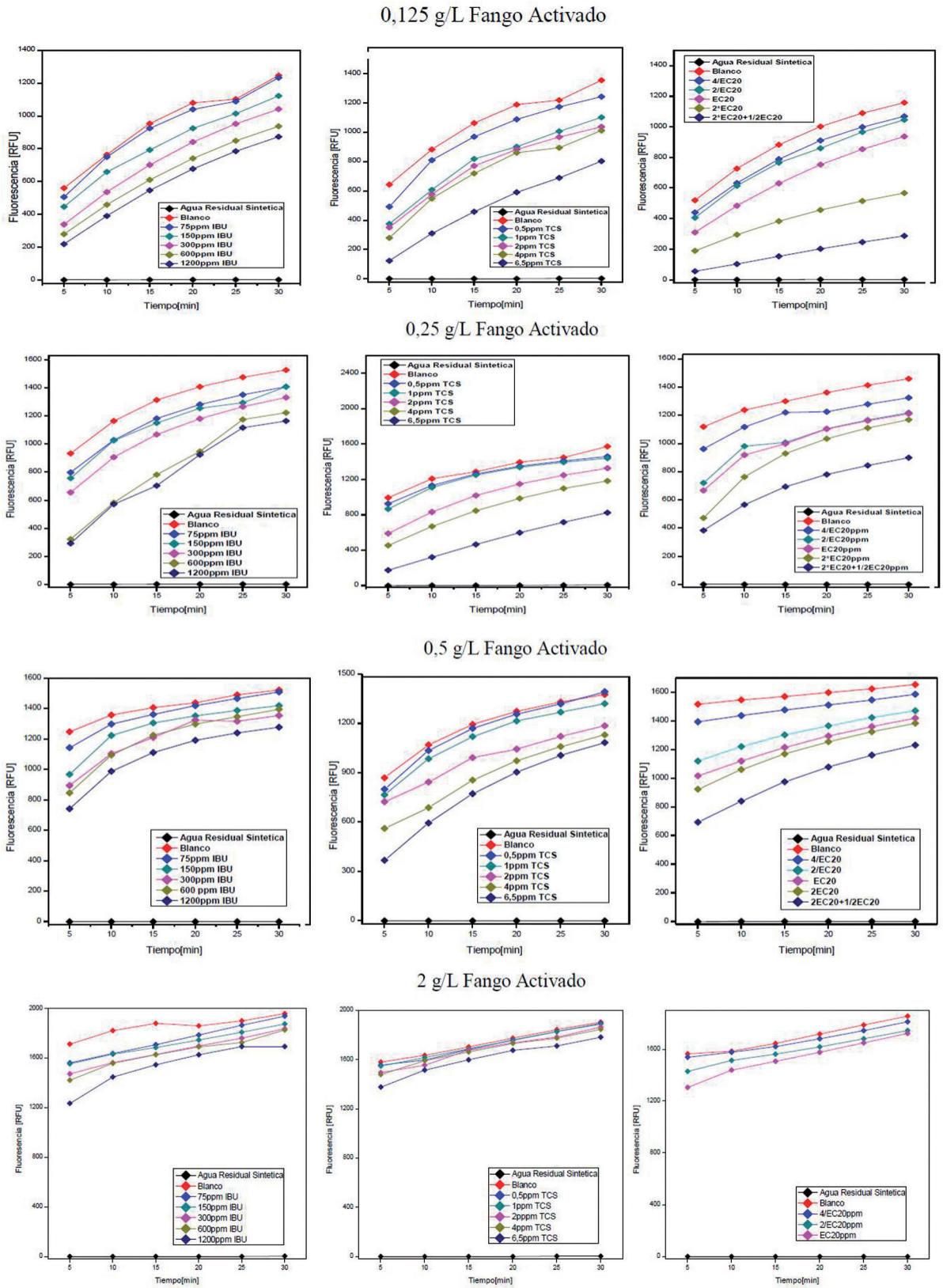

0,5 g/L Fango Activado




2 g/L Fango Activado



## 7.2. ANEXO II. EMISIÓN DE FLUORESCENCIA PARA IBU, TCS Y MEZCLA



escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

**máster universitario**

en hidrología y gestión de recursos hídricos

**proyectos**

**2014**

# Caracterización medioambiental del patrimonio cultural del agua

autor

**Raúl Gómez Llano**

directores

**Juan Antonio Pascual Aguilar**

**Alberto Blanco González**

Alcalá de Henares, 10 de junio de 2014

## ÍNDICE

1. Resumen ..... 290
2. Palabras Clave ..... 290
3. Abstract ..... 290
4. Key Words ..... 290
5. Introducción ..... 290
5.1. Objetivos ..... 291
5.2. Área de estudio ..... 291
5.2.1. Situación ..... 291
5.2.2. Clima ..... 291
5.2.3. Relieve y litología ..... 293
5.2.4. Hidrología ..... 294
5.2.5. Edafología ..... 294
6. Materiales y métodos ..... 294
6.1. Obtención y tratamiento de la información ..... 295
6.1.1. Elementos del Patrimonio Histórico del Agua en la Comunidad de Madrid ..... 295
6.1.2. Elaboración de mapas temáticos de las variables ambientales estudiadas ..... 295
6.1.3. Cálculo de distancias a cauces de agua ..... 296
6.1.4. Base de datos ..... 297
6.2. Análisis de la información ..... 297
6.2.1. Análisis espacial ..... 297
6.2.2. Análisis estadístico ..... 297
7. Resultados y discusión ..... 299
7.1. Análisis estadístico ..... 299
7.1.1. Estudio estadístico de correspondencias entre las variables ambientales y los elementos patrimoniales estudiados ..... 299
7.2. Análisis espacial ..... 303
7.2.1. Zonificación de la Comunidad de Madrid en base a las variables ambientales estudiadas ..... 303
7.2.2. Análisis de densidad y distribución de los elementos de patrimonio histórico del agua ..... 305
7.2.3. Estudio de la evolución temporal y espacial del suelo artificial en la Comunidad de Madrid ..... 309
8. Conclusiones ..... 309
9. Bibliografía ..... 309
10. Anexos ..... 311
10.1. Anexo I. Tablas de contingencia ..... 311
10.2. Anexo II. Mapas temáticos Comunidad de Madrid ..... 315
10.3. Anexo III. Mapas de densidad ..... 322

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Balance Hídrico de la estación de Rascafría ..... 292
**Tabla 2.** Balance Hídrico de la estación de Colmenar Viejo ..... 292
**Tabla 3.** Balance Hídrico de la estación de Madrid ..... 293
**Tabla 4.** Balance Hídrico de la estación de Tielmes ..... 293
**Tabla 5.** Elementos del Patrimonio Histórico del Agua analizados ..... 295
**Tabla 6.** Altitud ..... 311
**Tabla 7.** Pendiente ..... 311
**Tabla 8.** Potencial agrológico ..... 312
**Tabla 9.** Distancia (m) a cauces de agua ..... 312
**Tabla 10.** Precipitaciones totales anuales ..... 313
**Tabla 11.** Temperatura media ..... 313
**Tabla 12.** Usos del suelo ..... 314

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Mapa de situación de la Comunidad de Madrid . 291

**Figura 2.** Clasificación climática de Köppen en la Comunidad de Madrid . . . . . 291

**Figura 3.** Corte geológico esquemático de la Comunidad de Madrid. . . . . 293

**Figura 4.** Asociaciones de suelos (FAO) de la Comunidad de Madrid . . . . . 294

**Figura 5.** Esquema metodológico seguido en el análisis de las características ambientales del patrimonio del agua . . . . . 294

**Figura 6.** Ejemplo de gráfico de correspondencias mostrando correlaciones entre clases de una variable columna . . . . . 298

**Figura 7.** Ejemplo de gráfico de correspondencias mostrando correlaciones entre clases de una variable columna y elementos fila . . . . . 299

**Figura 8.** Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable altitud . . . . . 299

**Figura 9.** Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable pendiente . . . . . 300

**Figura 10.** Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable potencial agrológico . . . 301

**Figura 11.** Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable temperatura . . . . . 301

**Figura 12.** Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable precipitación . . . . . 302

**Figura 13.** Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable distancia a cauces de agua . . . . . 303

**Figura 14.** Mapa de unidades ambientales en la Comunidad de Madrid (A) y mapas temáticos resultantes del procesado de las variables ambientales analizadas (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico) . . . . . 303

**Figura 15.** Mapa de densidad de elementos del Patrimonio Cultural del Agua en la Comunidad de Madrid (A) y mapas de áreas de alta densidad representadas por las clases ambientales correspondientes (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico) . . . . . 306

**Figura 16.** Graficas de abundancia de elementos según cada variable ambiental. . . . . 308

**Figura 17.** Ubicación de elementos del Patrimonio Histórico del Agua y expansión del suelo artificial . . . . . 309

## 1. RESUMEN

En el presente documento se recoge un estudio basado en el análisis de la abundancia de elementos del patrimonio histórico del agua de la Comunidad de Madrid, en relación a una serie de variables ambientales tales como la topografía, la climatología, el potencial agrológico del suelo, etc.

Como principal fuente de información se han empleado planimetrías históricas de la región, para así, poder ubicar los elementos de interés relacionados con el patrimonio del agua y poder ser analizados con variables ambientales, cuyos datos han sido obtenidos de fuentes externas tales como AEMET, CHT, IGN.

Para el desarrollo de la metodología destinada a la consecución del objetivo del documento, se han empleado sistemas de información geográfica (SIG) y metodologías estadísticas tales como el análisis de correspondencias.

Entre los resultados obtenidos destaca la obtención de unidades ambientales resultantes de cruces entre variables, zonificación de áreas con mayor densidad de elementos patrimoniales, la expansión del suelo artificial en la región y un análisis estadístico cuyo objetivo es la obtención de una correlación entre tipologías de patrimonio y las clases en las que se subdivide una variable ambiental concreta.

## 2. PALABRAS CLAVE

*Patrimonio histórico del agua; Comunidad de Madrid; Sistemas de Información Geográfica (SIG); análisis de correspondencia; variables ambientales; cartografía histórica.*

## 3. ABSTRACT

This paper analysis the abundance of water heritage elements in the Madrid region. They are presented in relation to a number of environmental variables such as topography, climate or agrological potencial of the soil.

Regional historical maps were the main source of information used for locating ítems of interested related to the assets of the water and analysing environmental variables. Date of these environmental variables have been obtained from external sources such as AEMET, CHT or IGN.

Geographic Information Systems (GIS) and statistical methods such as correspondence analysis have been key part of the methodology developed to achieve the objectives of the project.

Between the obtained results highlight the following: environmental units resulting from variable combination; location of areas with the highest assets density; growth of artificial soil in the Madrid region; statistical analysis correlating heritage types presence and environmental variables values.

## 4. KEY WORDS

*Water heritage; Madrid region; Geographic Information Systems (GIS); correspondence analisys; environmental variables; historical cartography.*

## 5. INTRODUCCIÓN

La fuerte unión histórica entre el ser humano y el agua ha instado a que la UNESCO, en la *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*, establezca que los países han de adoptar las medidas jurídicas, científicas, técnicas, administrativas y financieras adecuadas, para identificar, proteger, conservar, revalorizar y rehabilitar el patrimonio cultural así como incluirlo en los programas de planificación general y hacer frente a los peligros que amenacen dicho patrimonio cultural y natural (UNESCO, 1972).

El patrimonio histórico del agua constituye una serie de elementos integradores de unidades territoriales. El patrimonio hidráulico que alberga un territorio es un entretejido de estructuras de interés y valor por sí mismas, como pequeñas presas, azudes, partidores, canales, azarbes, acequias, molinos, batanes, puentes, etc. (Mata y Fernández, 2010). Estos elementos patrimoniales presentan una alta vulnerabilidad consecuente de su desaparición en el territorio, es por ello oportuno conocer el patrimonio desde una perspectiva óptima para poder implementar nuevas estrategias y políticas eficaces de gestión, que amplíen el conocimiento de estos recursos y permitan entrever sus significaciones y valores asociados (Payano, 2011).

En la actualidad, una gran parte de los elementos del patrimonio histórico del agua han desaparecido o se encuentran en abandono debido a la sustitución de usos agrarios por urbanos e infraestructuras, deterioro y pérdida del patrimonio construido asociado a los paisajes del agua tradicionales, incorporación de nuevos elementos a las tramas rurales del paisaje (cerramientos, naves, nuevos caminos, etc.), ajenos a la configuración heredada y con elevada capacidad de alterar a escala de detalle el carácter del paisaje y, en general, un desinterés muy extendido por la gestión y puesta en valor del patrimonio cultural y paisajístico que albergan estos espacios (Mata y Fernández, 2010).

La ubicación geográfica de estos elementos y su aparición es dependiente de una serie de factores que motivaron su construcción. Entre los componentes configuradores o estructuradores de los paisajes del agua y sus infraestructuras hidráulicas asociadas se encuentran determinadas variables ambientales (Ribas, 2007). En la ubicación y tipología de los bienes patrimoniales puede influir la topografía, el tipo de suelo en función del cual aparecían o no cultivos de distinta índole, la precipitación o la distancia que hubiese entre el uso que requiera una infraestructura de aprovechamiento hidráulico y el cauce de agua de un río, etc.

Para atribuir la aparición de estos elementos a una serie de variables ambientales, es necesario disponer de un inventario de los mismos en un área de estudio, una metodología que asocie dicha base de datos a una serie de variables y una repre-

sentación estadística que confirme que dichas relaciones se asemejan a una determinada tendencia.

Frente a los más abundantes estudios que se basan en inventarios (Bestué y González, 2006), evaluaciones y puestas en valor (Hermosilla y Iranzo, 2010; Prados y Vahí, 2011) exclusivamente de los elementos patrimoniales, el análisis de las condiciones ambientales de las que depende la aparición de estos elementos puede ampliar el marco científico, sirviendo como eje de evaluación y categorización en torno al recurso patrimonial de un territorio.

## 5.1. OBJETIVOS

**Objetivo general:**

- Establecer la relación entre las características ambientales existentes en la Comunidad de Madrid y la presencia de elementos e infraestructuras del agua, empleando como referencia cartografía histórica asociada al patrimonio hidráulico.

**Objetivos específicos:**

- Caracterización de la Comunidad de Madrid en base a variables ambientales relacionadas con la localización del patrimonio histórico del agua.
- Implementación de un método de análisis estadístico que relacione los elementos de patrimonio histórico del agua en la Comunidad de Madrid, con las variables ambientales de la región.
- Ubicar dentro de la Comunidad de Madrid aquellas áreas con una mayor densidad de elementos de patrimonio histórico del agua y asociar las mismas a los mapas temáticos de las variables ambientales estudiadas.
- Análisis de la expansión del uso artificial del suelo y su relación con los elementos de patrimonio histórico del agua.

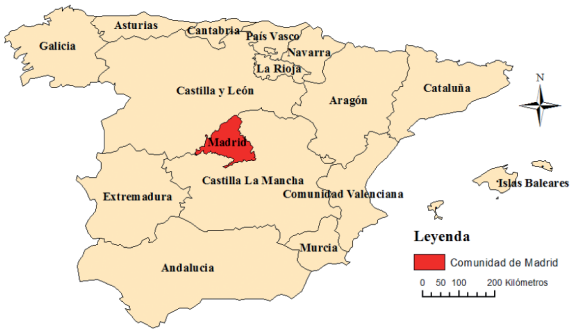
## 5.2. ÁREA DE ESTUDIO

### 5.2.1. SITUACIÓN

La Comunidad de Madrid se sitúa en el centro de la Península Ibérica (Figura 1) (40°26' N 3°41' O), tiene una superficie de 8.021 km² con una forma triangular. Linda con Castilla y León, concretamente con las provincias de Ávila y Segovia, actuando como divisoria del Sistema Central, y con Castilla la Mancha, provincias de Toledo, Cuenca y Guadalajara (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

La situación geográfica de la Comunidad de Madrid, en el centro peninsular, con territorios tan diferentes como las elevaciones del Sistema Central, la Depresión del Tajo y la zona de transición (La Rampa), condiciona y da lugar a la variedad de contrastes climáticos, litológicos, geomorfológicos y edáficos.

*Figura 1. Mapa de situación de la Comunidad de Madrid*

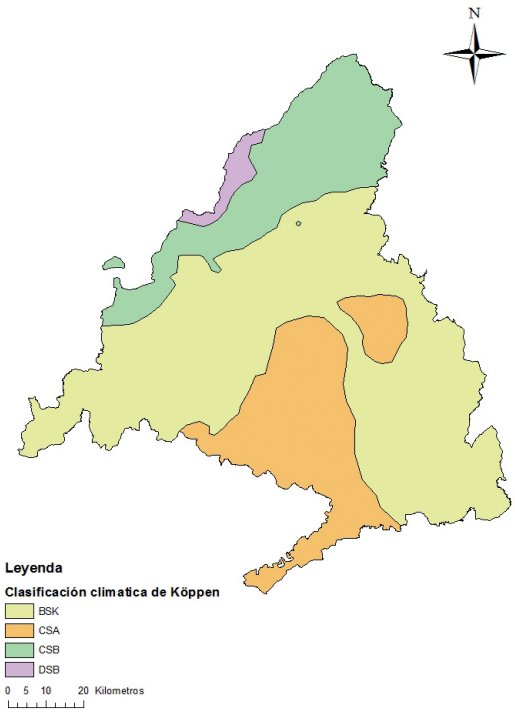



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.2.2. CLIMA

A grandes rasgos el clima de la Comunidad de Madrid depende de la latitud geográfica en la que se encuentra (entre los 40° y 41° de latitud Norte) y de su posición a mitad de camino entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. A nivel local, los parámetros climáticos tienen grandes contrastes: precipitación anual media entre 400 y casi 2.000 mm, temperaturas medias anuales entre 7° C y 15° C y máximas y mínimas absolutas entre -8° C y 44° C (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011). Según la clasificación climática de Köppen se distinguen cuatro tipos de climas dentro de la Comunidad de Madrid, *Dsb* y *Csb* propios de La Sierra y *Csa* y *Bsk* para La Depresión (AEMET, 2013), estos pueden observarse en la figura mostrada a continuación (Figura 2).

*Figura 2. Clasificación climática de Köppen en la Comunidad de Madrid*




*Fuente: Elaboración propia.*

- Dsb - *Hemiboreal mediterráneo* (verano suave, invierno frío): La temperatura media del mes más cálido no llega a los 22 °C pero se superan los 10 °C durante cuatro o más meses al año.

- Csb - *Oceánico mediterráneo* (verano suave): La temperatura media del mes más cálido no llega a los 22 °C pero se superan los 10 °C durante cuatro o más meses al año. Este clima es muchas veces de transición entre el Csa (mediterráneo) y el Cfb (oceánico). A diferencia del mediterráneo presenta un verano más suave, pero al contrario que en el oceánico hay estación seca y esta es en los meses más cálidos.

- Csa - *Mediterráneo* (verano cálido): La temperatura media del mes más cálido supera los 22 °C. Es el clima mediterráneo, con lluvias estacionales y temperaturas cálidas en verano.

- Bsk - *Semiárido frío*: La temperatura media anual está por debajo de los 18 °C.

Las precipitaciones se distribuyen por el territorio madrileño según el gradiente altitudinal. Los balances hídricos climáticos, establecidos como el diferencial entre precipitaciones y evapotranspiración potencial, ponen de manifiesto que, en general, la Comunidad de Madrid sufre un fuerte déficit estival. Las estaciones analizadas en función de su localización son: Rascafría en La Sierra (Tabla 1), Colmenar Viejo en La Rampa (Tabla 2), Madrid, entrada de La Depresión (Tabla 3) y Tielmes, La depresión (Tabla 4).

*Tabla 1. Balance Hídrico de la estación de Rascafría*

| | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T (°C) | 14,84 | 10,63 | 5,79 | 3,23 | 2,93 | 3,88 | 5,96 | 7,95 | 11,66 | 15,64 | 18,56 | 18,10 |
| P (mm) | 47,11 | 97,51 | 148,34 | 131,80 | 119,30 | 102,58 | 76,90 | 80,44 | 86,67 | 53,40 | 18,51 | 18,45 |
| ETP corr (mm) | 74.47 | 47,73 | 21,16 | 10,82 | 10,01 | 13,61 | 27,08 | 39,86 | 67,95 | 94,67 | 115,72 | 104,91 |
| P-ETP (mm) | -27,36 | 49,78 | 127,18 | 120,98 | 109,29 | 88,97 | 49,81 | 40,58 | 18,72 | -41,27 | -97,21 | -86,45 |
| d Reserva (mm) | 0,00 | 49,78 | 50,22 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -41,27 | -58,73 | 0,00 |
| Reserva (mm) | 0,00 | 49,78 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 58,73 | 0,00 | 0,00 |
| ETR (mm) | 47,11 | 47,73 | 21,16 | 10,82 | 10,01 | 13,61 | 27,08 | 39,86 | 67,95 | 94,67 | 77,24 | 18,45 |
| Excedente (mm) | 0,00 | 0,00 | 76,96 | 120,98 | 109,29 | 88,97 | 49,81 | 40,58 | 18,72 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Déficit (mm) | 27,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 38,48 | 86,45 |

*Tabla 2. Balance Hídrico de la estación de Colmenar Viejo*

| | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T (°C) | 19,15 | 13,49 | 8,46 | 5,76 | 4,94 | 6,20 | 9,09 | 10,35 | 14,30 | 19,75 | 23,57 | 23,32 |
| P (mm) | 33,93 | 70,16 | 80,70 | 63,57 | 52,28 | 42,76 | 35,03 | 51,02 | 58,19 | 29,07 | 13,58 | 15,97 |
| ETP corr (mm) | 89,62 | 50,96 | 23,02 | 13,12 | 10,93 | 14,92 | 31,53 | 40,53 | 71,08 | 112,22 | 145,27 | 133,46 |
| P-ETP (mm) | -55,70 | 19,20 | 57,68 | 50,45 | 41,35 | 27,84 | 3,49 | 10,49 | -12,88 | -83,14 | -131,69 | -117,49 |
| d Reserva (mm) | 0,00 | 19,20 | 57,68 | 23,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -12,88 | -83,14 | -3,97 | 0,00 |
| Reserva (mm) | 0,00 | 19,20 | 76,88 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 87,12 | 3,97 | 0,00 | 0,00 |
| ETR (mm) | 33,93 | 50,96 | 23,02 | 13,12 | 10,93 | 14,92 | 31,53 | 40,53 | 71,08 | 112,22 | 17,55 | 15,97 |
| Excedente (mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,33 | 41,35 | 27,84 | 3,49 | 10,49 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Déficit (mm) | 55,70 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 127,72 | 117,49 |

*Tabla 3. Balance Hídrico de la estación de Madrid*

| | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T (°C) | 19,87 | 14,22 | 9,01 | 5,94 | 5,44 | 7,01 | 9,88 | 12,39 | 15,98 | 20,65 | 24,24 | 23,98 |
| P (mm) | 31,97 | 51,44 | 56,29 | 46,17 | 36,29 | 39,47 | 35,91 | 43,84 | 44,14 | 29,32 | 10,14 | 11,11 |
| ETP corr (mm) | 91,99 | 52,04 | 22,99 | 12,10 | 10,97 | 15,84 | 32,61 | 48,83 | 79,49 | 116,83 | 149,83 | 137,41 |
| P-ETP (mm) | -60,02 | -0,60 | 33,30 | 34,07 | 25,32 | 23,63 | 3,31 | -4,98 | -35,35 | -87,51 | -139,68 | -126,30 |
| d Reserva (mm) | 0,00 | 0,00 | 33,30 | 34,07 | 25,32 | 7,30 | 0,00 | -4,98 | -35,35 | -59,67 | 0,00 | 0,00 |
| Reserva (mm) | 0,00 | 0,00 | 33,30 | 67,37 | 92,70 | 100,00 | 100,00 | 95,02 | 59,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ETR (mm) | 31,97 | 51,44 | 22,99 | 12,10 | 10,97 | 15,84 | 32,61 | 48,83 | 79,49 | 89,00 | 10,14 | 11,11 |
| Excedente (mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 16,32 | 3,31 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Déficit (mm) | 60,02 | 0,60 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,84 | 139,68 | 126,30 |

*Tabla 4. Balance Hídrico de la estación de Tielmes*

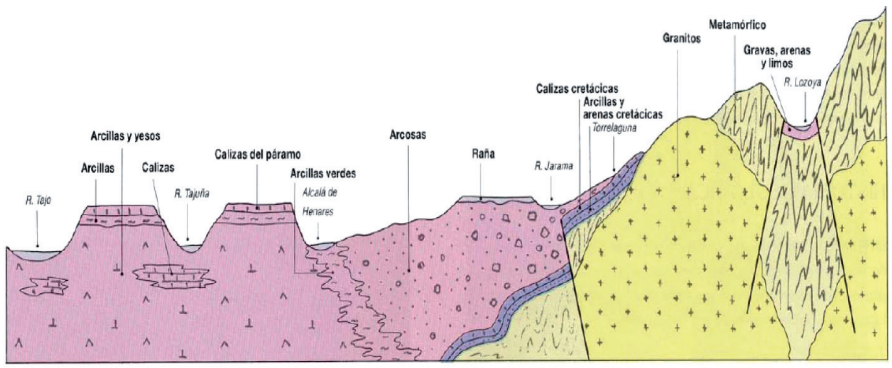
| | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T (°C) | 20,30 | 14,54 | 9,03 | 6,04 | 5,37 | 6,85 | 9,74 | 11,64 | 16,33 | 21,34 | 24,96 | 24,32 |
| P (mm) | 33,63 | 51,75 | 56,78 | 50,76 | 42,04 | 48,16 | 36,41 | 55,06 | 51,10 | 31,41 | 16,87 | 12,82 |
| ETP corr (mm) | 94,35 | 53,06 | 22,50 | 12,01 | 10,38 | 14,89 | 31,24 | 43,74 | 81,15 | 122,00 | 156,17 | 139,99 |
| P-ETP (mm) | -60,73 | -1,32 | 34,27 | 38,75 | 31,66 | 33,27 | 5,17 | 11,32 | -30,05 | -90,59 | -139,30 | -127,18 |
| d Reserva (mm) | 0,00 | 0,00 | 34,27 | 38,75 | 26,97 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -30,05 | -69,95 | 0,00 | 0,00 |
| Reserva (mm) | 0,00 | 0,00 | 34,27 | 73,03 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 69,95 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ETR (mm) | 33,63 | 51,75 | 22,50 | 12,01 | 10,38 | 14,89 | 31,24 | 43,74 | 81,15 | 101,36 | 16,87 | 12,82 |
| Excedente (mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4,69 | 33,27 | 5,17 | 11,32 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Déficit (mm) | 60,73 | 1,32 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 20,64 | 139,30 | 127,18 |

### 5.2.3. RELIEVE Y LITOLOGÍA

En la Comunidad de Madrid se encuentran dos grandes unidades de relieve: La Sierra (Guadarrama, Somosierra y estribaciones de Gredos) y la Depresión o llanuras del Tajo (campiñas, páramos y vegas) a las que podemos añadir una tercera, la Rampa o zona de transición entre ambas. La altitud máxima corresponde al Pico de Peñalara, con 2.429 m, y la mínima, con 430 m., al cauce del río Alberche en Villa del Prado (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

En relación a su litología, en La Sierra predominan las rocas ígneas y metamórficas como el granito y el gneis, al norte de esta, en Somosierra, se localizan fundamentalmente pizarras y cuarcitas. En La Depresión del Tajo encontramos tres zonas de diferente composición: Los Páramos (calizas, arcillas, yesos, margas, etc.); Las Campiñas (arenas, margas arenosas, margas yesíferas y arcillas); y Las Vegas (arenas, gravas y limos). La zona de transición se compone, fundamentalmente, de arcillas, arenas, margas y otros materiales detríticos (Figura 3) (de Bustamante *et al.*, 2008; IGME, 2012).

*Figura 3. Corte geológico esquemático de la Comunidad de Madrid.*




*Fuente: Atlas Geocientífico del medio natural de la Comunidad de Madrid, IGME, 1992.*

### 5.2.4. HIDROLOGÍA

La Comunidad de Madrid está comprendida en la Cuenca Hidrográfica del Tajo, cuyo cauce constituye parte de su límite con las provincias de Cuenca y Toledo, solo un pequeño territorio al norte de la región madrileña vierte sus aguas a la cuenca hidrográfica del Duero. Un abanico de afluentes con dirección predominante N-S llevan sus caudales desde sus nacimientos en las cumbres de la Sierra hasta el río Tajo como el río Jarama, el Guadarrama y el Alberche (Consejería de Medio ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

En la Comunidad de Madrid, las aguas subterráneas suponen la tercera parte del recurso hídrico de la región. Estas aguas están almacenadas bajo la superficie en diferentes acuíferos de diversa naturaleza por donde circula el agua. El Plan Hidrológico del Tajo establece una división de los acuíferos. Éstos quedan divididos en 13 Unidades Hidrogeológicas (UH), de las cuales la Comunidad de Madrid participa en 4: UH-03 Torrelaguna-Jadraque, UH-04 Guadalajara, UH-05 Madrid-Talavera y UH-06 La Alcarria, quedando fuera, la mayor parte de la Sierra y los tramos bajos del Jarama, Manzanares y el Tajo a su paso por la provincia (Consejería de Medio ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

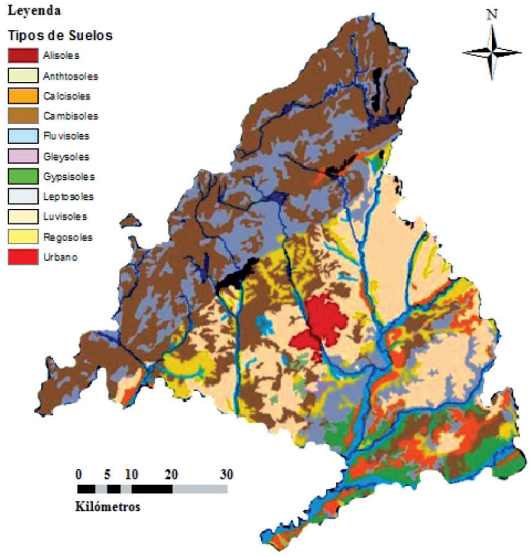
### 5.2.5. EDAFOLOGÍA

Los tipos de suelos en la Comunidad de Madrid (Figura 4) se encuentran separados en dos conjuntos de diferente tipología, por un lado se encuentran los suelos de La Sierra de carácter más húmedo y ácido, con una notable carga de materia orgánica. Los suelos de La Sierra se forman directamente de la roca madre de tipo granítica, generándose horizontes de alteración de la misma composición y horizontes superficiales casi inexistentes (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

Con el descenso paulatino de la altitud, en las zonas centrales de la región, los suelos tienen un grado de evolución mayor, apareciendo horizontes superiores muy desarrollados, formados en su mayor parte por la acumulación de sedimentos de La Sierra madrileña. La mayor parte de la zona central de la Comunidad de Madrid está constituida por suelos formados sobre areniscas de cuarzo (arcosas) conocidas como *Facies Madrid*, habiendo además margas y materiales calizos y yesíferos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

Hacia el sur, este y suroeste del territorio madrileño la tipología de los suelos y el paisaje sufre un cambio. El terreno tiene una mayor aridez y la orografía es más llana. Los suelos básicos son los predominantes en este área, las calizas y los afloramientos yesíferos están muy presentes, principalmente en las proximidades de los páramos. En esta última zona aparecen grandes abanicos aluviales cuaternarios de una gran extensión formando vegas y terrazas. Hay una escasa diferenciación de horizontes, aunque se aprecia un horizonte superficial cargado de materia orgánica; este tipo de suelos suelen aparecer altamente explotados por el hombre para cultivos cercanos a las riberas de los ríos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2011).

*Figura 4. Asociaciones de suelos (FAO) de la Comunidad de Madrid*

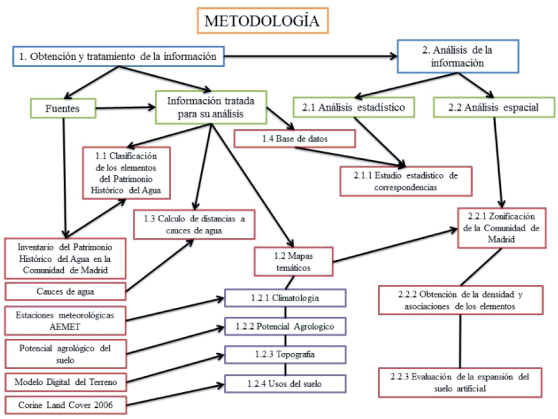



*Fuente: Atlas Medio Ambiente CAM.*

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

En base a facilitar la comprensión de los pasos metodológicos empleados, a continuación puede visualizarse un diagrama resumen (Figura 5) que coteja los métodos asociados a la consecución de los objetivos nombrados con anterioridad:

*Figura 5. Esquema metodológico seguido en el análisis de las características ambientales del patrimonio del agua*



## 6.1. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 6.1.1. ELEMENTOS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO DEL AGUA EN LA COMUNIDAD DE MADRID

Se completó la construcción del catálogo digital de elementos de patrimonio del agua de la Comunidad de Madrid existente en la Fundación IMDEA-Agua, el cual ha sido extraído de cartografía histórica. Este catálogo es la base de información patrimonial de este trabajo pues se refiere, por un lado, a un conjunto homogéneo de elementos de patrimonio del agua para todo el territorio de la Comunidad y, por otro, representa una situación histórica anterior a la serie de cambios socioeconómicos que paulatinamente han transformado el paisaje tradicional. Dicho inventario conforma tres bases cartográficas geométricas diferentes (puntos, líneas y polígonos) procedentes las planimetrías elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional y elaboradas ente finales del siglo XIX y principios del XX. En este estudio se toman únicamente los elementos almacenados como puntos. De la multitud de clases patrimoniales digitalizadas se toman exclusivamente aquellas que se asignan estrictamente como elementos del patrimonio del agua, como norias, pozos, acueductos, batanes, etc. (Tabla 5).

### 6.1.2. ELABORACIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS DE LAS VARIABLES AMBIENTALES ESTUDIADAS

Para establecer la relación de los elementos de la base de datos nombrada con anterioridad y las variables ambientales que principalmente determinan la existencia del patrimonio histórico del agua es necesario apoyarse en las herramientas que proveen los SIG; con ayuda del programa *ArcGis 10.2* se generan un grupo de mapas temáticos a partir de una serie de datos. Para comprender la aparición de estos elementos patrimoniales hay que tener en cuenta los motivos que propiciaron su construcción en relación al territorio y las características ambientales dónde se ubican (Hermosilla *et al.*, 2010). Las variables estudiadas son el clima, la capacidad agrológica y la cubierta y/o uso del suelo y variables topográficas como la altitud y la pendiente. Todos los mapas realizados en relación a las variables nombradas emplean el sistema de proyección ETRS 89 establecido oficialmente de acuerdo al Real Decreto 1071/2007.

*Tabla 5. Elementos del Patrimonio Histórico del Agua analizados*

| Elemento | Definición |
|---|---|
| Acueducto | Conducto artificial por donde va el agua a lugar determinado, y especialmente el que tiene por objeto abastecer de aguas a una población. |
| Alberca | Depósito artificial de agua, con muros de fábrica, para el riego. |
| Almenara | Es un conducto o tanque de oscilación que permite disipar las ondas elásticas generadas por el flujo cuando hay un cierre rápido, puesta en marcha de turbinas o presencia de aire. Tienen como función, además de disminuir el golpe de ariete, almacenar o distribuir caudal hasta que llegue la desaceleración y acortar el período variable de las ondas. |
| Abrevadero | Estanque, pilón o paraje del río, arroyo o manantial a propósito para dar de beber al ganado. |
| Balsa | Hueco del terreno que se llena de agua, natural o artificialmente. |
| Batan | Un batán es una máquina destinada a transformar unos tejidos abiertos en otros más tupidos. Funcionaban por la fuerza de una corriente de agua que hace mover una rueda hidráulica, que activa los mazos que posteriormente golpeaban los tejidos hasta compactarlos. |
| Charca | Depósito algo considerable de agua, detenida en el terreno, natural o artificialmente. |
| Deposito | Los depósitos pueden ser tanques de agua o de otros fluidos. Dependiendo del contenido, los depósitos tienen diferentes características que les permiten tolerar distintas consistencias, temperaturas, etc. |
| Estanque | Balsa construida para recoger el agua, con fines utilitarios, como proveer al riego, criar peces, etc., o meramente ornamentales. |
| Fuente | Manantial de agua que brota de la tierra. |
| Lavadero | Lugar público o doméstico, pila o recipiente utilizados habitualmente para lavar, sobre todo la ropa. |
| Manantial | Lugar en el que el agua emerge de forma natural desde una roca o el suelo y fluye hacia la superficie o hacia una masa de agua superficial. |
| Molino | Máquina para moler, compuesta de una muela, una solera y los mecanismos necesarios para transmitir y regularizar el movimiento producido por una fuerza motriz, como el agua, el viento, el vapor u otro agente mecánico. |
| Noria | Máquina compuesta de dos grandes ruedas engranadas que, mediante cangilones, sube el agua de los pozos, acequias, etc. |
| Pozo | Agujero o perforación que se excava o perfora en la tierra para extraer agua. |
| Presa | Barrera construida transversalmente a un valle para almacenar agua o elevar el nivel de agua. |
| Fuente | Construcción de piedra, ladrillo, madera, hierro, hormigón, etc., que se construye y forma sobre los ríos, fosos y otros sitios, para poder pasarlos. |
| Sifón | Conducción cerrada que tiene una parte por encima del gradiente hidráulico. |

*Fuente de las definiciones: Organización Meteorológica Mundial (2012), Real Academia de la Lengua Española (2001).*

6.1.2.1. **Climatología - Temperatura y Precipitaciones**

Los mapas climáticos se elaboraron a partir de la información provista por la Agencia Española de Meteorología (AEMET). De este organismo se extraen los datos de temperaturas y precipitaciones de las diferentes estaciones meteorológicas de la Comunidad de Madrid para una serie temporal larga que varía según la disponibilidad de datos meteorológicos de cada estación. Después de extraer los datos de precipitación y temperatura, las coordenadas de las estaciones se representan en un SIG formando una capa de puntos con la que se realiza una distribución espacial (interpolación) de los valores climáticos. La técnica de interpolación utilizada ha sido la conocida como *IDW (Inverse Distance Weighted)*. La utilización de esta técnica para cartografiar la distribución de los datos de una variable es una alternativa a los métodos tradicionales, ya que permite realizar una superficie continua de los valores de los elementos interpolados (García y Cebrián, 2006).

Una vez obtenidos los mapas de datos climáticos, en formato digital ráster, estos son clasificados en una serie de intervalos empleando la herramienta *Reclasificar*, cuya función es modificar los valores numéricos originales. Los intervalos resultantes se han obtenido al dividir en cinco partes la diferencia entre los valores máximo y mínimo registrados en la Comunidad de Madrid.

6.1.2.2. **Potencial agrológico**

Se ha empleado el mapa de capacidad de uso agrícola del suelo de la Comunidad de Madrid elaborado por el Consejo Superior de Investigaciones (CSIC) en el año 1990; este mapa complementa la información del mapa de asociaciones de suelos realizado con anterioridad por la misma entidad. El mapa de potencial agrológico informa sobre la adecuación de los suelos al cultivo en base a una serie de limitaciones. El mapa original fue inicialmente escaneado y, posteriormente, geo-referenciado y digitalizado como capa vectorial. El mapa utilizado cuenta con cinco divisiones de potencial agrológico, las cuales fueron plasmadas de la misma manera en la digitalización. Entre las posibles limitaciones que se asocian a la pérdida de potencial de los suelos están sus características físicas, erosión, deformaciones hidromorfológicas, contenido salino y pérdida de espesor útil (Monturiol y Alcalá del Olmo, 1990). El mapa digitalizado únicamente representa las clases de potencial agrícola y no el origen de la limitación. La configuración es la siguiente:

- *A*: Suelos que no presentan ningún tipo de limitación.
- *B*: Suelos similares a los *A* pero con alguna limitación.
- *C*: Suelos con limitaciones ya de cierta entidad.
- *D*: Suelos con severas limitaciones agrológicas.
- *E*: Suelos de peor calidad, su uso está muy limitado.

6.1.2.3. **Topografía – Altitud y Pendiente**

Se ha distinguido entre altitud y pendiente. Para poder obtener mapas que contengan información de estas variables se ha utilizado el Modelo Digital del Terreno (MDT) de la Comunidad de Madrid obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Una vez cargado dicho modelo en el entorno SIG, se obtuvo una generalización de los valores altitudinales al ser agrupados en cinco clases regulares sobre la diferencia entre el valor mínimo y máximo del MDT empleando la herramienta *Reclasificar*, quedando los rangos distribuidos de la siguiente manera: 400-600 m, 600-900 m, 900-1.300 m, 1.300-1.800 m y 1.800-2.200 m.

El mapa de pendientes se construyó también a partir del MDT, al que se le aplica la herramienta *Cambio* que identifica la pendiente (gradiente o tasa de cambio máximo en el valor Z) desde cada celda de una superficie ráster de datos. Se obtuvo un mapa ráster con la pendiente de cada pixel en porcentaje, estos valores se dividieron, al igual que la altitud, en cinco clases con la herramienta *Reclasificar*. Los rangos de pendiente empleados son: < 4%, 4-12%, 12-25%, 25-40% y > 40%. La clasificación de pendientes se ha basado en trabajos existentes (Lugo, 1988; Pedraza, 1996), adaptándolas a las características de la distribución de las altitudes de la Comunidad de Madrid.

6.1.2.4. **Usos del suelo**

Los usos del suelo se han obtenido a partir de la cartografía de usos y cubiertas del suelo Corine Land Cover (CLC), existente en la infraestructura de datos espaciales de España del IGN. La nomenclatura europea consta de tres niveles con 44 clases diferentes (Agencia Ambiental Europea, 1995). La nomenclatura española amplió hasta 5 niveles y 64 clases para el CLC 1990 y 85 clases para el CLC 2000. Para disponer de un mapa con una amplia especificación de los usos del suelo se utiliza el CLC del año 2006 al poseer una referencia temporal más reciente. Sin embargo, el mapa digital de 2006 no posee el nivel de detalle provisto por el CLC 2000, por lo que se adaptó su nomenclatura a los de usos del suelo del CLC 2000. El mapa final resultante distingue entre cinco usos del terreno: espacio natural, espacio artificial, cultivos de secano, cultivos de regadío y masas de agua.

### 6.1.3. CÁLCULO DE DISTANCIAS A CAUCES DE AGUA

Por último, otra de las variables relevantes a tener en cuenta es la distancia de los puntos (elementos patrimoniales) al cauce de agua más próximo, refiriéndose a aguas lóticas o aguas en movimiento. Cabe destacar que la metodología empleada en esta variable no tendrá como elemento resultante un mapa sino una lista o tabla en la cual se identifica a cada elemento del patrimonio del agua y se vincula con una distancia. Para la obtención de estas distancias se utilizó la capa de puntos de patrimonio histórico del agua y otra con los diferentes cauces de la Comunidad de Madrid, provista por la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT).

Con la herramienta SIG, *Vecino más próximo* se calculó la distancia entre cada centroide de entidad y la ubicación del centroide de su vecino más cercano. A continuación calcula el promedio de todas las distancias de vecinos más próximos. Si la distancia promedio es menor que el promedio de una distribución hipotética aleatoria, se considera que la distribución de las entidades que se analiza es agrupada. Si la distancia promedio es mayor que la distribución hipotética aleatoria, se considera que las entidades están dispersas. La relación de vecino más cercano promedio se calcula como la distancia promedio observada dividida por la distancia promedio esperada (con la distancia promedio esperada basada en una distribución hipotética aleatoria con el mismo número de entidades que cubren la misma

área total). Una vez obtenida la distancia de cada elemento con los cauces, las distancias son clasificadas en cinco grupos según su cercanía: < 200 m, 200-600 m, 600-1.200 m, 1.200-2.000 m y > 2.000 m.

#### 6.1.4. BASE DE DATOS

Finalmente, y para asociar las variables ambientales estudiadas a cada uno de los puntos de patrimonio, se realizó una consulta de las bases de datos de cada capa ambiental y una posterior asignación de sus atributos a los elementos del inventario de patrimonio. Para ello se utilizó la herramienta *Extraer valores de puntos* cuya función es extraer los valores de celda basados en un conjunto de entidades de punto y registra los valores en la tabla de atributos de una clase de entidad de salida. Resultando una nueva columna de información en la tabla de atributos, este proceso ha de realizarse con cada una de las variables estudiadas.

## 6.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

### 6.2.1. ANÁLISIS ESPACIAL

#### 6.2.1.1. Zonificación de la Comunidad de Madrid en base a las variables ambientales estudiadas

Una vez obtenidos los mapas temáticos de las variables ambientales a analizar de la Comunidad de Madrid se pueden entrever posibles relaciones entre los mismos, para ello se suman los valores de cada uno y se comprueba a qué tendencia se asemejan. La herramienta empleada para el cálculo es *Calculadora Ráster*, utilizando su operadora lógica se suman los mapas de precipitación, temperatura, potencial de suelo y altitud (estos mapas están previamente en un formato ráster para poder ser utilizados con esta herramienta).

#### 6.2.1.2. Obtención de la densidad y asociaciones de los elementos patrimoniales con las variables ambientales planteadas

En primer lugar, se genera un mapa que contenga en qué lugares se concentran las mayores densidades de puntos, para ello empleamos la herramienta *Densidad Kernel*, esta calcula una magnitud por unidad de área a partir de entidades de punto o polilínea mediante una función Kernel, para adaptar una superficie suavemente estrechada a cada punto o polilínea. La suma ponderada de estas funciones es un estimador para aproximar la función de densidad desconocida (Rodríguez, 2014).

El mapa obtenido refleja una serie de rangos de densidad, desde 0 a 4,90 de magnitud. Únicamente se emplean densidades de una magnitud considerable, cuando el valor de Kernel sea menor de 1,30, por lo tanto se realiza una clasificación utilizando la herramienta *Reclasificar* utilizando únicamente esta franja de densidad. Para poder cruzar los mapas de variables con las altas densidades de elementos es necesario que los mapas estén en formato vectorial empleando la herramienta *De ráster a polígono* dentro de las herramientas de conversión. Con ambos mapas en formato vector se emplea la herramienta *Intersacar* que calcula una intersección geométrica de las entidades de entrada. Las entidades o partes de entidades que se superponen en todas las capas y/o clases de entidad se escriben en la clase de entidad de salida. Con la múltiple división de polígonos generada, se unen a continuación los polígonos de la misma tipología de la variable ambiental cruzada empleado la herramienta *Fusionar* combinando datasets de entrada múltiples del mismo tipo de datos en un nuevo dataset de salida único.

Además de la representación visual de las variables ambientales asociadas a las altas concentraciones de elementos de patrimonio histórico se ha elaborado un recuento en tanto por ciento de las distribuciones de elementos por cada clase tipológica de cada variable ambiental estudiada.

#### 6.2.1.3. Evaluación de la expansión del suelo artificial en relación al patrimonio histórico del agua

Entre otras, una de las causas que ha motivado la desaparición de un abundante número de elementos de patrimonio histórico del agua ha sido la expansión de los cascos urbanos de los municipios debido al aumento de áreas residenciales, comerciales e industriales de las ciudades de la Comunidad de Madrid (Gallardo y Martínez-Vega, 2012).

Esta afección se ha estudiado utilizando herramientas SIG, aplicadas al área de la Comunidad de Madrid. Como material empleado para la ejecución del análisis se han utilizado los usos del suelo (polígonos) y elementos hidráulicos (puntos) del inventario del patrimonio histórico y los usos del suelo actuales del CLC 2006.

Empleando la herramienta *Intersacar* se obtiene una capa única que separa el entramado artificial histórico inicial y la expansión del suelo. Para poder aportar un peso numérico a la visualización se utiliza la herramienta *Calcular geometría*, que permite tener acceso a la geometría de las entidades de una capa. La herramienta puede calcular valores de coordenadas, longitudes y áreas. Como los atributos de la capa utilizada únicamente poseen dos campos se obtienen las áreas correspondientes a cada uno de los mismos.

Por último, para poder conocer en qué área se encuentran los elementos de patrimonio histórico del agua. Se cruza el mapa de puntos con la capa de uso histórico y con la capa de expansión del suelo artificial actual derivada de CLC. Para ello se emplea la herramienta *Unión por localización espacial*, asignándose a cada punto el uso artificial de su localización. En consecuencia, para cada elemento patrimonial se pueden distinguir tres posibilidades, los que se encontraban históricamente dentro del tejido urbano, los que se sitúan en el área de expansión artificial mostrada en 2006, habiendo una alta posibilidad de que estos en la actualidad hayan desaparecido y, por último, los puntos situados fuera de los usos artificiales del suelo en ambas fechas.

### 6.2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 6.2.2.1. Estudio estadístico de correspondencias entre las variables ambientales y los elementos patrimoniales

Para el análisis estadístico de los datos es necesario el empleo de una metodología que se adecue a los datos que se disponen, teniendo como objetivo la búsqueda de una relación o tenden-

cia entre variables cualitativas, como son los elementos del patrimonio histórico del agua y las variables ambientales de la Comunidad de Madrid; hay múltiples análisis estadísticos que pueden adaptarse a dichos datos como análisis de componentes principales, análisis de clúster entre otros, en este caso de estudio se empleará el análisis de correspondencias por su mayor adecuación y su sencillez de aplicación con herramientas informáticas.

El análisis de correspondencias es un método estadístico habitualmente empleado para representar posibles asociaciones existentes entre variables categóricas o entre las clases que presentan estas, con objeto de establecer, si es posible, patrones o estructuras en los datos obtenidos con su observación (Benzécri y Benzécri, 1973). Proviene de una derivación del análisis de componentes principales pero aplicándose sobre tablas de contingencia de datos nominales como frecuencias o porcentajes, donde al relacionar las columnas y filas en base a los criterios estadísticos del análisis y la consecuente representación de los resultados en un gráfico de correspondencias se hacen evidentes las asociaciones de dependencia y semejanza entre las variables utilizadas (Navarro, 1983; Joaristi y Lizasoain, 2000; Salvador, 2003).

Para la realización de dicho análisis es necesaria la elaboración de tablas de contingencia derivadas de la base de datos de puntos de elementos del patrimonio histórico que se ha manejado con anterioridad.

Se realiza una tabla de contingencia por cada una de las variables ambientales estudiadas (Anexo 1). Para su elaboración se emplea una hoja de cálculo, donde al introducir la base de datos se contabiliza el número de veces que un determinado elemento aparece en cada clase de las variables estudiadas, contabilizando la frecuencia con la que aparece cada elemento.

Una vez obtenida cada una de las tablas, se dispone la realización del análisis de correspondencias empleando el programa estadístico *R 3.0.2*. El funcionamiento de este programa a diferencia de los demás software estadísticos es su uso a partir de comandos en una consola, además de instalar por cuenta ajena paquetes de análisis que han sido ya elaborados por personas que han utilizado un análisis en concreto con anterioridad.

Con el programa operativo, en primer lugar hay que instalar el paquete que corresponde al análisis deseado, en el caso de este estudio *CA (análisis de correspondencia)*. A partir de aquí el programa ha de cargar las tablas de contingencia en su librería virtual donde serán procesadas. A continuación, aplicando la instalación mencionada, el programa toma los datos y genera una tabla en la que aparecen múltiples datos derivados de la realización del análisis. Posteriormente se le indica al programa que represente los resultados del análisis gráficamente en un gráfico bidimensional conocido como *gráfico de correspondencias* (Paradis, 2002). Dicho proceso se reitera tantas veces como tablas de contingencias se tomen, una para cada variable ambiental estudiada. Los elementos del patrimonio citados anteriormente (Tabla 5), son introducidos en cada uno de los análisis excepto en el caso de los puentes en lo que a distancia al cauce se refiere por su obviedad.

Para poder interpretar los resultados se analizan los valores generados por el programa, donde se indican una serie de parámetros estadísticos para la comprensión del análisis:

- *Eigenvalues* (valores propios): indican el nivel de importancia de los ejes del mapa de correspondencias, mostrándonos la cantidad de varianza o inercia para cada eje, la correlación entre las filas y columnas. La suma de los mismos representa el total de las desviaciones para cada celda de la tabla, cuanto más alta sea dicha cifra, habrá una mayor desviación de los valores.

- Masa (%): peso relativo de cada atributo sobre el resto de los mismos en cada fila o columna.

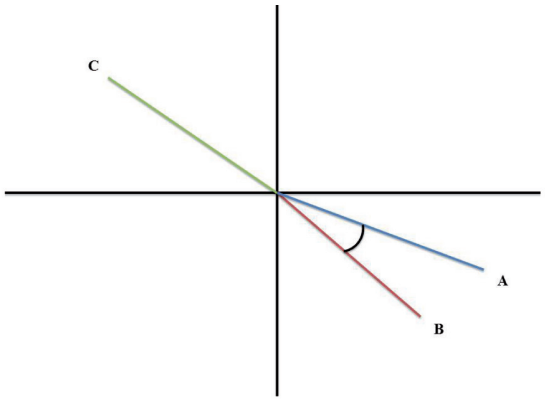
- La distancia $Chi^2$: mide la diferencia entre los valores teóricos y los esperados, se calcula estimando un valor *esperado* por cada celda y su posterior comparación con los valores observados, es decir, el valor *esperado* representa que sucedería si no hubiera relación entre filas y columnas. Dentro del gráfico representa la distancia de las variables respecto al origen del gráfico para cada dimensión.

- Inercia: indica como contribuye cada variable al aspecto final del gráfico de correspondencias, es decir, es un desglose de la varianza.

En cuanto a la interpretación gráfica del análisis, para poder determinar cómo se relacionan y que tendencia toman los datos, se emplean dos formas de visualización:

- Relación entre las variables *columna*, es decir, las clases de variable ambiental estudiada: Trazando una línea entre cada una de las variables y el origen el gráfico de coordenadas, se observa el ángulo formado por ambas líneas. Si el mismo es inferior a 90 grados hay una similitud entre ambas variables habiendo correlación entre las mismas. Si el ángulo forma 90 grados entre estas indica que no hay ninguna correlación entre ambas y si este es mayor a 90 grados ambas variables estarán inversamente relacionadas. En el ejemplo mostrado a continuación (Figura 6) se observa como *A* y *B* estarían correlacionados entre sí, al existir un ángulo relativamente pequeño entre ambas variables, sin embargo, ambas tendrían una correlación negativa con la variable *C* que se encuentra enfrentada a estas en la dimensión contraria.

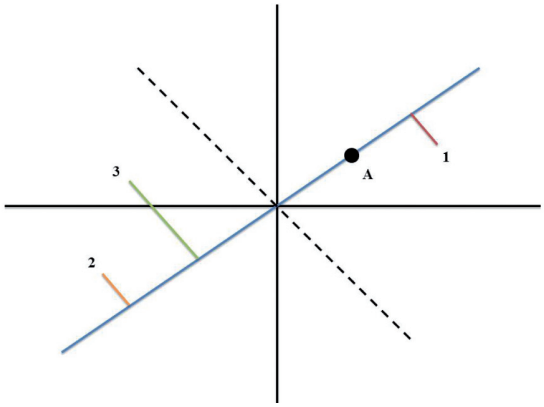
*Figura 6. Ejemplo de gráfico de correspondencias mostrando correlaciones entre clases de una variable columna*




*Fuente: Elaboración propia.*

Relación entre los elementos de entrada *fila* (elementos del patrimonio) y *columna* (variables ambientales): Se traza una línea entre el valor columna relativo a una clase ambiental continúa por el centro del gráfico y a continuación, se trazan líneas perpendiculares a la misma hacia los puntos fila que representan los elementos del patrimonio. Cuando el atributo de la variable ambiental y un elemento en cuestión se sitúen en el mismo lado del gráfico habiendo una línea perpendicular relativamente cercana habrá una correlación positiva, sin embargo, si dicha posición se encuentra al otro lado del grafico la correlación será negativa. En el caso de la (figura 7), el elemento *columna* (variable ambiental) está representado por la letra *A*. Al trazar una línea desde este punto hacia el origen y trazando líneas perpendiculares a los elementos *fila* representados con los números *1, 2 y 3* se puede ver como *A* y *1* muestran una fuerte correlación al contrario que *A* con *2* y *3* donde se aprecia una correlación negativa.

*Figura 7. Ejemplo de gráfico de correspondencias mostrando correlaciones entre clases de una variable columna y elementos fila*

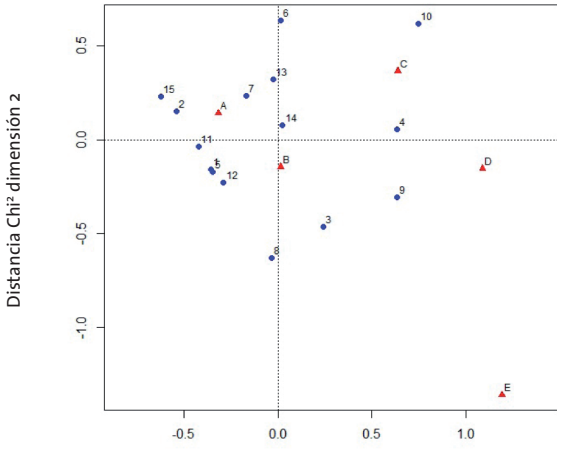



*Fuente: Elaboración propia.*

Las clases se agrupan en tres grupos diferentes, por un lado, de 400 a 600 metros, en un siguiente grupo altitudes de 600 a 1.800 metros y por último, mayores de 1.800. La agrupación más fuerte se encuentra entre el primer grupo de altitudes entre los 400 y 600 metros y elementos como acueductos, albercas y estanques, balsas y charcas, depósitos, norias, pozos, presas y sifones. Para el resto de elementos no se encuentran tendencias tan relevantes como las anteriores.

Aunque el rango de altitud que abarca una mayor cantidad de espacio sea entre los 600 y 900 metros, los grandes valles fluviales de la Comunidad de Madrid están dispuestos en altitudes de entre 400 y 600 metros, siendo las zonas que por su tradición de uso agrícola en las inmediaciones de las riberas resulta más fácil encontrar elementos hidráulicos (Serrano y Antequera, 2011), por ello se encuentra un mayor número de elementos correlacionados con este rango.

*Figura 8. Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable altitud*




# 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 7.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 7.1.1. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE CORRESPONDENCIAS ENTRE LAS VARIABLES AMBIENTALES Y LOS ELEMENTOS PATRIMONIALES ESTUDIADOS

#### 7.1.1.1. Altitud

Obtenidos los resultados del análisis de correspondencias en cuanto a la variable altitud se refiere (Figura 8), se puede observar como hay una relación inversa entre *A* y el resto de clases ambientales, de las cuales *B*, *C* y *D* están correlacionadas en entre si y *E* mantiene una relación muy débil con estas últimas. En cuanto a la relación entre las clases y los elementos se aprecia una fuerte tendencia de correlación entre *A* y la mayor parte de los elementos analizados *1, 2, 5, 7, 11, 12, 13 y 15* formando una nube de puntos en el área negativa de la dimensión del eje *X* con distancias *Chi²* muy similares.

| Elemento Patrimonio | Identificador | Clase ambiental | Identificador |
|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | 400 - 600 metros | A |
| Albercas y Estanques | 2 | | |
| Almenaras | 3 | | |
| Abrevaderos | 4 | 600 - 900 metros | B |
| Balsas y Charcas | 5 | | |
| Batanes | 6 | | |
| Depósitos | 7 | 900 – 1.300 metros | C |
| Lavaderos | 8 | | |
| Manantiales y Fuentes | 9 | | |
| Molinos | 10 | 1.300 – 1.800 metros | D |
| Norias | 11 | | |
| Pozos | 12 | | |
| Presas | 13 | 1.800 - > 2.200 metros | E |
| Puentes | 14 | | |
| Sifones | 15 | | |

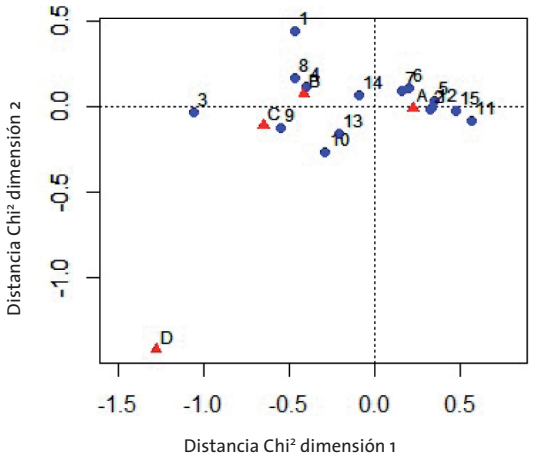
7.1.1.2. Pendiente

Para la variable topográfica de la pendiente se observa poca desviación de los puntos (Figura 9). La clase *A* forma su propia nube de puntos, siendo esta la variable con más peso, 67% de masa; dicha clase esta correlacionada negativamente con el resto, *B*, *C* y *D*, de las cuales *B* y *C* están correlacionadas entre sí y *D* se aleja de cualquier relación con el resto de clases y elementos. La clase *A* es la que asocia un mayor número de elementos fuertemente correlacionados, *2, 5, 6, 7, 11, 12 y 15* situados en distancias *Chi²* muy similares en torno a 0,22; formando una nube de puntos conjunta se encuentra la clase B asociada a los elementos *1, 4, 8 y 14*, en torno a una distancia *Chi²* de 0,42 y la clase *C* con los elementos *3, 9, 10 y 13*, con una distancia en torno a 0,67. Como se ha nombrado con anterioridad la clase *D* se mantiene lejos de establecer cualquier relación, aunque no es un dato relevante al ser la clase que menor peso ejerce, 0,002.

Las pendientes menores del 4% son las que mayor representación ejercen en el gráfico de correspondencias además de mantener una fuerte asociación con elementos como las albercas y estanques, balsas y charcas, batanes, depósitos, norias, pozos y sifones. Con una tendencia inversa a la clase anterior se encuentran pendientes del 4 a 40%, aunque la clase de 25 a 40% tiene una escasa significación (la clase *E* de pendiente mayores de 40% se eliminó por estar sin representar por ningún elemento). Las pendientes llanas, hasta el 4% asocian elementos como albercas y estanques, balsas y charcas, batanes, depósitos, norias, pozos y sifones. Las pendientes del 4 al 12%, se correlacionan con elementos como acueductos, abrevaderos, lavaderos y puentes. Por último, las pendientes del 12 al 25% muestran una relación con almenaras, manantiales y fuentes, molinos y presas. Por encima del 25% de pendiente no se encuentran relaciones evidentes.

El territorio madrileño en la mayor parte su área posee una pendiente menor al 4% ideal para la construcción de multitud de elementos hidráulicos (Hermosilla y Peña, 2013), es por ello que resulte evidente la alta correlación de los elementos mostrada en el análisis con este rango de pendiente.

*Figura 9. Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable pendiente*




| Elemento Patrimonio | Identificador | Clase ambiental | Identificador |
|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | 0 - 4% | A |
| Albercas y Estanques | 2 | | |
| Almenaras | 3 | | |
| Abrevaderos | 4 | 4 - 12% | B |
| Balsas y Charcas | 5 | | |
| Batanes | 6 | | |
| Depósitos | 7 | | |
| Lavaderos | 8 | 12 - 25% | C |
| Manantiales y Fuentes | 9 | | |
| Molinos | 10 | | |
| Norias | 11 | | |
| Pozos | 12 | 25 - 40% | D |
| Presas | 13 | | |
| Puentes | 14 | | |
| Sifones | 15 | | |

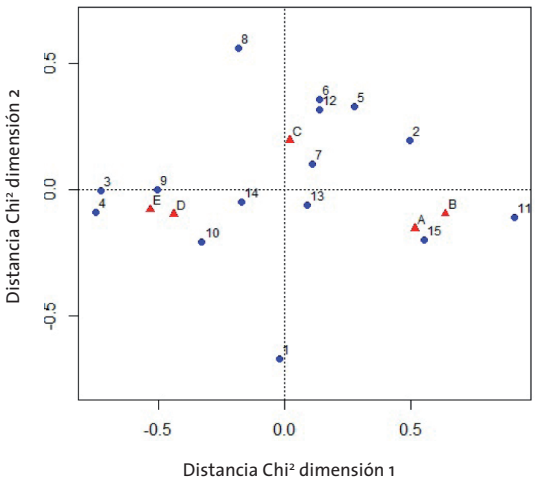
7.1.1.3. Potencial Agrológico

En el caso del potencial agrológico (Figura 10), las clases están divididas en tres grupos enfrentados, con una correlación negativa encontramos *A y B* y *D y E*, la clase *C* muestra una correspondencia distinta a las anteriores constituyendo un grupo independiente. Las relaciones entre los elementos y las clases muestran tres nubes de puntos. El primer grupo relaciona las clases *D y E* en la dimensión negativa del eje *X* con los elementos *3, 4, 9, 10 y 14*. Con la clase *C* aparecen los elementos *2, 5, 6, 7 y 12*, para las categorías restantes, *A y B* se muestra una relación con los elementos *11,13 y 15*.

Las distintas clases de potencial agrológico están repartidas en tres grupos, por un lado, los potenciales del suelo más altos *A y B*, por otro los intermedios que no tienen ninguna relación con el resto y por otro lado los suelos de peor calidad *D y E* que están negativamente correlacionados con el primer grupo. Para altos potenciales agrológicos del suelo aparecen asociados elementos como norias, presas y sifones, para potenciales bajos elementos como almenaras, abrevaderos, manantiales y fuentes, molinos y puentes. Por último en los suelos de calidad intermedia se aprecian asociaciones con albercas y estanques, balsas y charcas, batanes, depósitos y pozos.

En este caso, se esperaba una menor dispersión en el análisis, obteniendo abundantes correlaciones entre los elementos hidráulicos y suelos de alto potencial agrícola, muy propicios para el cultivo, donde sería normal encontrar un mayor número de elementos hidráulicos por su relación con el regadío (Hermosilla y Peña, 2013).

*Figura 10. Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable potencial agrológico*




| Elemento Patrimonio | Identificador | Clase ambiental | Identificador |
|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | Potencial Elevado "A" | A |
| Albercas y Estanques | 2 | | |
| Almenaras | 3 | | |
| Abrevaderos | 4 | Potencial Alto "B" | B |
| Balsas y Charcas | 5 | | |
| Batanes | 6 | | |
| Depósitos | 7 | Potencial Intermedio "C" | C |
| Lavaderos | 8 | | |
| Manantiales y Fuentes | 9 | | |
| Molinos | 10 | Potencial Bajo "D" | D |
| Norias | 11 | | |
| Pozos | 12 | | |
| Presas | 13 | Potencial Escaso "E" | E |
| Puentes | 14 | | |
| Sifones | 15 | | |

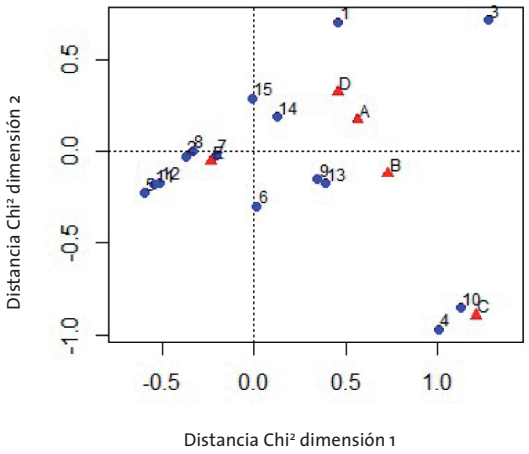
7.1.1.4. Temperatura

Para la temperatura (Figura 11), se observa como la clase que asocia una mayor relación con los elementos y que posee un gran peso en la correspondencia es la clase *E*, con un 70% de importancia. Esta clase se encuentra lejos de cualquier semejanza con el resto, se encuentra enfrentada en una correlación inversa con los identificadores de clase *A, B, C y D*. Las clases *A, B y D* están fuertemente correlacionadas aunque *C* se encuentra lejos de establecer semejanza con las mismas al correlacionarse con estas muy débilmente teniendo una distancia *Chi²* muy diferente. La clase *E* forma una nube de puntos en una tendencia lineal muy clara situándose multitud de elementos en sus cercanías, en una distancia *Chi²* en torno a 0,35 en la dimensión negativa del eje *X*, en este área encontramos elementos tales como *2, 5, 7, 8,11 y 12*.

La clase más importante está representada por las temperaturas de entre 13,4 y 15,2 °C, relacionada de manera contraria con temperaturas de entre 11,7 y 13,4 °C y entre 9,9 y 6,4 °C. Al margen de esta relación se encuentran las temperaturas de entre 9,9 y 11,7 °C.

El hecho de que gran parte de los elementos hidráulicos se dispongan en las áreas con las temperaturas más elevadas de la Comunidad de Madrid como era de esperar, debe relacionarse con que muchos de ellos son estructuras relacionadas con el cultivo de regadío y éste, a su vez, se ve influenciado por las condiciones térmicas elevadas puesto que el crecimiento de cultivos en estas condiciones es mayor siempre que se respeten los insumos necesarios para ello (Fischer, 1983).

*Figura 11. Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable temperatura*




| Elemento Patrimonio | Identificador | Clase ambiental | Identificador |
|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | 6,4 - 8,2 °C | A |
| Albercas y Estanques | 2 | | |
| Almenaras | 3 | | |
| Abrevaderos | 4 | 8,2 - 9,9 °C | B |
| Balsas y Charcas | 5 | | |
| Batanes | 6 | | |
| Depósitos | 7 | 9,9 - 11,7 °C | C |
| Lavaderos | 8 | | |
| Manantiales y Fuentes | 9 | | |
| Molinos | 10 | 11,7 - 13,4 °C | D |
| Norias | 11 | | |
| Pozos | 12 | | |
| Presas | 13 | 13,4 - 15,2 °C | E |
| Puentes | 14 | | |
| Sifones | 15 | | |

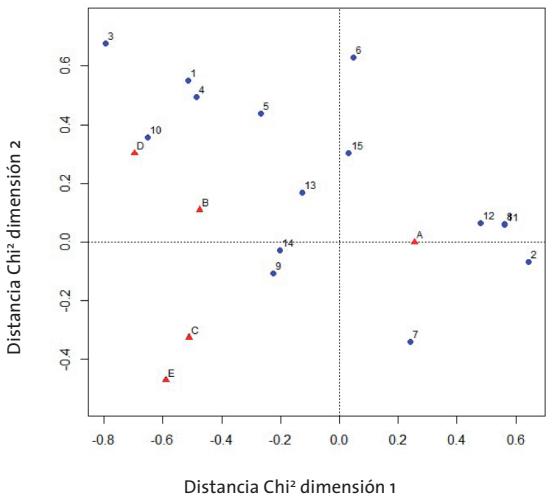
### 7.1.1.5. Precipitación

El análisis sobre la variable de precipitación muestra una elevada desviación de los datos (Figura 12), repartiéndose estos muy separados en ambas dimensiones con valores de distancia *Chi²* elevados. Las clases de precipitación están repartidas en tres grupos, el primero, la clase *A*, con un importante peso en el análisis 66% (se sitúa en la dimensión positiva del eje *X*) enfrentada en una relación inversa de correlación con los grupos formados por *D y B* y *C y E* en menor grado (situados en el lado negativo del eje *X*, aunque *D y B* en el lado positivo del eje *Y* y *C y E* en el negativo). La relación de los elementos y las clases ambientales estudiadas no se asemejan a casos anteriores, la mayor dispersión la encontramos en el eje *X*, siendo este el que representa la dimensión con más inercia 82,6%, por lo que no se han localizado semejanzas muy representativas para los elementos del patrimonio y la precipitación. Únicamente encontramos semejanzas positivas en la clase *D* y el elemento *10* y la clase *A* con los elementos *2, 8,11 y 12* pero en menor medida.

Separadas en tres grupos se encuentra por un lado la clase referente a precipitaciones de entre los 336 y 533 mm como clase más representativa por otro lado se aprecia una correlación inversa con la clase anterior pero relacionadas entre sí; por un lado las clases de precipitación entre 533 y 731 mm y entre 928 y 1.126 mm, y por otro las clases entre 731 y 928 mm y 1.126 y 1.324 mm. Las relaciones más evidentes entre los elementos patrimoniales y estas clases se encuentran entre los molinos y precipitaciones entre 928 a los 1.126 mm, y entre albercas y estanques, lavaderos, norias y pozos con precipitaciones de entre 336 y 533 mm.

Se aprecian notables dispersiones en los resultados obtenidos que no denotan una tendencia clara, aunque si una ligera correlación de los elementos con la clase de menor precipitación entre los 336 y 533 mm, siendo este echo comprensible debido a que un aumento de la precipitación aumentaría en exceso la humedad y heladas (la distribución en la región es muy pareja a la temperatura habiendo una mayor precipitación en áreas con menor temperatura), además de que el agua en exceso sería contraproducente para los cultivos (Durón *et al.*, 2007).

*Figura 12. Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable precipitación*




| Elemento Patrimonio | Identificador | Clase ambiental | Identificador |
|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | 336 - 533 mm | A |
| Albercas y Estanques | 2 | | |
| Almenaras | 3 | | |
| Abrevaderos | 4 | 533 - 731 mm | B |
| Balsas y Charcas | 5 | | |
| Batanes | 6 | | |
| Depósitos | 7 | 731 - 928 mm | C |
| Lavaderos | 8 | | |
| Manantiales y Fuentes | 9 | | |
| Molinos | 10 | 928 – 1.126 mm | D |
| Norias | 11 | | |
| Pozos | 12 | | |
| Presas | 13 | 1.126 – 1.324 mm | E |
| Puentes | 14 | | |
| Sifones | 15 | | |

### 7.1.1.6. Distancia a cauces de agua

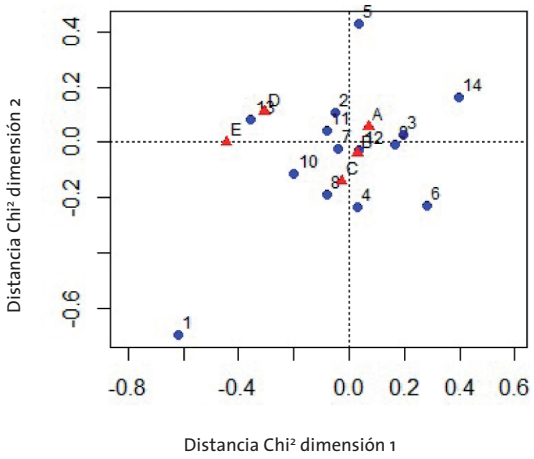
En la última variable estudiada, las distancias a cauces de los elementos patrimoniales es aquella con la menor dispersión de los datos (Figura 13). Hay una distancia *Chi²* muy reducida tanto para los elementos como para las clases. Esta tendencia posee tres puntos alejados de la nube principal como única alteración a la tendencia principal, los elementos *1, 5 y 14*. Dentro de la nube principal de menor distancia *Chi²* aparecen las clases *A, B y C* estando muy próximas entre sí pero con cierta independencia entre ambas, por encontrarse cada una de las clases en un cuadrante, aunque su mayor distancia se ejerce en la segunda dimensión, es decir, el eje *Y* cuya relevancia en peso es inferior a una tercera parte de la primera dimensión, el eje *X*, donde las distancias son muy reducidas. Aparte y muy conectadas entre sí se encuentran las clases *D y E*, muy cercanas en el cuadrante superior izquierdo, manteniendo una relación de tendencia contrapuesta con las clases *A y B*. En cuanto a los elementos, al tener tendencias muy semejantes entre si resulta complicado distinguirlas, aunque se observa una cierta tendencia entre *A y 3*, *B* con *12 y C* con *8 y 10*.

Hay una relación evidente entre aquellas distancias muy cercanas al cauce, las dos primeras clases, hasta 200 y 600 metros. Otra relación evidente, inversamente relacionada con el grupo anterior, la establecen las distancias superiores a 1.200 metros.

Los elementos que guardan una mayor relación con las distintas clases establecidas son complicados de distinguir debido a la concentración de los datos pero se observa como guardan tendencia las almenaras a distancias cercanas, menores de 200 metros, los pozos de 200 a 600 metros, los lavaderos y molinos en áreas distanciadas entre 600 y 1200 metros.

Al observar los resultados se observa una escasa dispersión, los elementos se concentran en grupos similares situados en cada una de las distancias estipuladas, aunque en grandes rasgos se aprecian dos tendencias claras, elementos situados en las proximidades del cauce y otro grupo alejado a más de dos kilómetros de los cauces.

*Figura 13. Gráfico de correspondencias resultante del análisis estadístico de la variable distancia a cauces de agua*




| Elemento Patrimonio | Identificador | Clase ambiental | Identificador |
|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | Hasta 200 metros | A |
| Albercas y Estanques | 2 | | |
| Almenaras | 3 | | |
| Abrevaderos | 4 | De 200 a 600 metros | B |
| Balsas y Charcas | 5 | | |
| Batanes | 6 | | |
| Depósitos | 7 | De 600 a 1.200 metros | C |
| Lavaderos | 8 | | |
| Manantiales y Fuentes | 9 | | |
| Molinos | 10 | De 1.200 a 2.000 metros | D |
| Norias | 11 | | |
| Pozos | 12 | | |
| Presas | 13 | Más de 2.000 metros | E |
| Puentes | 14 | | |
| Sifones | 15 | | |

## 7.2. ANÁLISIS ESPACIAL

### 7.2.1. ZONIFICACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MADRID EN BASE A LAS VARIABLES AMBIENTALES ESTUDIADAS

Con motivo de establecer la caracterización del territorio madrileño en base a las variables ambientales estudiadas se han obtenido una serie de mapas temáticos que identifican las áreas de la Comunidad de Madrid correspondientes a las clases en la que se divide cada una de las variables citadas. Entre los mapas elaborados se encuentran los asociados a variables tales como altitud, pendiente, temperatura, precipitaciones, usos y potencial agrológico del suelo (Figura 14) (Anexo 2).

Al finalizar la elaboración de los mismos, los mapas de precipitaciones, temperatura, potencial agrologico y altitud se cruzaron entre sí para poder obtener una visión de distribución de dichas variables en la Comunidad de Madrid, obteniendo un mapa resultante de unidades ambientales que así lo denota (Figura 14.A) (Anexo 2). Estos cruces reflejan tres franjas de caracterización en sentido NO-SE, las cuales dividirán la aparición de elementos de Patrimonio Histórico del Agua en base a dichas condiciones.

A la caracterización de unidades ambientales se le pueden agregar más variables que aumentarían la resolución de áreas con características singulares, aunque el mapa desarrollado resulta interesante como inicio de estas clasificaciones.

*Figura 14. Mapa de unidades ambientales en la Comunidad de Madrid (A) y mapas temáticos resultantes del procesado de las variables ambientales analizadas (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico)*

A

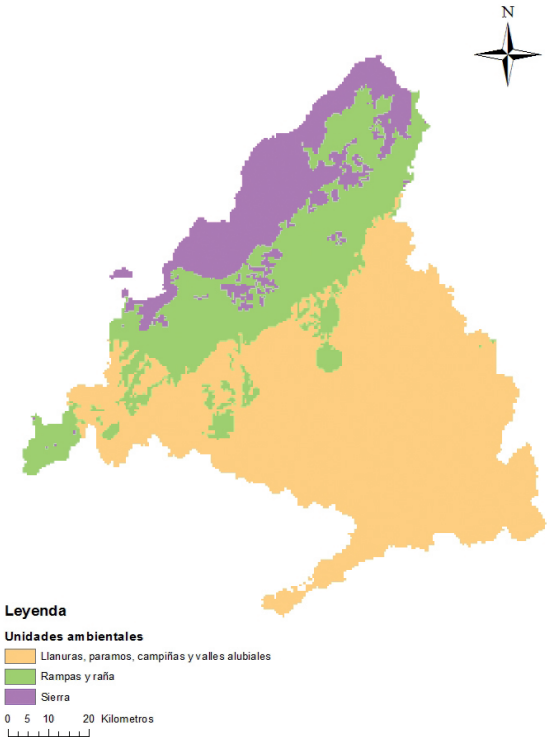
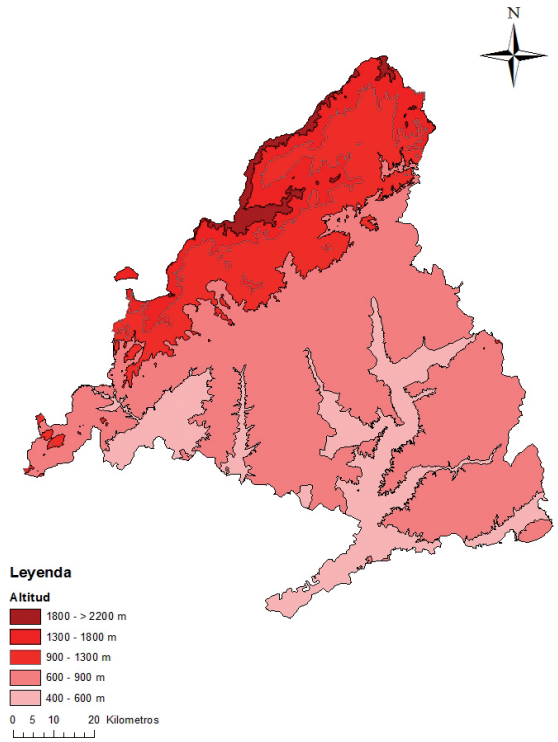
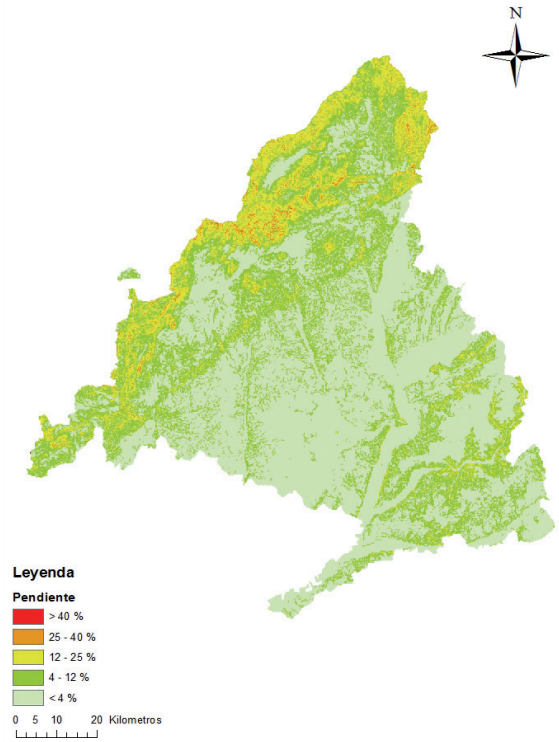


*Figura 14 (continuación). Mapa de unidades ambientales en la Comunidad de Madrid (A) y mapas temáticos resultantes del procesado de las variables ambientales analizadas (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico)*

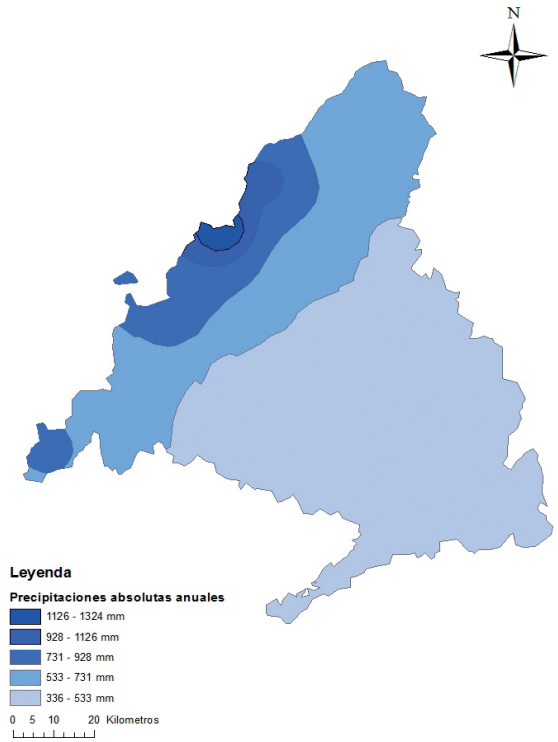
B




C




D




E

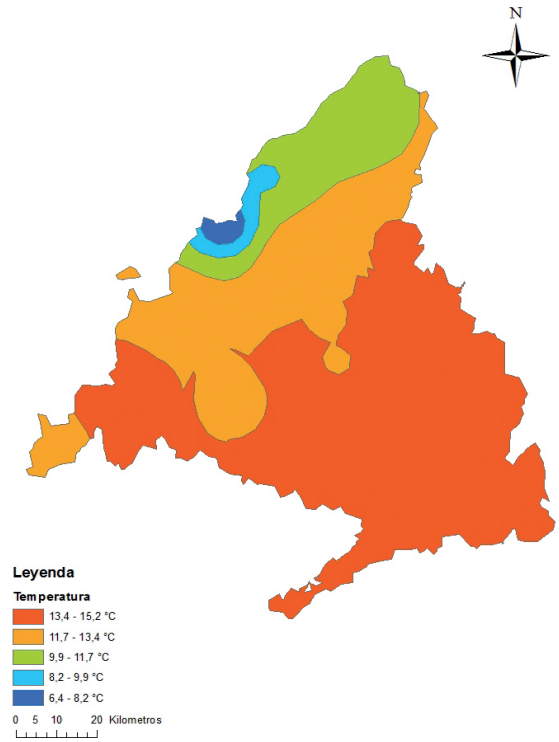
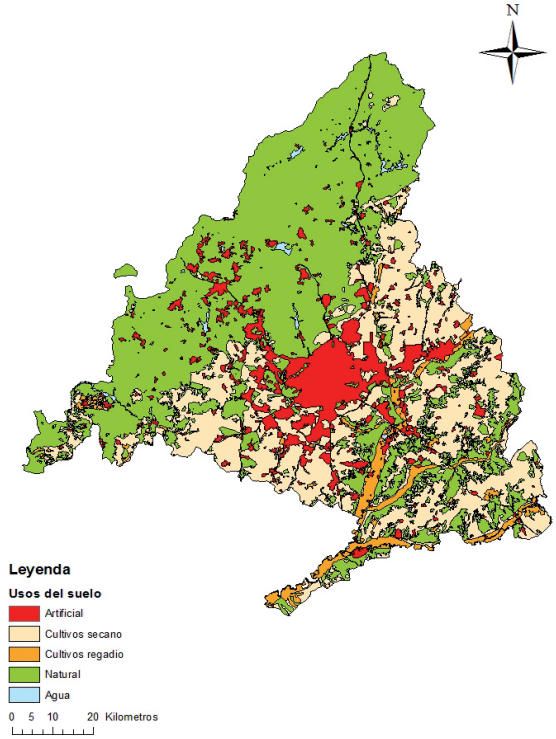
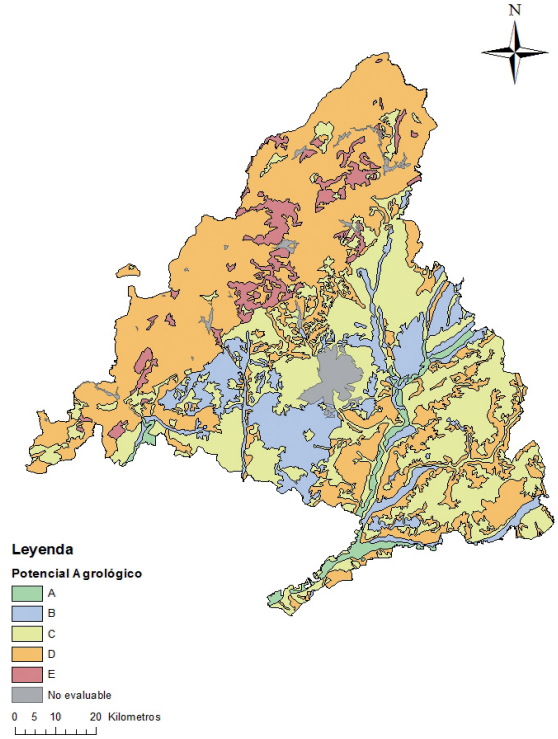


*Figura 14 (continuación). Mapa de unidades ambientales en la Comunidad de Madrid (A) y mapas temáticos resultantes del procesado de las variables ambientales analizadas (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico)*

F




G




### 7.2.2. ANÁLISIS DE DENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PATRIMONIO HISTÓRICO DEL AGUA

Según la densidad de elementos del patrimonio hidráulico del agua en la Comunidad de Madrid (Figura 15) (Anexo 3), se pueden observar como las mayores abundancias de estos son apreciables al sur de la región madrileña, fundamentalmente en las inmediaciones de los ríos Tajo y Manzanares, en la ciudad de Madrid al centro de la región, al este en las cercanías de los ríos Henares y Tajuña y al oeste en los márgenes del Alberche.

A la vista de los mapas de densidad obtenidos y los datos aportados para su desarrollo, se puede interpretar que en las áreas con mayor abundancia de elementos del patrimonio histórico del agua se reúnen una serie de condiciones ambientales concretas:

- Altitudes entre los 600 y 900 metros (55% del área de alta densidad).
- Pendientes menores del 4% (64% del área de alta densidad).
- Potencial C (suelos con limitaciones de cierta entidad) (37% del área de alta densidad).
- Temperaturas superiores a 13 °C (82% del área de alta densidad).
- Precipitaciones entre 336 y 533 mm anuales (73% del área de alta densidad).
- Uso natural del suelo (42% del área de alta densidad).

Para otorgar una visión más gráfica de la distribución de los elementos del patrimonio histórico del agua en la Comunidad de Madrid, se han obtenido una serie de gráficas (Figura 16) donde se aprecia la distribución de elementos en todo el territorio en base a las clases de cada variable ambiental estudiada; interpretando la misma idea que en el caso de los mapas de densidad.

*Figura 15. Mapa de densidad de elementos del Patrimonio Cultural del Agua en la Comunidad de Madrid (A) y mapas de áreas de alta densidad representadas por las clases ambientales correspondientes (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico)*

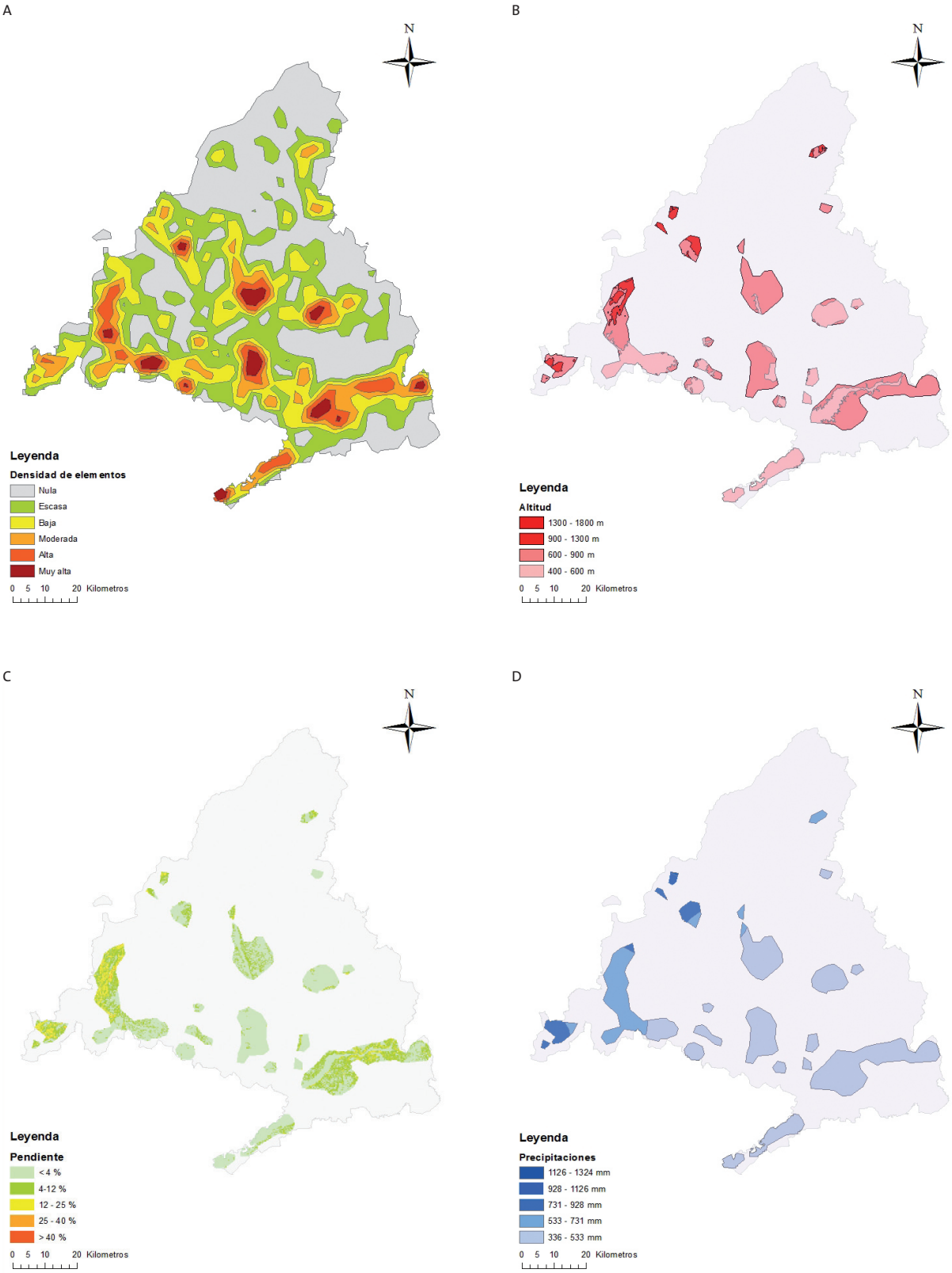
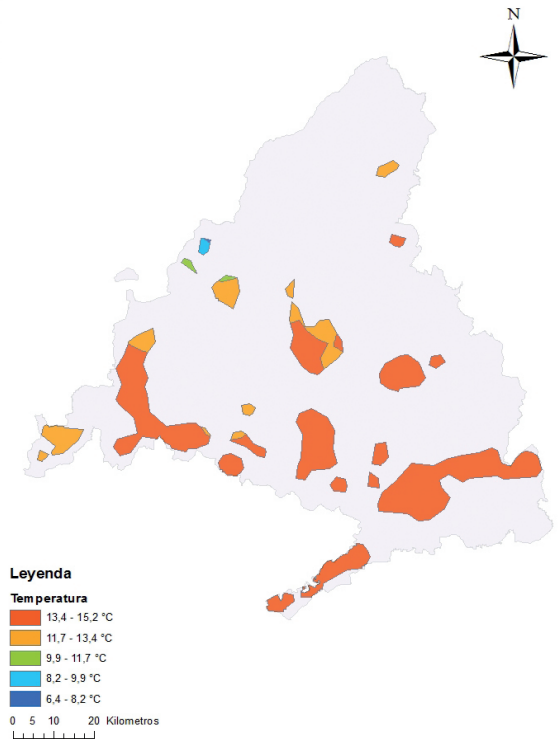
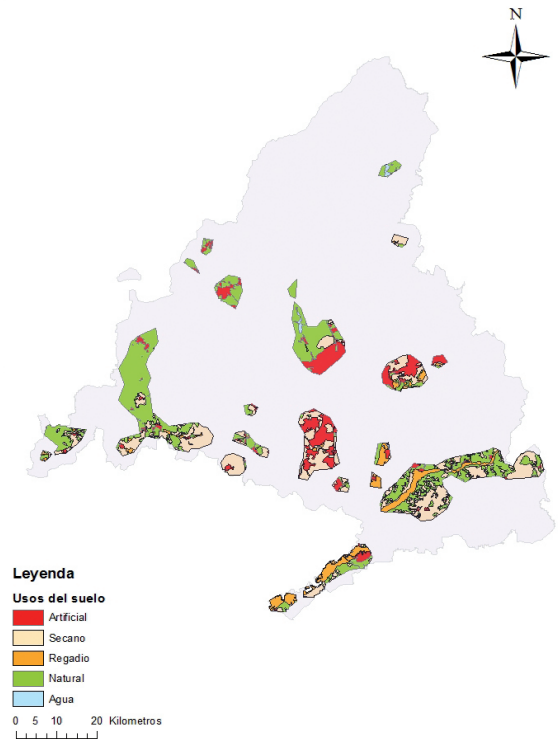


*Figura 15 (continuación). Mapa de densidad de elementos del Patrimonio Cultural del Agua en la Comunidad de Madrid (A) y mapas de áreas de alta densidad representadas por las clases ambientales correspondientes (B – Altitud, C – Pendientes, D – Precipitaciones, E – Temperatura, F – Usos del Suelo, G – Potencial Agrologico)*

E




F




G

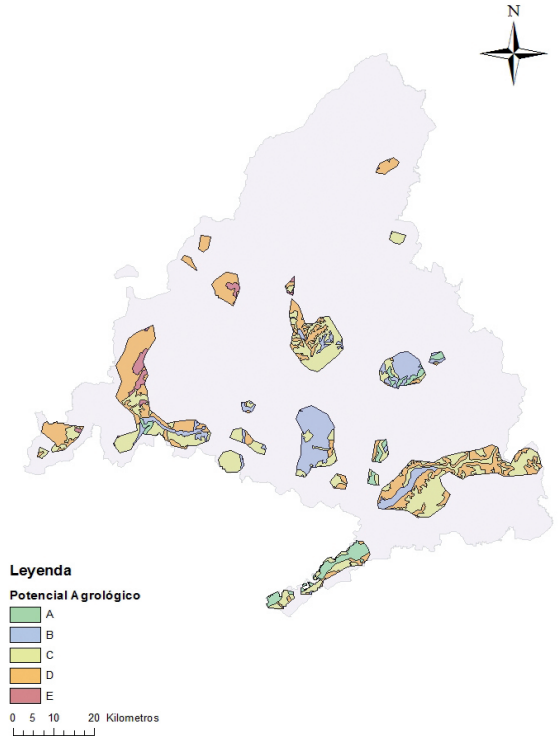
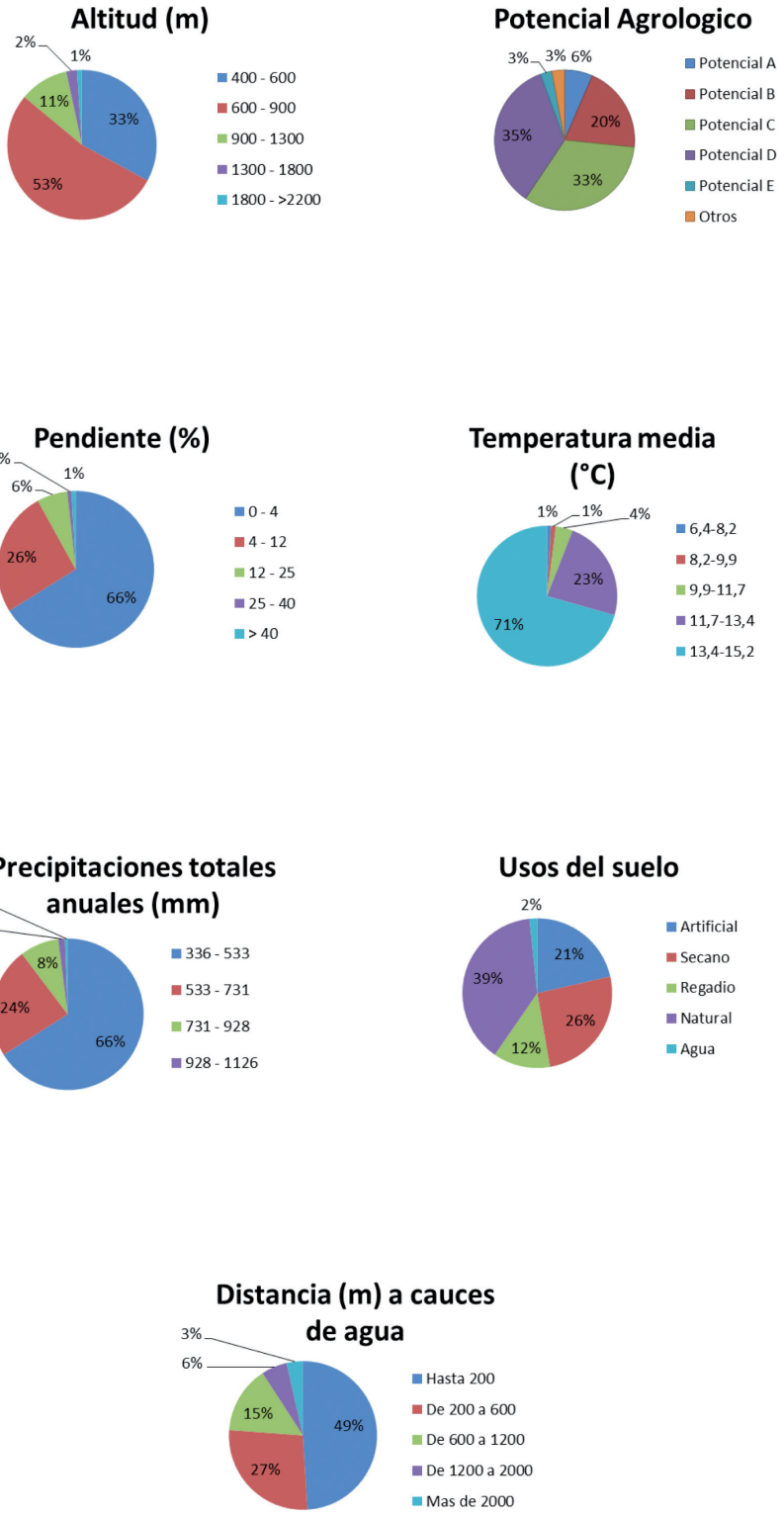


*Figura 16. Graficas de abundancia de elementos según cada variable ambiental.*



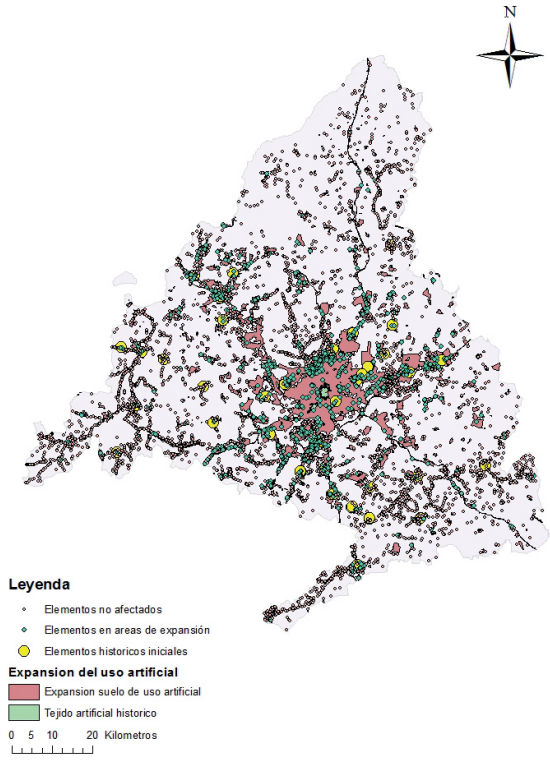
### 7.2.3. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DEL SUELO ARTIFICIAL EN LA COMUNIDAD DE MADRID

Observando la representación de la evolución del uso del suelo artificial (Figura 17) destaca el crecimiento tan alto de los usos urbanos, industriales, comerciales e infraestructuras en la Comunidad. La superficie total inicial del uso artificial histórico era de 3.237 ha, mientras que la correspondiente a la expansión (resta del área total de suelo artificial y el uso artificial histórico) alcanza 92.549 ha.

Si se compara con estudios recientes, puede deducirse que el proceso de artificialización del suelo ha seguido una tendencia constante durante los últimos 100 años pues, de acuerdo con (Gallardo y Martínez-Vega, 2012), en la Comunidad de Madrid en algo más de dos décadas las áreas artificiales del suelo han ganado 56.508 ha (7% del área total de la comunidad), por lo que habría que considerar que en, aproximadamente, los dos primeros tercios del siglo XX se contabilizaría una extensión similar. El uso del suelo que más ha decrecido en el pasado más reciente ha sido el agrario; prácticamente 70.000 ha anteriormente destinadas a este tipo de uso del suelo han sido reconvertidas fundamentalmente a entornos de uso artificial (Gallardo y Martínez-Vega, 2012).

Al asociar los puntos a las áreas del mapa obtenemos 3 distribuciones de los elementos de patrimonio histórico diferentes en la Comunidad de Madrid, los puntos situados en las áreas de suelo artificial histórico (1%), expansión uso artificial (19%) y áreas con otros usos (79%).

*Figura 17. Ubicación de elementos del Patrimonio Histórico del Agua y expansión del suelo artificial*




*Fuente: Elaboración propia.*

## 8. CONCLUSIONES

Los elementos del patrimonio hidráulico del agua están estrechamente relacionados con las condiciones ambientales que les rodean. Generalmente estos se ubican en los grandes ejes formados por los ríos principales de la Comunidad de Madrid donde en la antigüedad se situaban las áreas más importantes del cultivo de regadío de la región.

A la vista de los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado se pueden atribuir correspondencias entre clases de variables ambientales y la tipología de cada elemento patrimonial. Estas tendencias se hacen muy evidentes con las variables topográficas y climatológicas donde se muestran claras correlaciones hacia clases ambientales concretas. En el caso del potencial agrológico y la distancia a los cauces de agua, la dispersión no ofrece una tendencia clara.

El crecimiento desmesurado desde la segunda mitad del siglo XX en la Comunidad de Madrid ha propiciado que muchos de los elementos del patrimonio histórico del agua hayan sido absorbidos por el entramado urbano de expansión, con su más que posible desaparición, mientras que otros aún se conservan ya que se encuentran en cascos antiguos de municipios como representación histórica de los mismos o se mantienen en entornos naturales donde pueden aun ser empleados en labores del regadío o encontrarse abandonados.

Al igual que se ha aplicado esta metodología de análisis hacia elementos de esta tipología en la cartografía histórica madrileña, se permite la posibilidad futura al empleo de estas técnicas a otro formato de datos de entrada cartografiados en las planimetrías como líneas (ríos, acequias, canales) o áreas (cultivos de regadío, cultivos de secano, pastizales) que podrán ser desarrollados en un futuro hacia la consecución de objetivos similares a los planteados en este documento.

El estudio del patrimonio histórico del agua está ligado a importantes valores de la sociedad cuya consideración está ligada a su gestión dentro de un territorio. Su valoración va más allá de la consideración de su conservación. Se ha de potenciar la realización de estudios similares al desarrollado para aumentar el conocimiento científico y reconocimiento social de los elementos del patrimonio con el fin de gestionar y valorar los mismos y sostener en el tiempo el aporte cultural que aportan.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

AEMET. 2013. Atlas bioclimático Ibérico. Departamento de Producción de la Agencia Estatal de Meteorología de España (Área de Climatología y Aplicaciones Operativas) y por el Departamento de Meteorología e Clima, Instituto de Meteorología de Portugal (Divisão de Observação Meteorológica e Clima).

Agencia Ambiental Europea. 1995. Manual Corine Land Cover [en línea]. Publicaciones Corine Land Cover <http://www.eea.europa.eu/publications/CORo-landcover> [2014].

Benzécri, J.P., Benzécri, F. 1973. L'analyse des Correspondances. Exposé Elementarire. Paris: Dunod.

Bestué, I., González, I. 2006. Breve guía del patrimonio hidráulico de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2011. El medio ambiente en la Comunidad de Madrid. Dirección General de Promoción y Disciplina Ambiental, Madrid.

de Bustamante, I., Iglesias, J.A., López-Camacho, B. 2008. Los viajes de agua en la Cuenca de Madrid. Las galerías drenantes en España: análisis y selección de qanat(s). Gestión tradicional del agua, patrimonio cultural y sostenibilidad, (2), 145-166.

Durón, W., Reyes, L., Villatoro, J.J. 2007. Comparación de fertilizantes orgánicos en el cultivo de noni (Morinda citrifolia.L) hasta la etapa de floración. Tesis de ingeniería agrológica. Universidad de Oriente, San Miguel, El Salvador.

Fischer, R.A. 1983. Proceedings of a Symposium on potential productivity of field crops under different environments. International Rice Research Institute, 130-154, 23-26 de septiembre de 1980, Los Banos, Philippines.

Gallardo, M., Martínez-Vega, J. 2012. Cambios de usos del suelo en la Comunidad de Madrid: analizando el pasado y simulando el futuro. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, 19-21 de septiembre de 2012, Madrid.

García, J.A., Cebrián, F. 2006. La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: Aplicación a la provincia de Albacete. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Cartográfica, 19-22 de septiembre de 2006, Granada.

Hermosilla, J., Iranzo, E. 2010. El patrimonio industrial, el legado material de la historia económica. AREAS Revista internacional de Ciencias Sociales, (29), 73-89.

Hermosilla, J., Peña, M. 2013. La arquitectura hidráulica de los regadíos históricos valencianos. Claves territoriales y tipológicas en torno a sus elementos, redes y sistemas. Biblio 3W, revista bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, 18(1024).

IGME. 1992. Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid.

Joaristi, L., Lizasoain, L. 2000. Análisis de Correspondencias. Cuadernos de estadística, (5), Madrid: La Muralla-Hespérides.

Lugo, H.J.I. 1988. Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Mata R, Fernández S. 2010. Paisajes y patrimonios culturales del agua. La salvaguarda del valor patrimonial de los regadíos tradicionales. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, 3 (337).

Monturiol, F., Alcalá del Olmo, L. 1990. Memoria del Mapa de Asociaciones de suelos de la Comunidad de Madrid. Consejo Superior de Investigaciones Científicas – CSIC.

Navarro, M.L. 1983. Aspectos teóricos y una aplicación práctica del análisis factorial de correspondencias. Estadística Española, (99), 33-59.

Organización Meteorológica Mundial. 2012. Glosario Internacional de Hidrología de la Unesco y la OMM. Publicaciones de la OMM, (385).

Paradis, E. 2002. R para principiantes. Institut des Sciences de l´Evolution. Universit Montpellier II.

Payano, R. 2011. Análisis conceptual de los paisajes culturales y el patrimonio del agua para la toma de decisión ciudadana. Revista América Patrimonio. Patrimonio y Participación Ciudadana, (1).

Pedraza, G.J. 1996. Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones. Madrid: Rueda.

Prados, M.J., Vahí, A. 2011. El diseño de itinerarios turísticos para la puesta en valor del patrimonio territorial. Las acequias de Careo en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Cuadernos de Turismo, (27), 785-809.

Real Academia Española. 2001. Diccionario de la lengua española (22.a ed.) [en línea] <http://www.rae.es/rae.htm> [2014].

Ribas, A. 2007. Los paisajes del agua como paisajes culturales. Conceptos, métodos y experiencias prácticas para su interpretación y valorización. Naturaleza y cultura en la creación y valorización de los paisajes del agua. VII Coloquio Ibérico sobre Planificación y Gestión del Agua, 4-8 de diciembre de 2006, Faro.

Rodriguez, L. 2014. Construcción de Kernels y funciones de densidad de probabilidad [en línea]. M.Sc., Departamento de Matemáticas, ESPOL <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/25019/1/construccion_de_kernels_y_funciones_de_densidad_de_probabilidad.pdf> [2014].

Salvador, M. 2003. Análisis de Correspondencias, [en línea] 5campus.com, Estadística <http://www.5campus.com/leccion/correspondencias> [2014].

Serrano, J., Antequera, M. 2011. Los molinos y otros artefactos hidráulicos en la ribera del Júcar. Una aproximación desde la Geografía. Los regadíos tradicionales del alto Mijares. Confederación Hidrográfica del Júcar y Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

UNESCO. 1972. Convención sobre la protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural. 17 de octubre al 21 de noviembre de 1972, Paris.

# 10. ANEXOS

## 10.1. ANEXO I. TABLAS DE CONTINGENCIA

*Tabla 6. Altitud (m)*

| | 400-600 | 600-900 | 900-1300 | 1300-1800 | 1800- >2200 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Albercas y Estanques | 70 | 46 | 1 | 0 | 0 |
| Almenaras | 0 | 17 | 2 | 0 | 0 |
| Abrevaderos | 3 | 14 | 6 | 2 | 0 |
| Balsas y Charcas | 9 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| Batanes | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Depósitos | 70 | 61 | 17 | 2 | 0 |
| Lavaderos | 2 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| Manantiales y Fuentes | 55 | 417 | 110 | 57 | 13 |
| Molinos | 43 | 52 | 67 | 12 | 0 |
| Norias | 373 | 409 | 4 | 0 | 0 |
| Pozos | 244 | 416 | 4 | 0 | 4 |
| Presas | 37 | 24 | 10 | 4 | 0 |
| Puentes | 948 | 1502 | 379 | 54 | 1 |
| Sifones | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 |

*Tabla 7. Pendiente (%)*

| | 0-4 | 4-12 | 12-25 | 25-40 | > 40 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Albercas y Estanques | 96 | 18 | 3 | 0 | 0 |
| Almenaras | 4 | 9 | 6 | 0 | 0 |
| Abrevaderos | 12 | 10 | 3 | 0 | 0 |
| Balsas y Charcas | 19 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| Batanes | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Depósitos | 110 | 38 | 2 | 0 | 0 |
| Lavaderos | 12 | 12 | 3 | 0 | 0 |
| Manantiales y Fuentes | 279 | 275 | 88 | 10 | 0 |
| Molinos | 98 | 51 | 22 | 3 | 0 |
| Norias | 738 | 45 | 3 | 0 | 0 |
| Pozos | 552 | 102 | 14 | 0 | 0 |
| Presas y Pontones | 44 | 23 | 7 | 1 | 0 |
| Puentes | 1795 | 879 | 208 | 2 | 0 |
| Sifones | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 |

*Tabla 8. Potencial agrológico*

| | Potencial A | Potencial B | Potencial C | Potencial D | Potencial E | Otros |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| Albercas y Estanques | 5 | 42 | 47 | 15 | 1 | 7 |
| Almenaras | 0 | 0 | 6 | 10 | 3 | 0 |
| Abrevaderos | 0 | 0 | 7 | 16 | 2 | 0 |
| Balsas y Charcas | 2 | 5 | 11 | 3 | 1 | 1 |
| Batanes | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| Depósitos | 9 | 35 | 56 | 36 | 10 | 4 |
| Lavaderos | 0 | 2 | 15 | 8 | 0 | 2 |
| Manantiales y Fuentes | 7 | 43 | 209 | 343 | 41 | 9 |
| Molinos | 7 | 25 | 39 | 89 | 9 | 5 |
| Norias | 114 | 397 | 234 | 33 | 1 | 7 |
| Pozos | 41 | 132 | 325 | 155 | 9 | 6 |
| Presas | 2 | 22 | 22 | 24 | 4 | 1 |
| Puentes | 175 | 422 | 867 | 1230 | 68 | 122 |
| Sifones | 5 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 |

*Tabla 9. Distancia (m) a cauces de agua*

| | Hasta 200 | De 200 a 600 | De 600 a 1200 | De 1200 a 2000 | Más de 2000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| Albercas y Estanques | 59 | 26 | 17 | 10 | 5 |
| Almenaras | 10 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| Abrevaderos | 10 | 6 | 7 | 2 | 0 |
| Balsas y Charcas | 15 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| Batanes | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Depósitos | 66 | 44 | 23 | 10 | 7 |
| Lavaderos | 11 | 6 | 7 | 2 | 1 |
| Manantiales y Fuentes | 337 | 180 | 100 | 20 | 15 |
| Molinos | 66 | 49 | 33 | 13 | 13 |
| Norias | 365 | 200 | 118 | 63 | 40 |
| Pozos | 309 | 187 | 111 | 41 | 20 |
| Presas | 31 | 17 | 11 | 9 | 7 |
| Puentes | 1467 | 796 | 388 | 143 | 90 |
| Sifones | 6 | 2 | 1 | 0 | 0 |

*Tabla 10. Precipitaciones totales anuales (mm)*

| | 336-582 | 532,8-60,9 | 60,9-77,3 | 77,3-93,8 | 93,8-110,3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Albercas y Estanques | 113 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| Almenaras | 5 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| Abrevaderos | 11 | 11 | 1 | 2 | 0 |
| Balsas y Charcas | 12 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| Batanes | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Depósitos | 117 | 8 | 23 | 2 | 0 |
| Lavaderos | 25 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Manantiales y Fuentes | 364 | 178 | 82 | 16 | 12 |
| Molinos | 62 | 85 | 16 | 11 | 0 |
| Norias | 727 | 58 | 1 | 0 | 0 |
| Pozos | 592 | 68 | 7 | 1 | 0 |
| Presas | 46 | 18 | 6 | 5 | 0 |
| Puentes | 1625 | 868 | 328 | 42 | 21 |
| Sifones | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 |

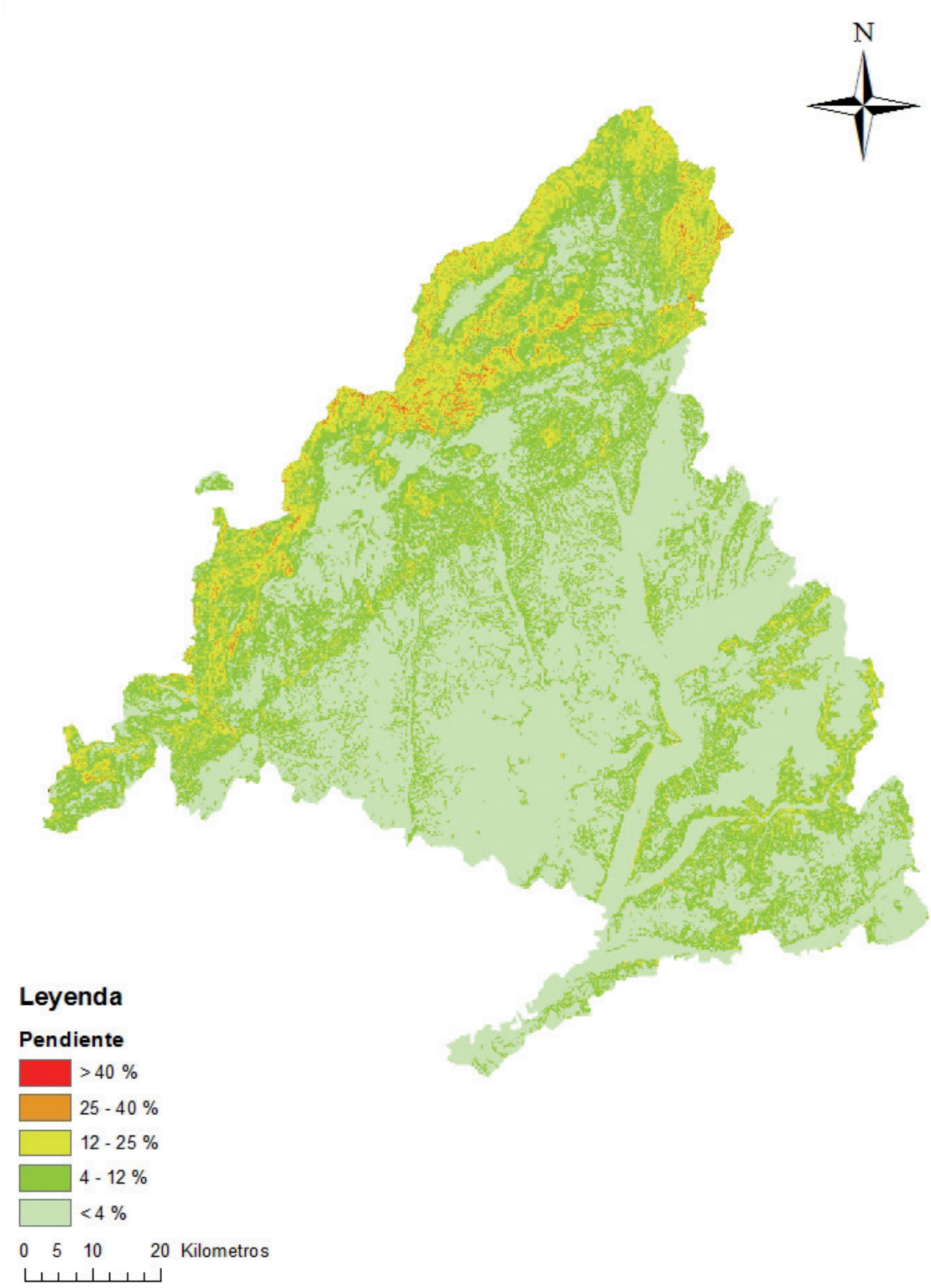
*Tabla 11. Temperatura media (°C)*

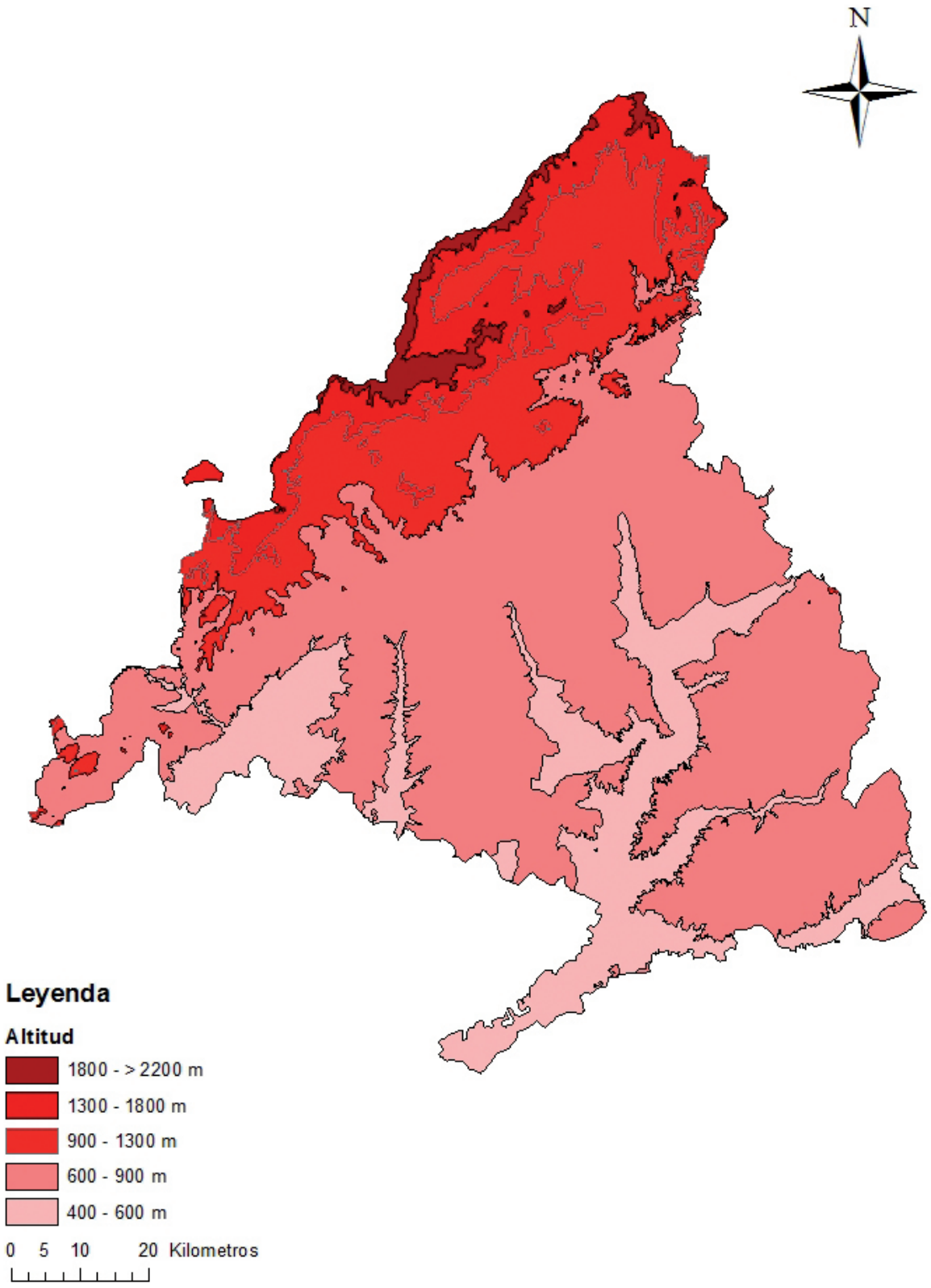
| | 6,4-8,2 | 8,2-9,9 | 9,9-11,7 | 11,7-13,4 | 13,4-15,2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 |
| Albercas y Estanques | 0 | 0 | 0 | 15 | 102 |
| Almenaras | 0 | 0 | 2 | 16 | 1 |
| Abrevaderos | 0 | 0 | 8 | 6 | 11 |
| Balsas y Charcas | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 |
| Batanes | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| Depósitos | 0 | 0 | 3 | 27 | 120 |
| Lavaderos | 0 | 0 | 0 | 4 | 23 |
| Manantiales y Fuentes | 12 | 13 | 67 | 177 | 383 |
| Molinos | 0 | 7 | 53 | 50 | 64 |
| Norias | 0 | 0 | 0 | 23 | 763 |
| Pozos | 0 | 1 | 1 | 27 | 639 |
| Presas | 0 | 3 | 8 | 21 | 43 |
| Puentes | 16 | 38 | 81 | 949 | 1800 |
| Sifones | 0 | 0 | 0 | 3 | 6 |

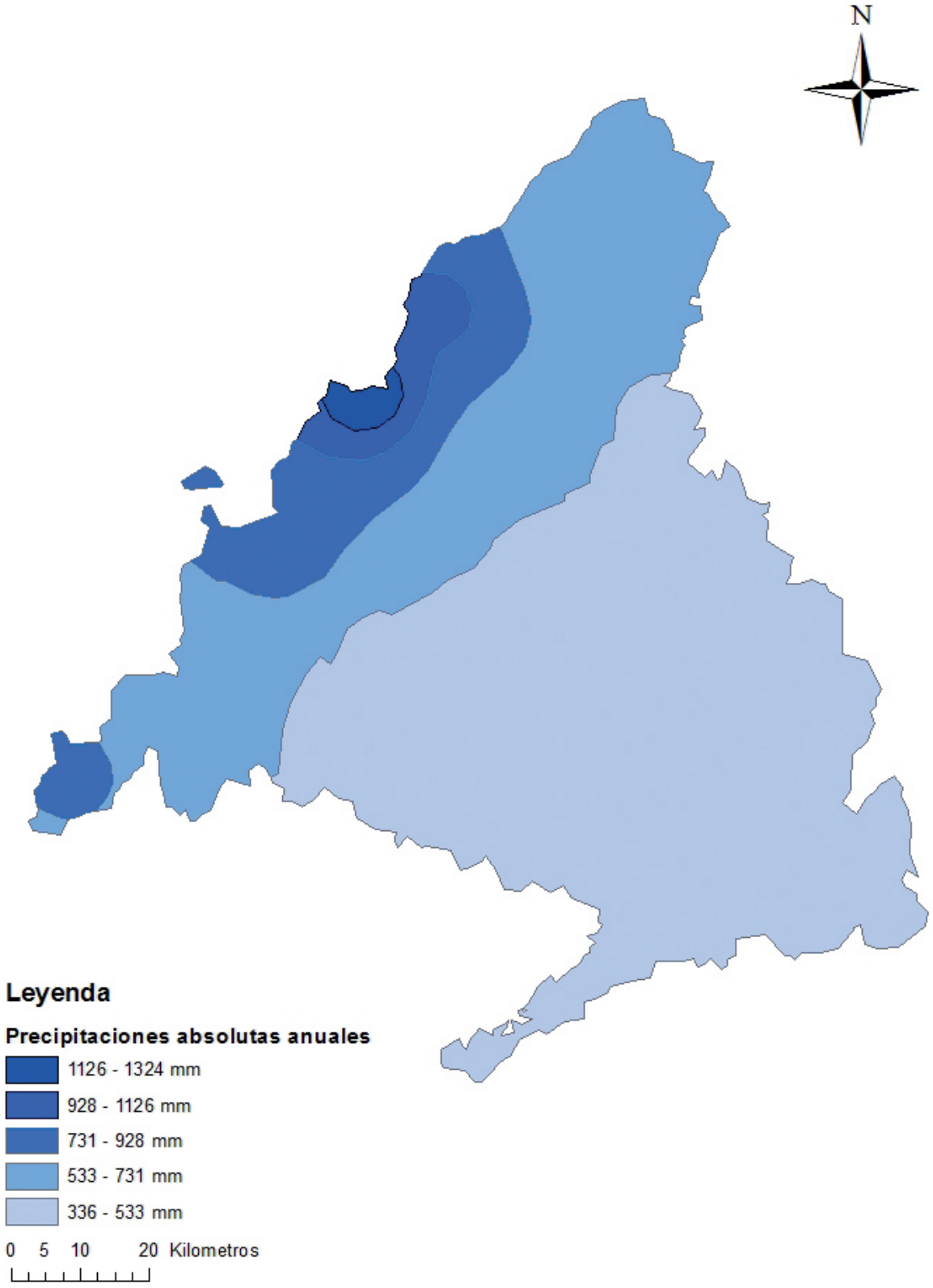
*Tabla 12. Usos del suelo*

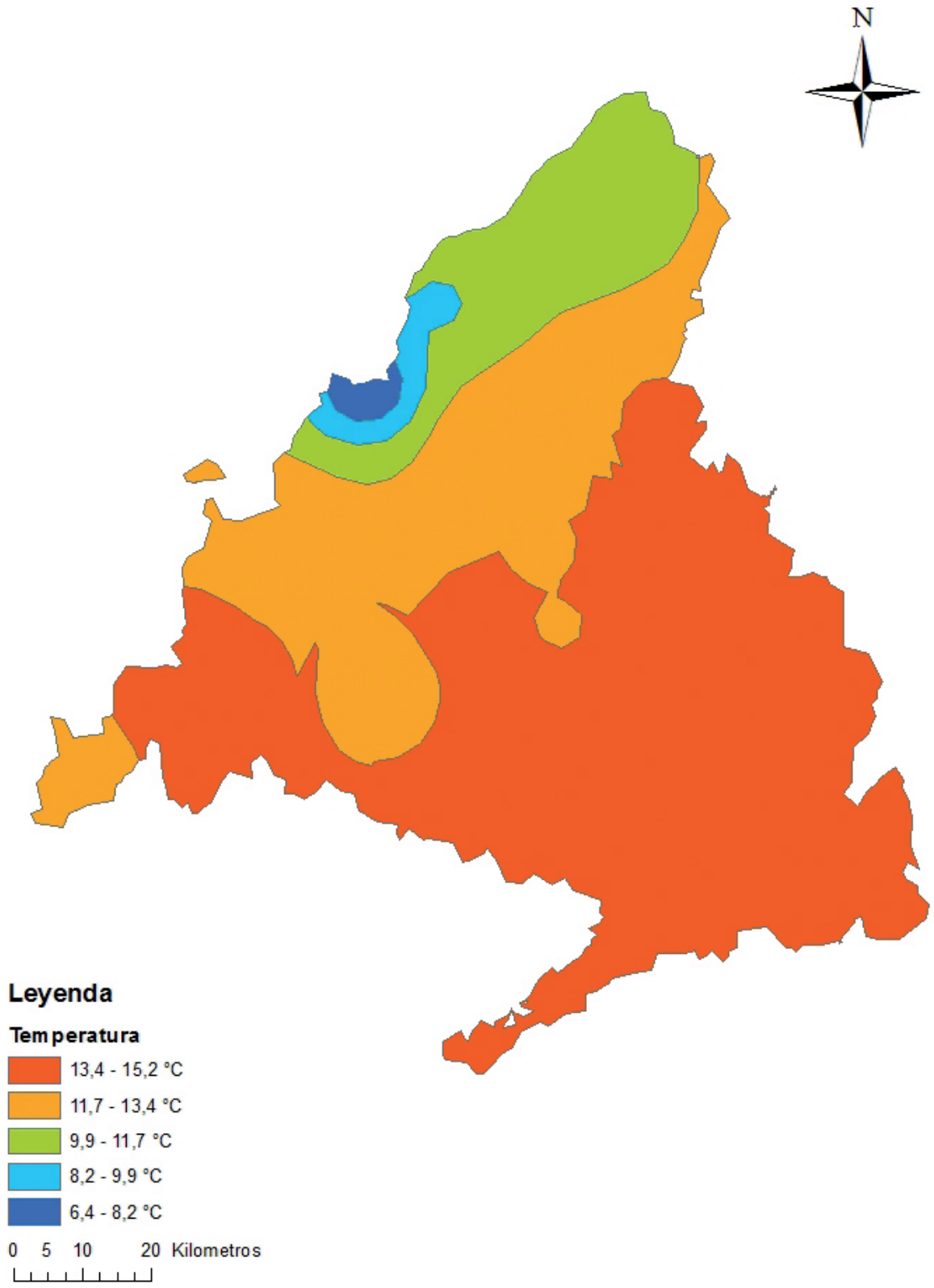
| | Artificial | Secano | Regadío | Natural | Agua |
|---|---|---|---|---|---|
| Acueductos | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| Albercas y Estanques | 44 | 39 | 9 | 24 | 1 |
| Almenaras | 0 | 1 | 0 | 18 | 0 |
| Abrevaderos | 6 | 5 | 1 | 13 | 0 |
| Balsas y Charcas | 7 | 4 | 5 | 7 | 0 |
| Batanes | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 |
| Depósitos | 35 | 56 | 15 | 42 | 2 |
| Lavaderos | 9 | 10 | 1 | 7 | 0 |
| Manantiales y Fuentes | 106 | 153 | 15 | 373 | 5 |
| Molinos | 22 | 12 | 37 | 96 | 7 |
| Norias | 282 | 283 | 166 | 39 | 16 |
| Pozos | 175 | 270 | 55 | 166 | 2 |
| Presas | 2 | 9 | 30 | 32 | 2 |
| Puentes | 515 | 609 | 351 | 1349 | 60 |
| Sifones | 0 | 1 | 5 | 3 | 0 |

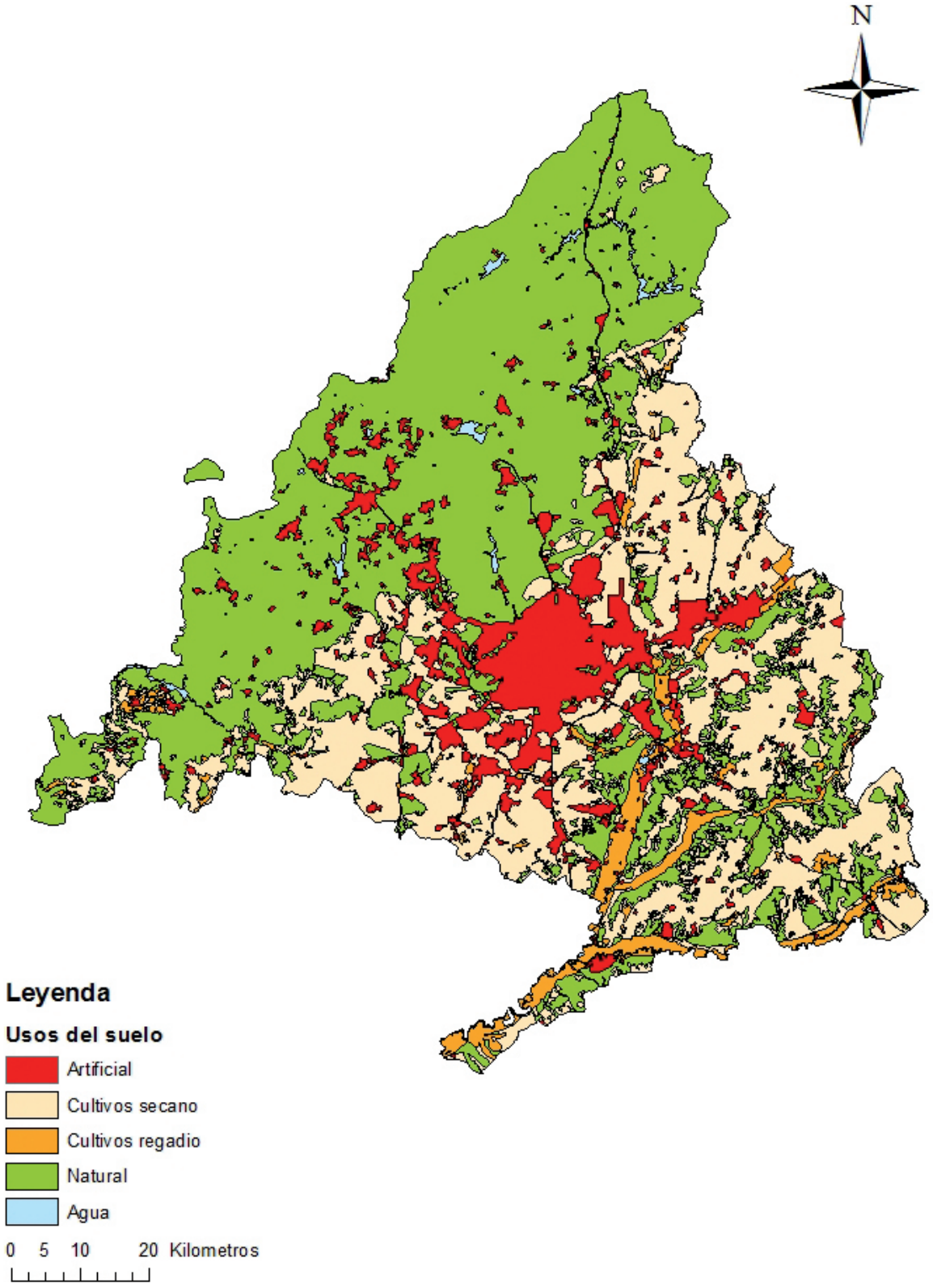
## 10.2. ANEXO II. MAPAS TEMÁTICOS COMUNIDAD DE MADRID

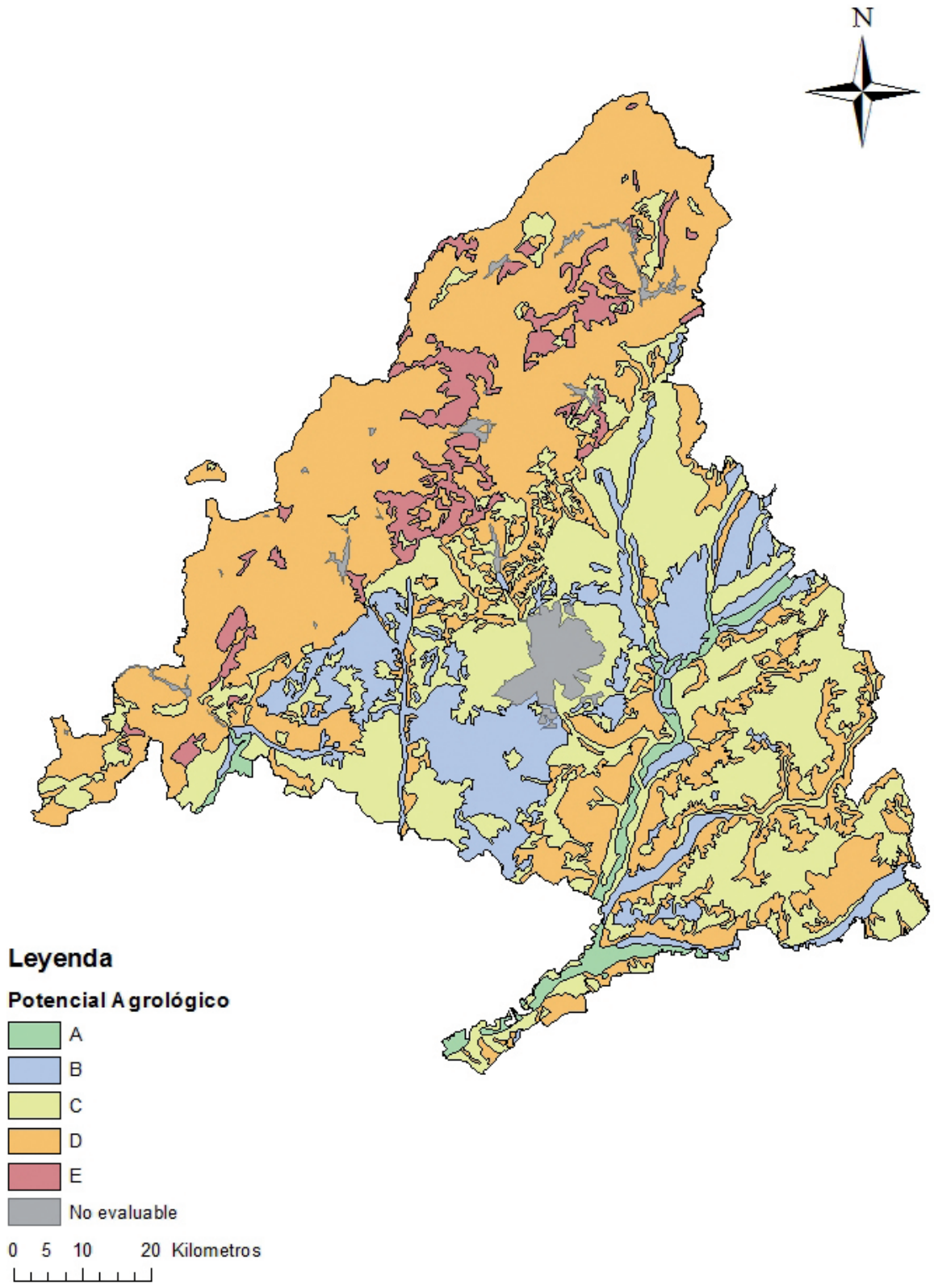


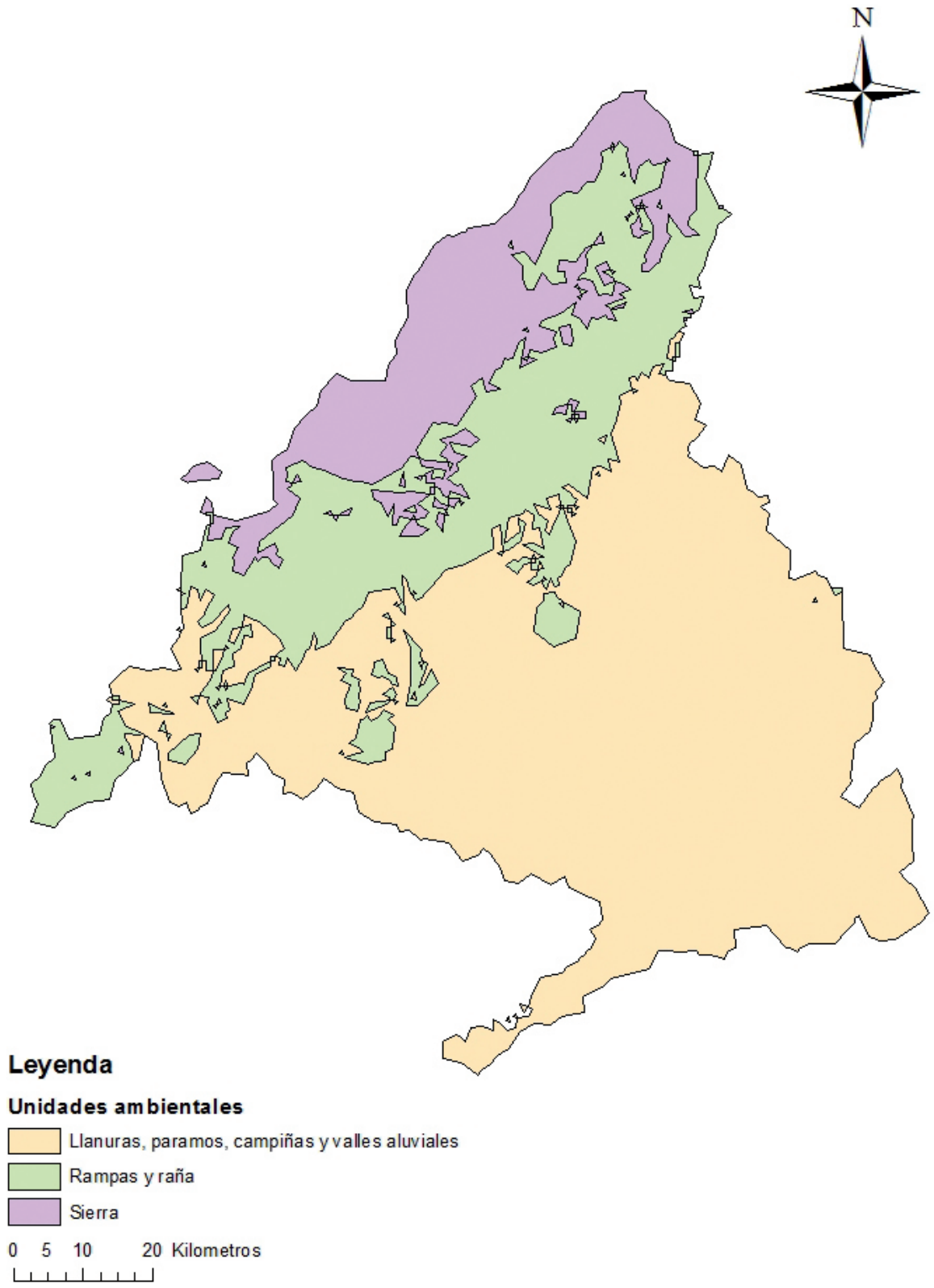

N
Leyenda
Altitud
1800 - > 2200 m
1300 - 1800 m
900 - 1300 m
600 - 900 m
400 - 600 m
0 5 10 20 Kilometros


N
Leyenda
Precipitaciones absolutas anuales
1126 - 1324 mm
928 - 1126 mm
731 - 928 mm
533 - 731 mm
336 - 533 mm
0 5 10 20 Kilometros

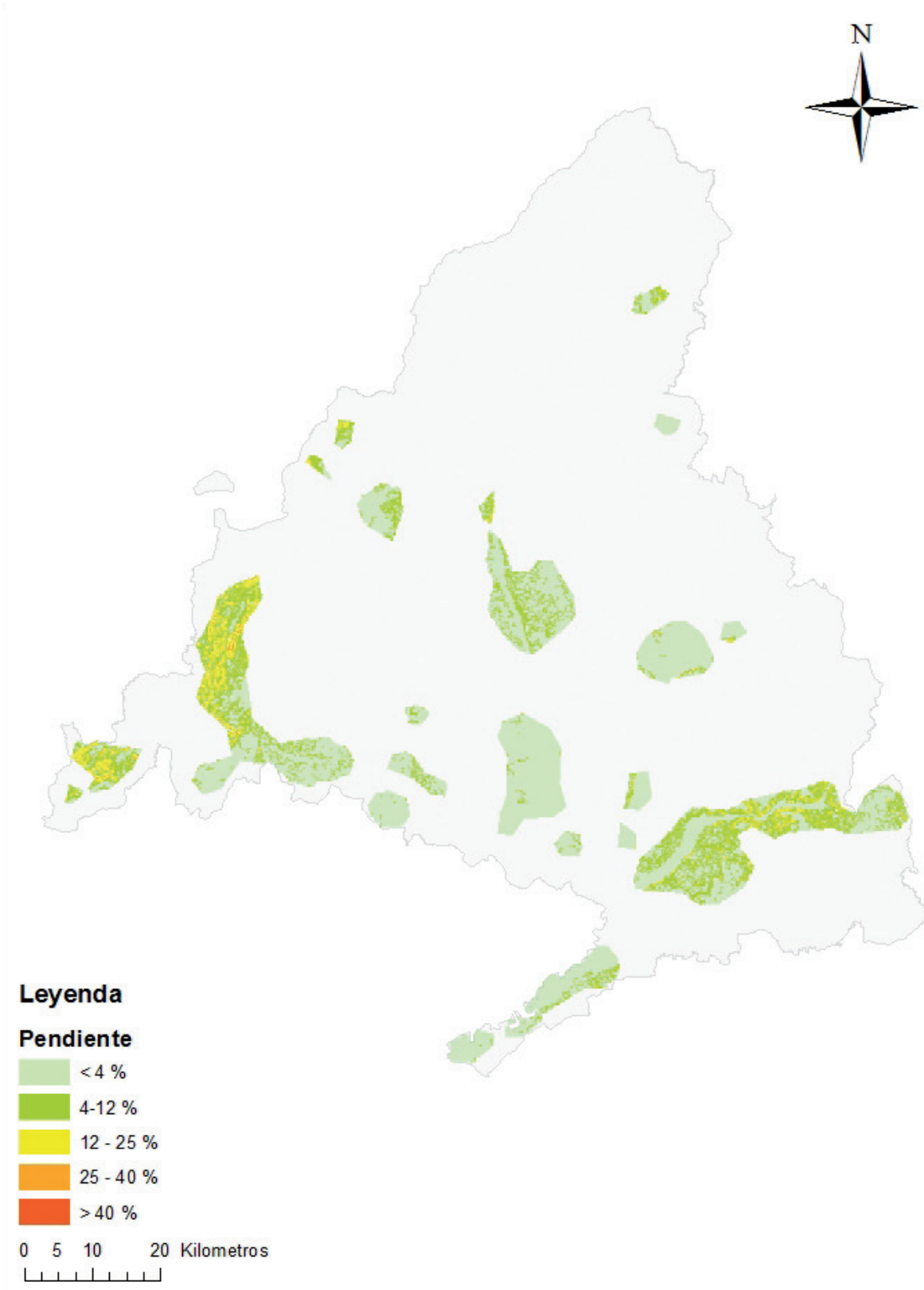

N
Leyenda
Temperatura
13,4 - 15,2 °C
11,7 - 13,4 °C
9,9 - 11,7 °C
8,2 - 9,9 °C
6,4 - 8,2 °C
0 5 10 20 Kilometros

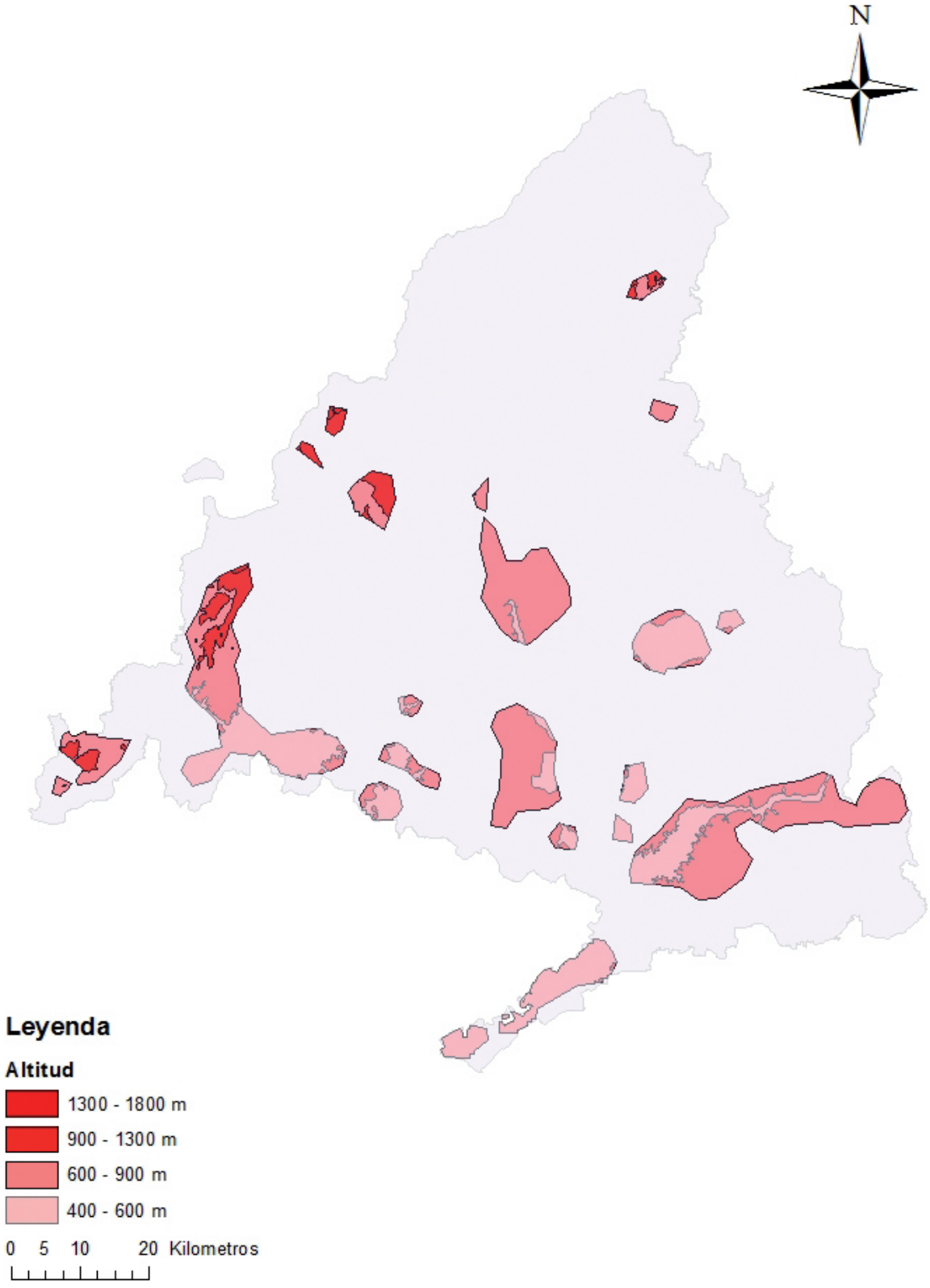

N
Leyenda
Usos del suelo
Artificial
Cultivos secano
Cultivos regadio
Natural
Agua
0 5 10 20 Kilometros

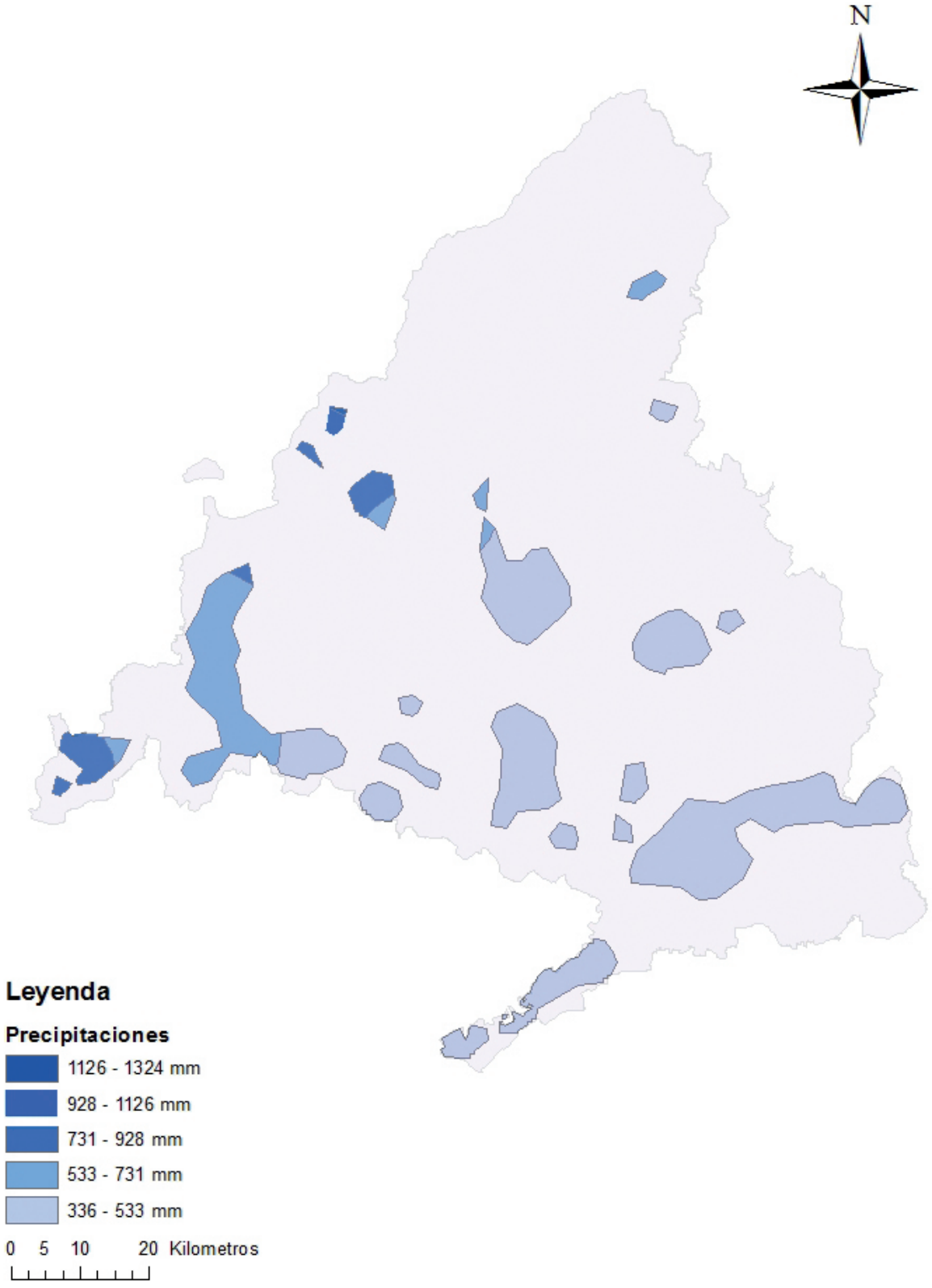

N
Leyenda
Potencial Agrológico
A
B
C
D
E
No evaluable
0 5 10 20 Kilometros

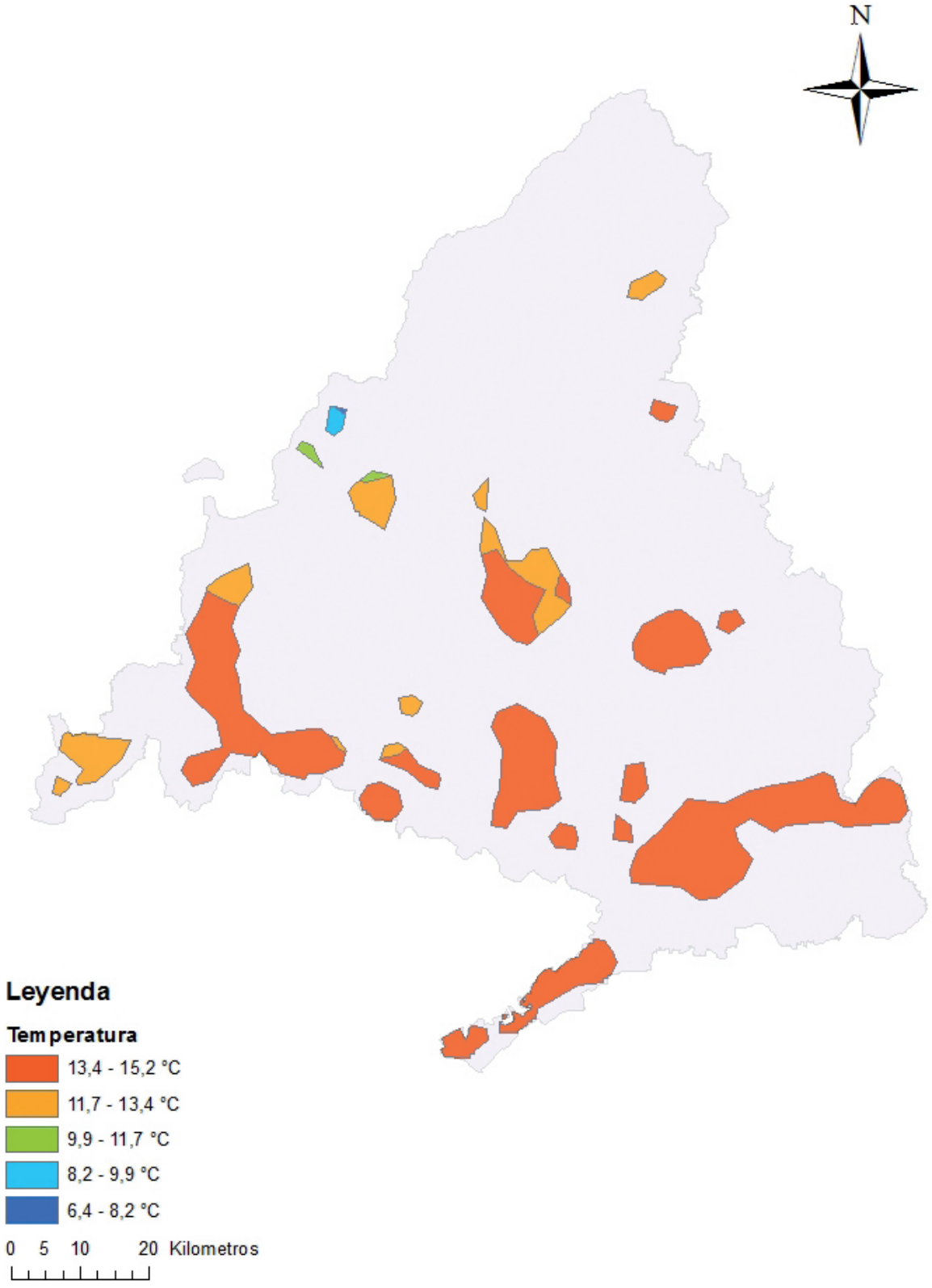

N
Leyenda
Unidades ambientales
Llanuras, paramos, campiñas y valles aluviales
Rampas y raña
Sierra
0 5 10 20 Kilometros

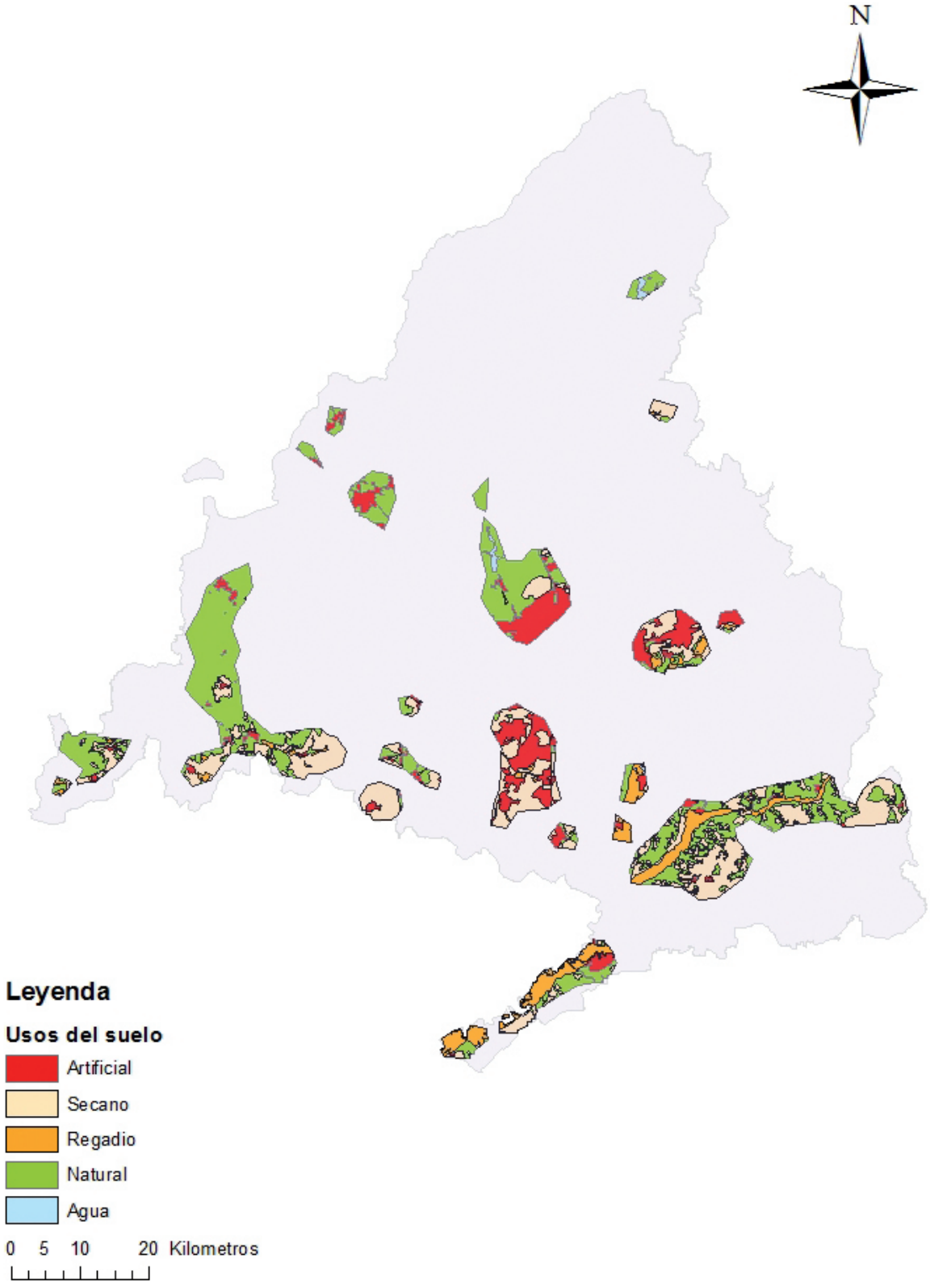
## 10.3. ANEXO III. MAPAS DE DENSIDAD

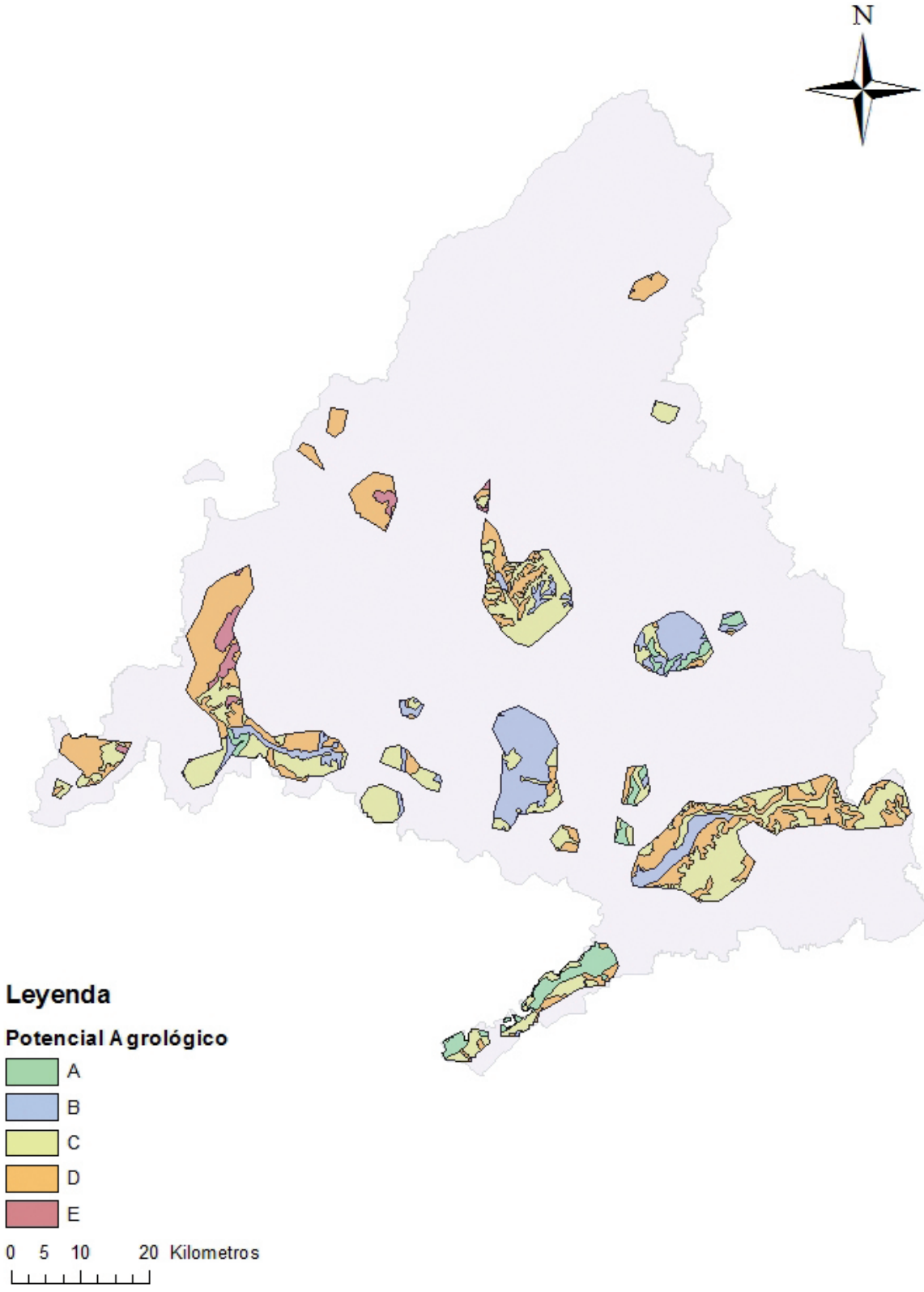


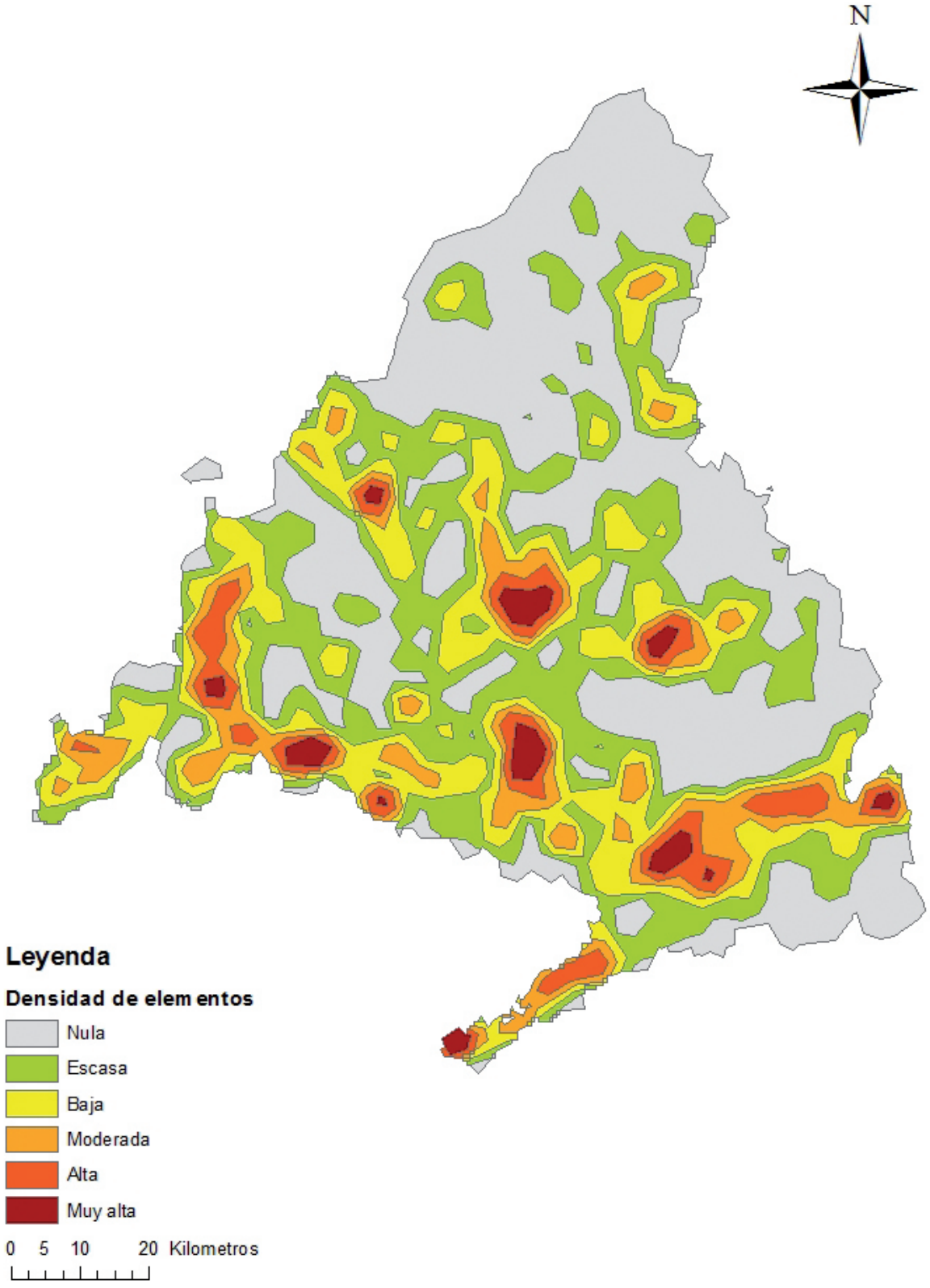

N
Leyenda
Altitud
1300 - 1800 m
900 - 1300 m
600 - 900 m
400 - 600 m
0 5 10 20 Kilometros


N
Leyenda
Precipitaciones
1126 - 1324 mm
928 - 1126 mm
731 - 928 mm
533 - 731 mm
336 - 533 mm
0 5 10 20 Kilometros


N
Leyenda
Temperatura
13,4 - 15,2 °C
11,7 - 13,4 °C
9,9 - 11,7 °C
8,2 - 9,9 °C
6,4 - 8,2 °C
0 5 10 20 Kilometros


N
Leyenda
Usos del suelo
Artificial
Secano
Regadio
Natural
Agua
0 5 10 20 Kilometros


N
Leyenda
Potencial Agrológico
A
B
C
D
E
0 5 10 20 Kilometros


N
Leyenda
Densidad de elementos
Nula
Escasa
Baja
Moderada
Alta
Muy alta
0 5 10 20 Kilometros

escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

**máster universitario**

en hidrología y gestión de recursos hídricos

**proyectos 2014**

# Aplicación de tecnologías electroquímicas para el tratamiento de suelos contaminados

autora

**Marta Paloma Guerrero Moreno**

director

**Dr. Tristano Bacchetti de Gregoris (IMDEA Agua)**

Alcalá de Henares, 10 de Junio de 2014

## AGRADECIMIENTOS

Al departamento de Ingeniería Química donde he realizado este proyecto, en especial al grupo de investigación Bioelectrogénesis.

A mi tutor, Tristano Bacchetti.

A Dña. Karina Boltes Espínola por tener la puerta siempre abierta e iluminarme en el manejo de las técnicas analíticas.

A mis compañeros de laboratorio, por estar siempre disponibles para responder dudas y quebraderos de cabeza, en especial, a José Rodrigo Quejigo por su ayuda incondicional y desinteresada.

A mis compañeros de promoción, por haber pasado tan buenos ratos junto a ellos, especialmente a Georgiana por compartir conmigo mis mañanas de laboratorio y haberse convertido en una amiga.

A mi familia y amigos por estar siempre ahí. Y, especialmente, a Julio, por aguantar mis malos ratos, contestando siempre con palabras de apoyo.

MUCHAS GRACIAS

## ÍNDICE

1. Resumen ..... 333
2. Introducción ..... 333
3. Metodología ..... 335
3.1. Localización del suelo ..... 335
3.2. Cálculo del contenido hídrico del suelo ..... 335
3.3. Columnas de Winogradsky ..... 335
3.4. Medio nutritivo ..... 335
3.5. Clorpirifós ..... 335
3.6. Control abiótico ..... 335
3.7. Planificación de los ensayos ..... 335
3.8. Producción de biogás. Cuantificación del metano. 336
3.8.1. Calibración del método ..... 336
3.8.2. Sacrificio de las columnas. Cuantificación del metano per se ..... 336
3.9. Eliminación del pesticida. Cuantificación del CPF y TCP ..... 337
3.9.1. Calibración del método ..... 337
3.9.2. Análisis de CPF y TCP con HPLC ..... 338
3.10. Porcentaje máximo de recuperación ..... 338
4. Resultados ..... 338
4.1. Cálculo del contenido hídrico del suelo ..... 338
4.2. Producción biogás. Cuantificación del metano ..... 338
4.3. Producción de gas ..... 339
4.4. Degradación del CPF ..... 339
5. Discusión ..... 340
5.1. Producción de biogás. Cuantificación del metano ..... 340
5.2. Producción de gas ..... 340
5.3. Eliminación del Clorpirifós y 2,3,5-Tricloro-2-pirinidol ..... 340
6. Conclusiones ..... 341
7. Bibliografía ..... 341
8. Apéndices ..... 343
8.1. Anejo 1 ..... 343
8.2. Anejo 2 ..... 344

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Características del CPF y TCP ..... 333
**Tabla 2.** Reactivos empleados en la preparación del medio nutritivo ..... 335
**Tabla 3.** Concentraciones de $CH_4$ en los volúmenes patrón para la determinación de larecta de calibrado ..... 336
**Tabla 4.** Concentraciones patrón para generar la recta de calibrado del HPLC ..... 337
**Tabla 5.** Resultados obtenidos para el cálculo del contenido hídrico del suelo ..... 338
**Tabla 6.** Porcentaje máximo de recuperación del CPF ..... 339

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Estructura del Clorpirifos ..... 333
**Figura 2.** Columna de Winogradsky ..... 334
**Figura 3.** Estructura del Clorpirifos ..... 335
**Figura 4.** Esquema de la planificación semanal de los ensayos ..... 336
**Figura 5.** Recta de calibrado del $CH_4$ ..... 336
**Figura 6.** Sistema desarrollado para el muestreo de $CH_4$ ..... 336
**Figura 7.** Filtrado con filtro Büchner ..... 337
**Figura 8.** Proceso de desorción del CPF ..... 337
**Figura 9.** Recta de calibrado del TCP ..... 337
**Figura 10.** Recta de calibrado del CPF ..... 337
**Figura 11.** Concentración de $CH_4$ en los ensayos con y sin grafito frente al tiempo ..... 338
**Figura 12.** Diagrama de barras: Concentración de CH: Concentración de $CH_4$ en los ensayos con y sin grafito frente al tiempo ..... 338
**Figura 13.** Concentración de $CH_4$ en controles abióticos ..... 339
**Figura 14.** Volumen total de gas en las columnas con y sin grafito frente al tiempo ..... 339
**Figura 15.** Concentración de CPF en los ensayos con sin grafito frente al tiempo ..... 339
**Figura 16.** Porcentaje de extracción de CPF en función del tiempo ..... 339
**Figura 17.** Principal ruta de degradación anaerobia del CPF ..... 340

## INDICE DE ABREVIATURAS

**ACN:** Acetonitrilo

**CPF:** Clorpirifos

**DBT:** Dibenzotiofeno

**DIET:** Direct Interspecies Electron Transfer

**GC-TCD:** Gas Chromatography - Thermal Conductivity Detector

**GUS:** Groundwater Ubiquity Score

**HPLC:** High Performance Liquid Chromatography

**Kow:** Coeficiente de reparto Octanol-Agua

**MCPA:** 2-metil-4-clorofenoxiacético ácido

**MCPB:** 4-(4-Cloro-2-metilfenoxi)ácido butanoico

**TCP:** 3,5,6-Tricloro-2-pirinidol

**USEPA:** United States Environmental Protection Agency

## 1. RESUMEN

El clorpirifos (CPF) es un insecticida organofosforado de amplio espectro utilizado mundialmente en la agricultura para el control de plagas. Su aplicación masiva ha derivado en la contaminación de suelos y masas de agua, y la disrupción de ciclos biogeoquímicos. Por ello, la eliminación de este tipo de contaminantes del medio ambiente se ha convertido en objeto de numerosos estudios.

Se ha demostrado que la biodegradación es una de las opciones más viables para la remoción de los pesticidas organofosforados, pero sólo se consiguen altas tasas de eliminación en ambientes aerobios.

El objetivo del presente proyecto era estimular la degradación microbiana en condiciones anaerobias gracias a la presencia de grafito. Estos ambientes, característicos de los humedales han sido reproducidos en columnas de Winogradsky, dónde los microorganismos se disponen en estratos según sus requerimientos metabólicos. Para fomentar la actividad de los microorganismos se aplica una nueva técnica de biorremediación basada en estudios recientes que sugieren un metabolismo sintrófico entre distintas especies bacterianas gracias a la transferencia de electrones entre ambientes separados en el espacio. Esto se consigue gracias a la presencia de un material conductor (en este caso, grafito) que actúa como intermediario favoreciendo el paso de electrones entre microorganismos.

Para comprobar estas hipótesis, se planifica un ensayo de 10 semanas en el que se sacrifican periódicamente tres columnas con grafito y tres sin él. En ellas se cuantifica el gas $CH_4$ presente y el Clorpirifos (CPF) y 3,5,6-Tricloro-2-pirinidol extraído de cada muestra (TCP).

Los resultados obtenidos no indican una mejora en la tasa de eliminación en los suelos con grafito. En este proyecto, sólo se ha tenido en cuenta un control físico-químico ya que las limitaciones de tiempo impiden realizar más ensayos. Sería aconsejable un estudio más profundo en el que se realizara un balance de masas para conocer las alteraciones que sufre el pesticida en la matriz (volatilización, mineralización...).

Los datos relativos a la concentración de $CH_4$ no revelan diferencias, lo que podría deberse a que en el primer muestreo la producción de gas haya alcanzado su máximo. Al no contar con más datos, no es posible determinar lo ocurrido.

## 2. INTRODUCCIÓN

El uso de pesticidas es tan antiguo como la agricultura, sin embargo, la llegada de los plaguicidas sintéticos junto con los fertilizantes químicos en la década de los cuarenta supuso el inicio de la "Revolución verde" (Tilman, 1998)q ue incrementó la producción de los cultivos de 2 a 5 veces respecto a las técnicas tradicionales sin tener que incrementar el trabajo ni la superficie de cultivo (Seiber y Ragsdale, 1999).

Este modelo agrícola basado en la aplicación masiva de productos químicos ha derivado en un grave problema medioambiental y de salud humana ya que menos del 0,1% del total de los plaguicidas aplicados alcanza su objetivo, lo que supone que el 99,9% restante permanece en el medio, con los riesgos que ello conlleva (Pimentel, 1995)

El Clorpirifós o Clorpirifos (CPF) (O, O' dietil O [3,5,6-tricloro-2-piridil fosforotioato]) (figura 1) es un insecticida organofosforado de amplio espectro que apareció por primera vez en 1965 y se aplicó tanto en el ámbito doméstico como agrícola para el control de plagas de Coleóptera, Díptera y Lepidóptera (Chishti *et al.*, 2013). Este tipo de pesticidas están formados por unos componentes muy heterogéneos que comparten una estructura química derivada del ácido fosfórico (Abo-Amer, 2011). En la Tabla 1 se especifican algunas características y propiedades del CPF y su principal metabolito,y 3,5,6-Tricloro-2-pirinidol (TCP).

*Figura 1. Estructura del Clorpirifos*

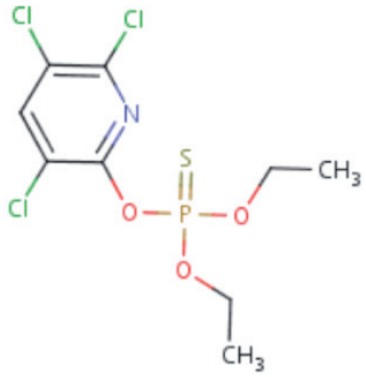



*Tabla 1. Características del CPF y TCP*

| | PM (g/mol) | Pvapor (mPa a 25°C) | Solubilidad en agua (mg/l a 25°C) | Kow (log P) | GUS |
|---|---|---|---|---|---|
| CPF | 350,6 | 2,5 | 2 | 4,82-5,11 | 0,15 |
| TCP | 198,43 | 137,32 | 80,9 | $1,62 \cdot 10^3$ | 2,90 |

Se ha demostrado que el CPF afecta también al ser humano,sobre todo a los niños, provocando defectos de nacimiento (bajo peso y circunferencia craneal reducida) (Giordano *et al.*, 2007). Es un potente disruptor endocrino que, además, produce desórdenes en el sistema nervioso inhibiendo la actividad de la acetilcolinesterasa por fosforilación, lo que conlleva la acumulación de acetilcolina en las sinapsis nerviosas (Racke y Coats, 1988). También genera daños cromosómicos (Lee *et al.*, 2004) y acelera los procesos de envejecimiento celular (Cisar y Snyder, 2000).

En Estados Unidos se prohibió su uso doméstico en el 2000 por la USEPA (Agencia Protectora del Medio ambiente de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés) pero en 2007, seguía siendo el insecticida organofosforado más vendido para uso agrícola (Rigas *et al.*, 2001).En Europa, según el Reglamento de Ejecución (UE) nº762/2013, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) n 540/2011, el uso del Clorpirifós está limitado para el uso agrícola y se permite hasta el 31 de enero de 2018. ("Reglamento de Ejecución (UE) nº 762/2013 de la Comisión, de 7 de agosto de 2013, que modifica el Reglamento de Ejecución (UE) nº 540/2011 en lo que respecta a la prórroga de los períodos

de aprobación de las sustancias activas clorpirifos, clorpirifos-metil, mancoceb, maneb, MCPA, MCPB y metiram.," n.d.)

El CPF ha sido detectado en multitud de ecosistemas (Chishti *et al*., 2013), dependiendo su destino ambiental de las características físico-químicas del suelo y los procesos de interacción de dicha matriz con el plaguicida (procesos de adsorción, desorción, volatilización, degradación química, biológica y transporte), de las prácticas de uso y las condiciones ambientales (Halimah *et al*., 2010). La escorrentía superficial supone una de las rutas más comunes por las que se introduce en las masas de agua (Pedersen *et al*., 2006).

Pese a su persistencia y toxicidad, el uso de organofosforados como insecticidas ha ido aumentando en las últimas décadas por lo que es importante comprender sus rutas de degradación con el fin de favorecerla. Es conocido que la atenuación del CPF puede deberse a varios procesos naturales como volatilización, degradación química, fotoquímica o biológica, siendo la biodegradación microbiana la de mayor impacto (Barceló *et al*., 1991,Ghadari et al., 1995, Chishti *et al*., 2013). La eficiencia de la biodegradación depende de las características físicas, químicas y bioquímicas del suelo, de las condiciones ambientales (temperatura, radiación solar...) y de la naturaleza y concentración del compuesto (Aurelia, 2009), siendo la textura del suelo, su contenido hídrico, pH y porcentaje de materia orgánica determinantes en el éxito de los procesos de biorrecuperación de suelos. De igual modo, dicho éxito depende de la presencia de comunidades microbianas y aceptores finales de electrones adecuados para la degradación del contaminante a eliminar (Vidali, 2001).

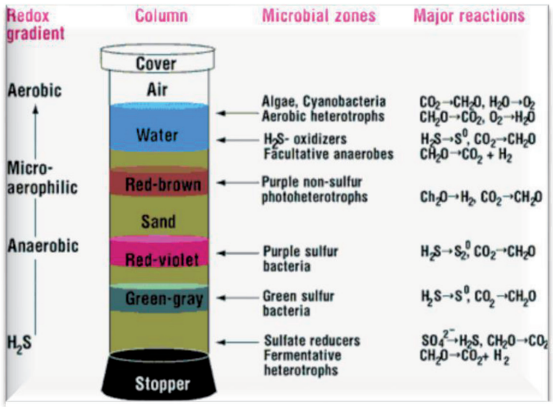
De hecho, según Singh *et al*., 2004,el factor más importante es el tipo y densidad de microorganismos presentes en el suelo. Cuando un pesticida se aplica repetidamente en un área agrícola, tienen lugar procesos de adaptación microbiana, y las poblaciones implicadas pueden utilizar el plaguicida o sus metabolitos como fuente de carbono, energía y nutrientes (Racke y Coats, 1988). Muchas especies bacterianas usan CPF como fuente de nutrientes y energía, por ejemplo, *Pseudomonas putida* MAS-1 y *Enterobacter B-14*muestran altas tasas de degradación de dichos compuestos (Karpouzas y Walker, 2000).

Pero el catabolismo microbiano en ambientes anaerobios se ve limitado por la falta de aceptores finales de electrones, lo que ha supuesto un aliciente para la búsqueda de estrategias para superar dicha limitación. En un estudio de Nielsen *et al*., 2010, se describe la cooperación entre distintas comunidades bacterianas para acoplar la reducción del oxígeno en las capas superficiales del sedimento y la oxidación de sulfuro de hidrogeno y carbón orgánico en las más profundas y carentes de oxígeno. Esta transferencia de electrones entre dos ambientes bioquímicos separados en el espacio, puede realizarse gracias a los citocromos presentes en las membranas (Summers *et al*., 2010), a la difusión de especies químicas redox o gracias a minerales naturalmente conductores que actúan como lanzadera de electrones (Watanabe *et al*., 2009). Estos minerales pueden asistir el metabolismo energético de dos especies bacterianas que tengan la capacidad de llevar a cabo reacciones bioquímicas complementarias, facilitando la transferencia de electrones entre ellas. Ejemplo de este proceso es el mutualismo que se establece entre especies capaces de oxidar etanol o acetato y especies metanogénicas (Kato y Watanabe, 2010). De este modo, las lanzaderas artificiales pueden crear nuevas rutas de flujo en el metabolismo energético microbiano, abriendo nuevas posibilidades a la aplicación de microorganismos en procesos biotecnológicos (Watanabe *et al*., 2009).

En la misma esfera de prácticas colaborativas, un fenómeno llamado DIET (siglas en inglés de transferencia directa de electrones entre especies), nombrado por primera vez por Lovley, 2011, alude a un mecanismo basado en el paso de electrones entre especies microbianas diferentes en orden de desarrollar un metabolismo sintrófico a través de contacto directo, en ausencia de transportadores de electrones o mediadores redox (Summers *et al*., 2010). De acuerdo con Liu *et al*., 2012 este metabolismo podría verse acelerado en presencia de un material conductor sólido, demostrando como la conversión de materia orgánica en un digestor anaerobio podría ser incrementada promoviendo DIET entre bacteria y metanógenos en presencia de grafito, mejorando la conexión eléctrica entre microorganismos, es decir, estimulando el paso de electrones entre unos y otros. Este efecto también ha sido registrado en la biorremediación de suelos contaminados con Dibenzotiofeno (DBT) (Rodrigo *et al*., 2014), donde la sola presencia de grafito en el suelo conllevó la estimulación de la actividad microbiana resultando en un incremento del 40% en la eliminación del DBT con respecto a los ensayos sin el material conductor.Así, ha quedado demostrado que la mera presencia de materiales conductores insolubles como el grafito puede actuar como una nueva herramienta para bioestimular la eliminación de compuestos contaminantes y el tratamiento de aguas residuales.

En el presente proyecto se ha diseñado una serie de ensayos emulando unas columnas de Winogradsky (figura 2), donde tras escasas semanas de incubación, se genera la estratificación de los organismos en función de sus características fisiológicas, ocupando nichos altamente específicos de acuerdo con sus necesidades vitales.

*Figura 2. Columna de Winogradsky*




En la conformación de dichas columnas, se ha usado suelo contaminado con clorpirifós con y sin material conductor, con el objetivo principal de determinar la influencia del grafito en las interacciones metabólicas entre las poblaciones microbianas del suelo en condiciones anaerobias y las consecuencias de éstas, tanto en la eliminación del contaminante a tratar como en la producción de metano.

Para ello se han llevado a cabo dos actividades principales:

1. Determinación de la eliminación del clorpirifós y su principal metabolito 3,5,6-tricloro-2-pirinidol en ensayos con y sin material conductor.

2. Registro de la producción de gas metano en los diferentes ensayos, comprobando la influencia del grafito en la generación del mismo.

# 3. METODOLOGÍA

## 3.1. LOCALIZACIÓN DEL SUELO

El suelo empleado en las columnas de Winogradsky procede del lecho fluvial del río Tajuña a su paso por la localidad de Luzaga en la provincia de Guadalajara (40°58'28''N, 2°26'39''W).

## 3.2. CÁLCULO DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO

El contenido hídrico del suelo se calcula pesando 3 muestras de 3 gramos cada una antes y después de someterlas a 106° durante 24 horas.

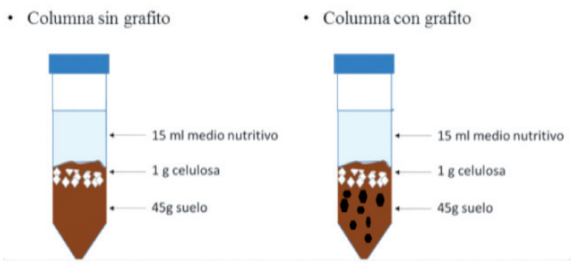
Se determina aplicando la siguiente ecuación (1):

$$CH = \frac{Pf - Ps}{Ps} \cdot 100 \qquad (1)$$

Pf: Peso fresco

Ps: Peso seco

*Figura 3. Estructura del Clorpirifos*




## 3.3. COLUMNAS DE WINOGRADSKY

Se confeccionan 60 columnas de Winogradsky en tubos Falcon de 50 ml cerrados para bloquear la transferencia de gases.

Cada una contiene 45g de suelo, 1 g de celulosa como fuente extra de carbono, 15 ml del medio nutritivo NPK y 80 µL de CPF (figura 3).

Además, 30 de ellas contendrán 5 g de gránulos de grafito para estudiar y comparar si su presencia favorece a la eliminación del CPF.

## 3.4. MEDIO NUTRITIVO

Para simular las condiciones que se dan en las explotaciones agrícolas reales debido al uso de fertilizantes, se añadió un medio nutritivo NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) (Tabla 2):

*Tabla 2. Reactivos empleados en la preparación del medio nutritivo*

| Reactivo | Concentración | Marca | Pureza |
|---|---|---|---|
| $KNO_3$ | 3g/l | Merck | Grade for analysis |
| $NaH_2PO_4$ | 3g/l | Merck | Grade for analysis |
| $ClNH_4$ | 3g/l | Prolabo | Grade for analysis |
| Agua desionizada | 2l | Merck Millipore | Ultrapura |

## 3.5. CLORPIRIFÓS

Se prepara una disolución de 0,1 gramos de CPF en 10 ml de metanol como disolvente.

En cultivos reales, la cantidad de plaguicida añadida es de 20mg/kg suelo. Para conseguir esa concentración final, se añaden 80 µl de solución (2).

$$\frac{20mg\ CP}{1000g\ suelo} = \frac{Xmg\ CP}{40g\ suelo} \qquad x = \frac{mg\ CP}{columna} \qquad (2)$$

Se realizan los siguientes cálculos (3) para conocer el volumen a añadir de la solución madre (10mg CP/ml metanol):

$$\frac{100mg\ CP}{10ml\ solución} = \frac{0,8mg\ CP}{x\ ml\ solución} \qquad (3)$$

$$\boxed{s = 0,06ml = 80\mu l\ solución}$$

## 3.6. CONTROL ABIÓTICO

El suelo es un medio anisótropo y complejo en el que se dan multitud de procesos físicos, químicos y biológicos.

Para cuantificar la cantidad de pesticida que se elimina o adsorbe debido a las interacciones físico-químicas con la matriz, se preparan 6 columnas control estériles en las que se elimina la población bacteriana mediante la adición de 500ppm de HgCl.

Cada columna control se prepara con 25 g de suelo y se añaden 15 ml de una solución de 500 ppm HgCl (en Agua MilliQ) para simular las condiciones abióticas.

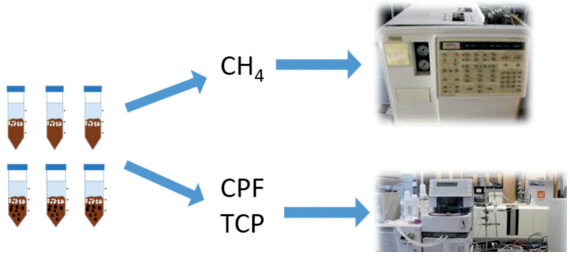
## 3.7. PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

Se establece un periodo total de 10 semanas de ensayos en el que se muestrean 60 columnas en total, la mitad contienen grafito y la otra mitad no.

Cada semana se sacrifican 3 réplicas de cada uno de los tipos de columnas y se cuantifica el contenido de $CH_4$ mediante el cromatógrafo de gases y de CPF y TCP en el HPLC (figura 4).

El muestreo de las columnas control se realiza a T1, T5 y T10 (día 10, 38 y 73, respectivamente).

*Figura 4. Esquema de la planificación semanal de los ensayos*




## 3.8. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. CUANTIFICACIÓN DEL METANO

Para la determinación cuantitativa de $CH_4$ se emplea la cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (GC-TCD). El equipo de marca Varian (Modelo 3350), controlado mediante el software *STAR CROMATOGRAPHY WORKSTATION*, opera con las siguientes condiciones:

- Columna a 40°C.
- Inyector a 150°C.
- Detector de conductividad térmica (TCD, por sus siglas en inglés) a 150°C.
- Helio como gas portador, ya que presenta una conductividad térmica de 6 a 10 veces mayor que la mayoría de los compuestos orgánicos, de modo que aunque haya poca cantidad de materia orgánica, la disminución de la conductividad térmica es relativamente grande, aumentando la temperatura del detector y produciendo los picos del cromatograma (Kirk, 1998).

### 3.8.1. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO

Para poder obtener los datos relativos a la concentración de metano presente en las columnas, se genera la recta de calibrado a partir de volúmenes crecientes (100µl, 200µl, 300µl, 400µl y 500µl) de una mezcla de gases compuesta por: 29,80% de $H_2$; 29,98% de $CH_4$ y 40,22% de $CO_2$ en la que la presión, temperatura y número de moles totales se conoce. Aplicando la ecuación de los gases ideales (4) se calcula la concentración de metano presente en la muestra patrón (tabla 4).

$$Pv = nRT \qquad (4)$$

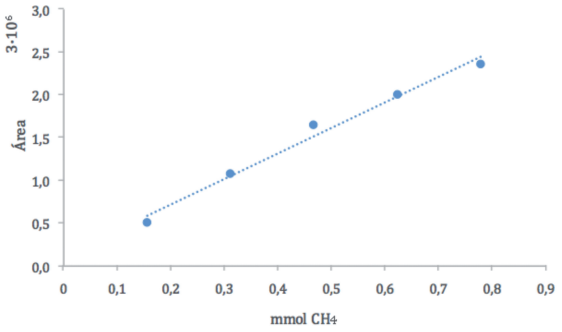
*Tabla 3. Concentraciones de $CH_4$ en los volúmenes patrón para la determinación de larecta de calibrado*

| | 100µl | 200 µl | 300 µl | 400 µl | 500 µl |
|---|---|---|---|---|---|
| Mmol $CH_4$ | 0,57 | 0,31 | 0,47 | 0,62 | 0,78 |

La ecuación de la recta de calibrado (figura 5) obtenida es la siguiente:

$$y = (3 \cdot 10^6)x + 122712 (R^2 = 0{,}9855)$$

*Figura 5. Recta de calibrado del $CH_4$*



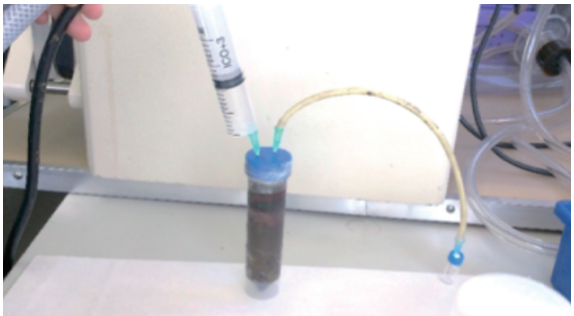

### 3.8.2. SACRIFICIO DE LAS COLUMNAS. CUANTIFICACIÓN DEL METANO PER SE.

Siguiendo el calendario preestablecido, cada semana de ensayo se procede a medir el biogás producido en seis columnas (3 con grafito, 3 sin grafito) en el cromatógrafo de gases con detector de conductividad térmica (GC-TCD).

Se desarrolla un sistema (figura 7) para la extracción de la muestra gaseosa de los tubos Falcon ya que no es posible realizarlo de manera directa.En primer lugar se inyecta una jeringa de 60 ml, ya que las columnas de Winogradsky se encuentran en condiciones anaerobias y, por tanto, a presión (el émbolo subirá hasta un determinado nivel). Posteriormente, se conecta, mediante un conducto de goma, un vial de vidrio de 2ml desde el que se toman 500µl.de muestra utilizando una jeringa SampleLock™ y se procede a la inyección en el GC-TCD.

Esto se reflejará en la concentración final de $CH_4$ ya que el volumen de gas total será mayor por la anexión de los dos continentes.

*Figura 6. Sistema desarrollado para el muestreo de $CH_4$*



## 3.9. ELIMINACIÓN DEL PESTICIDA. CUANTIFICACIÓN DEL CPF Y TCP

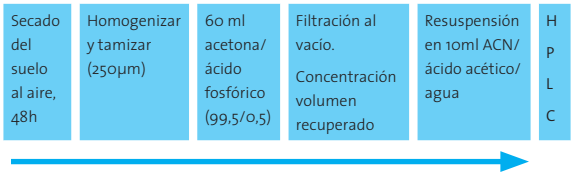
Transcurrido el tiempo de ensayo fijado para cada uno de los ensayos y una vez interrumpidas las condiciones anaerobias, se procede a la extracción del CPF(figura 8) para su posterior medida en HPLC siguiendo la metodología aplicada por (Zhang *et al*., 2011)en su investigación "*Analysis of Chlorpyrifos and TCP Residues in Agricultural Soil and Apples by HPLC*".

En primer lugar, se deja secar al aire el suelo de cada una de las seis columnas semanales en una sala a 30°C durante 48 horas. Tras tamizar (tamaño de poro 250µm), homogenizar el suelo y separar el grafito manualmente en las columnas que lo contuvieran, se pesan 20 g de suelo seco en un matraz cónico de 250 ml y se añaden 60 ml de acetona:ácido fosfórico (99,5:0,5 v:v). Después, se agita vigorosamente a 250 rpm durante 90 minutos.Posteriormente, se procede a la filtración al vacío usando un embudo Büchnery un kitasato (figura 7).

*Figura 7. Filtrado con filtro Büchner*

Finalmente, se realiza una concentración de las muestras llevándolas a sequedad mediante evaporación a 50°C durante20 horas y se resuspenden en 10 ml de acetonitrilo:agua:ácido acético (80:20:0,1 v:v:v). De éstos, 2ml se filtran con filtros de nilón de 0,22µm y se pasan a viales de vidrio para su medida en HPLC.

*Figura 8. Proceso de desorción del CPF*




### 3.9.1. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO

Para la calibración del método se preparan 5 patrones con concentraciones conocidas de Clorpirifós y 3,5,6-Tricloro -2-pirinidol ya que no interactúan entre ellos pues aparecen a distintos tiempos: el TCP a los 2,64 minutos y el CPF a 8,33 minutos.

A partir de dos disoluciones madre de CPF y TCP en metanol, se preparan 5 patrones distintos (tabla V) y se determinan las rectas de calibrado de ambos compuestos.

*Tabla 4. Concentraciones patrón para generar la recta de calibrado del HPLC*

| Concentración | µmoles CPF | µmoles TCP | ml CP | ml TCP | ml ACN | Volumen total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 ppm | 14,26 | 25,20 | 1 | 1 | 8 | 10 |
| 4 ppm | 11,41 | 20,16 | 0,8 | 0,8 | 8,4 | 10 |
| 3 ppm | 8,56 | 15,11 | 0,6 | 0,6 | 8,8 | 10 |
| 2 ppm | 5,70 | 10,08 | 0,4 | 0,4 | 9,2 | 10 |
| 1 ppm | 2,85 | 5,04 | 0,2 | 0,2 | 9,6 | 10 |

*Figura 9. Recta de calibrado del TCP*

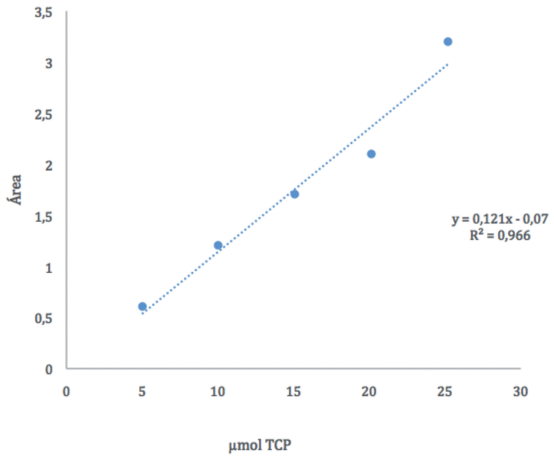
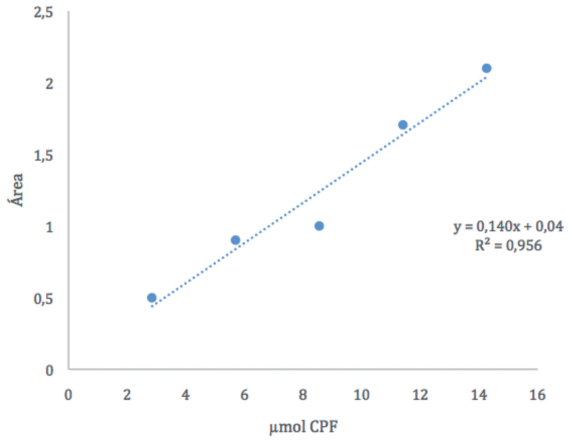



*Figura 10. Recta de calibrado del CPF*



### 3.9.2. ANÁLISIS DE CPF Y TCP CON HPLC

Para la determinación cuantitativa del CPF y su principal metabolito de degradación, TCP, se utiliza la Cromatografía de Líquidos de Alta Eficacia (HPLC, por sus siglas en inglés). El equipo de la marca Varian, controlado mediante el software GALAXIE, consta de los siguientes componentes:

- Bomba Varian Prostartar 230
- Autosampler Varian 410 con capacidad para 84 viales de 2ml de capacidad nominal. Consta además de un horno termostatizador de columnas.
- Detector diodo array Varian Star 9040: permite la detección simultánea en un amplio rango de longitudes de onda, tanto en rango visible como ultravioleta.
- Columna analítica: se ha empleado una Columna Kromasil C18 (150 x 4,6mm, 5µm), de la marca Phenomenex.

Como eluyente se utiliza acetonitrilo:agua ácida en proporción 80/20 con un flujo de bombeo constante a 1ml/min. La detección se realiza a dos longitudes de onda simultáneamente, 270 y 290 nm. El volumen de inyección es de 50 µl.

## 3.10. PORCENTAJE MÁXIMO DE RECUPERACIÓN

Para determinar la máxima cantidad de CPF extraíble se contaminan tres muestras de suelo con las mismas condiciones y cantidad de plaguicida y se realiza el mismo método de extracción pasadas 24 horas asumiendo que ese tiempo no es suficiente para haber degradado el compuesto, se calcula la cantidad máxima que se puede extraer del suelo, bajo unas condiciones determinadas y con un método de extracción determinado.

# 4. RESULTADOS

## 4.1. CÁLCULO DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO

*Tabla 5. Resultados obtenidos para el cálculo del contenido hídrico del suelo*

| Peso fresco (g) | Peso seco (g) | $CH = \frac{Pf - Ps}{Ps} \cdot 100$ |
|---|---|---|
| 3,11 | 1,62 | 92% |
| 2,90 | 1,55 | 87% |
| 2,95 | 1,33 | 82% |

## 4.2. PRODUCCIÓN BIOGÁS. CUANTIFICACIÓN DEL METANO

Con las áreas obtenidas del análisis de las muestras con el GC-TCD del gas metano, se hallan las concentraciones presentes en los 500µl inyectados.

Para extrapolar los resultados obtenidos de la muestra inyectada a la concentración presente en las columnas de Winogradsky, expresados como mmoles de $CH_4$, se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Recta de calibrado a partir de unos patrones de concentración conocida. Sustituyendo las áreas obtenidas de las muestras en la ecuación de la recta (5) resulta la concentración de $CH_4$ en los 500µl inyectados.

$$y = (3 \cdot 10^6)x - 122712 \qquad (5)$$

- Conociendo el espacio libre total (Resultante de la suma del espacio libre en las columnas, volumen desplazado en la jeringa y el volumen del vial conectado), se calcula la concentración real del gas estudiado en cada ejemplar.

En la Figura 11 y 12 se observan las concentraciones de $CH_4$ (mmoles) frente al tiempo (días). Los datos representados son las medias de las tres muestras analizadas por semana de cada configuración de columna, las barras de error se calculan a partir de la desviación estándar de cada triplete de réplicas.

*Figura 11. Concentración de $CH_4$ en los ensayos con y sin grafito frente al tiempo*

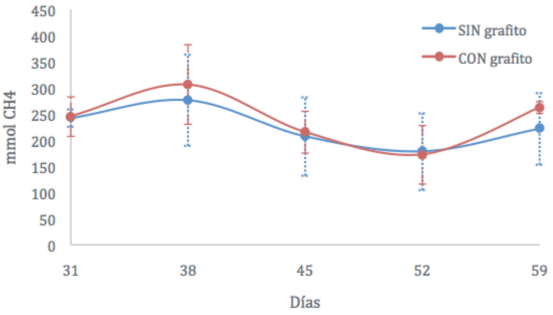



*Figura 12. Diagrama de barras: Concentración de CH: Concentración de $CH_4$ en los ensayos con y sin grafito frente al tiempo*

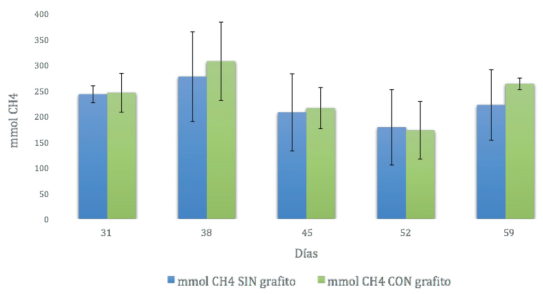
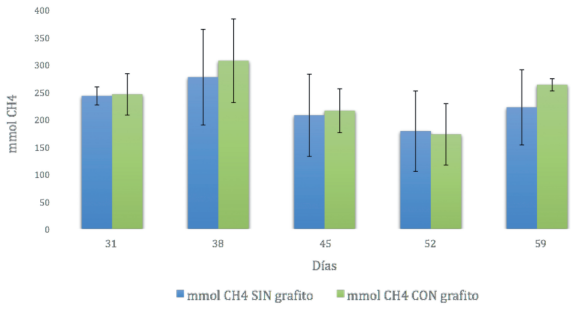


*Figura 13. Concentración de $CH_4$ en controles abióticos*

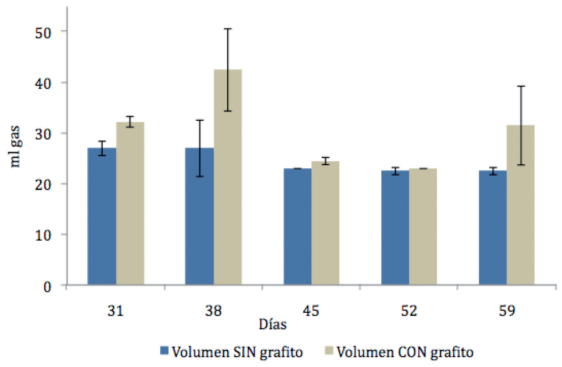



La Figura 13 muestra las cantidad de $CH_4$ presente en las columnas abióticas control en las semanas 1, 5, 10 (días 1, 38 y 73, respectivamente), cuyo suelo no tiene actividad biológica (se adicionaron previamente 50 ppm de HgCl).

## 4.3. PRODUCCIÓN DE GAS

En la figura 14 se representan los volúmenes de gas en cada columna resultante de la suma del espacio libre en cada columna y el volumen desplazado en la jeringa inyectada.

*Figura 14. Volumen total de gas en las columnas con y sin grafito frente al tiempo*




## 4.4. DEGRADACIÓN DEL CPF

Con las áreas de CPF obtenidas tras el análisis con HPLC de los extractos de suelo, se han realizado los cálculos necesarios para obtener las concentraciones del plaguicida. Así se ha comparado la desaparición del pesticida en función del tiempo y de la presencia o no de grafito en las columnas.

Para realizar los cálculos de concentración, expresados como µmoles CPF/g suelo seco, se han tenido en cuenta los siguientes factores:

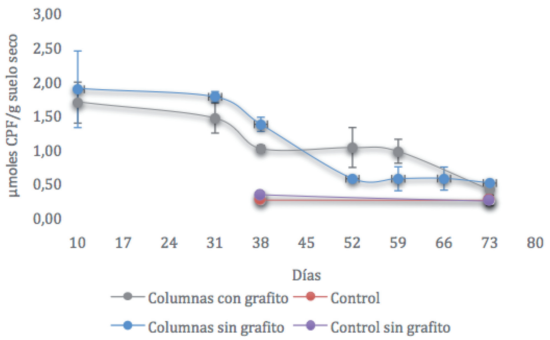
1. Recta de calibrado a diferentes concentraciones de CPF (1ppm, 2ppm, 3ppm, 4ppm y 5ppm). Sustituyendo las áreas obtenidas en el HPLC en la ecuación de la recta (6) se obtienen las concentraciones del plaguicida estudiado.

$$y = 0{,}1402x + 0{,}04 \qquad (6)$$

2. Volumen resuspendido tras reconcentrar (10 ml)
3. Volumen recuperado en la filtración a vacío (ml)
4. Cantidad de suelo inicial en las diferentes columnas (g)
5. Cantidad de suelo tratado (g)

En la figura 14 se representan las concentraciones expresadas como µmoles CPF/g suelo seco a lo largo de las 10 semanas de ensayo. También muestra las concentraciones de CPF recuperado de las columnas control a t5 (38 días) y t10 (73 días).

*Figura 15. Concentración de CPF en los ensayos con sin grafito frente al tiempo*



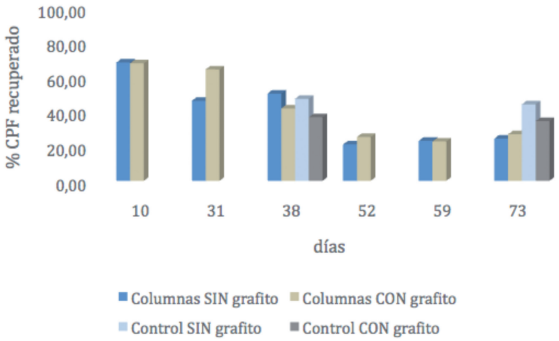

El porcentaje máximo de recuperación del CPF (tabla 4) se conoce tras realizar la extracción del plaguicida a las 24 horas. Se calcula de la siguiente manera (7):

$$\%\ recuperado = \frac{CPF\ recuperado\ (\mu mol)}{CPF\ inicial\ (\mu mol)} \qquad (7)$$

*Tabla 6. Porcentaje máximo de recuperación del CPF*

| Muestra | µmoles CPF añadido | µmoles CPF extraído a las 24 horas | % extraído | % Máximo de extracción |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,6 | 2,2 | 84,64 | |
| 2 | 2,6 | 2,13 | 81,92 | 85,52% |
| 3 | 2,6 | 2,34 | 90 | |

*Figura 16. Porcentaje de extracción de CPF en función del tiempo*



En el gráfico anterior (figura 15) se representan los porcentajes recuperados del CPF cada semana de extracción, teniendo en cuenta que el máximo recuperado es del 85,52%.

# 5. DISCUSIÓN

## 5.1. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. CUANTIFICACIÓN DEL METANO

A la luz de los resultados obtenidos en relación a la cantidad de $CH_4$ generado en los dos tipos de ensayos realizados no se observa una diferencia significativa en la producción de dicho gas entre ambos modelos de columnas de Winogradsky. Debido a la falta de datos de las tres primeras semanas, ya que surgieron algunos inconvenientes con el método de muestreo y hasta el día 38 no se aplicó la nueva técnica (anteriormente descrita en el apartado 3.2.8), no se puede asegurar que no haya habido variación en la producción de metano en las columnas con material conductor y sin él.

Cabría esperar una menor tasa de producción de metano en los ensayos en presencia de grafito ya que según la literatura las comunidades bacterianas electrogénicas compiten con las cepas metanogénicas. Aunque, en el presente estudio, el grafito no está polarizado, con lo que no actúa como aceptor final de electrones pero estudios recientes confirman que la sola presencia de este material conductor aumenta la degradación microbiana un 40% respecto a suelos control sin grafito (Rodrigo et al., 2014).

La tendencia de la producción del gas a lo largo de las semanas debería haber seguido un patrón constante. Sin embargo, el máximo y mínimo en los días 38 y 52, respectivamente no cumplen esta hipótesis inicial. En primer lugar, se pensó que podía deberse a un error experimental, pero el hecho de que estos resultados se den en las 6 muestras (3 con grafito y 3 sin él) hace descartar esta idea. Podría estar relacionado con una variación en las condiciones de las columnas que no han sido controlados.

## 5.2. PRODUCCIÓN DE GAS

Los resultados obtenidos reflejan un mayor volumen de gas en aquellas columnas que contienen grafito. Los análisis realizados en el cromatógrafo de gases determinan que el metano no avala la hipótesis inicial, sin embargo la producción de gas total incrementa lo que podría reflejar una estimulación de las reacciones metabólicas bacterianas.

## 5.3. ELIMINACIÓN DEL CLORPIRIFÓS Y 2,3,5-TRICLORO-2-PIRINIDOL

Los resultados no muestran que la eliminación del CPF y TCP haya mejorado con la presencia de grafito.

Según la literatura, la degradación del CPF en ambientes anaerobios es menor que en aerobios (eliminación del CPF del 66% en fases acuosas y un 31% en fangos, ambos en ambientes anaerobios).Por ello, el objetivo principal del estudio era comprobar si la presencia de grafito como material conductor estimula la eliminación de CPF en estos ambientes, emulados en las columnas de Winogradsky.

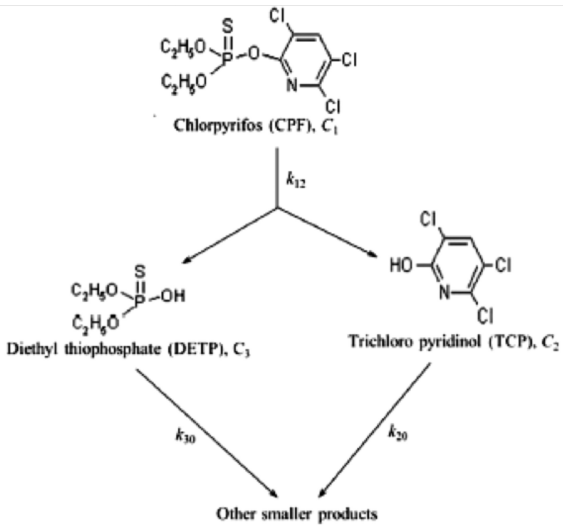
La motivación del estudio era confirmar una disparidad clara entre los ensayos realizados ya que en la bibliografía consultada se encuentran referencias a la transferencia de electrones entre organismos espacialmente separados como resultado de estrategias de colaboración entre ellos, acoplando sus distintos metabolismos para conseguir nuevas rutas catabólicas gracias a minerales naturalmente conductores que actúan transfiriendo electrones Nielsen *et al*., 2010y estudios recientes en el campo de la bioelectrogénesis demuestran que la simple presencia de grafito, sin estar polarizado, aumenta la tasa de degradación en suelos contaminado con DBT en un 40% respecto a los que no lo contienen (Rodrigo *et al*., 2014).

Con los datos obtenidos no se puede ratificar la hipótesis inicial de que el grafito favorece la transferencia directa de electrones entre distintas especies (DIET) (Lovley, 2011)donde éstas desarrollan un metabolismo sintrófico estimulando las conexiones eléctricas entre ellas. La concentración del CPF disminuye en función del tiempo, pero las tendencias de ambos ensayos son prácticamente paralelas.

La extracción del pesticida en los controles abióticos realizados no presenta resultados congruentes ya que se recupera menos contaminante de ellos que de las propias muestras. Esto podría indicar que la esterilización no haya sido eficaz. Sin embargo, las mediciones de gas metano determinan lo contrario, ya que no se capta señal en el GC-TCD, indicando que la población y actividad microbiana se han visto reducidas. Otra explicación posible podría ser que el HgCl haya formado algún complejo o ha reaccionado con el pesticida estudiado. La ausencia de literatura al respecto impide determinar las causas de estos resultados.

Por otra parte, el TCP fue analizado por ser el principal metabolito de degradación anaerobia del plaguicida (Tiwari y Guha, 2014). En base a estudios anteriores, el método de extracción aplicado y el método analítico sirve para ambos compuestos (Zhang *et al*., 2011) pero no se obtuvo señal correspondiente al metabolito en la cromatografía líquida de alta eficiencia.

*Figura 17. Principal ruta de degradación anaerobia del CPF*



La hipótesis inicial de la ausencia de señal se asoció a su pronto tiempo de retención, apareciendo su pico de absorbancia a los 2,27 minutos lo que podría suponer que el frente inicial camuflara su presencia. Se modificó el método en el HPLC variando el volumen de inyección, la fase móvil (ACN:agua, 60:40; ACN:agua 50:50...) pero el TCP no fue detectado, lo que podría sugerir la existencia de una ruta de degradación alternativa.

## 6. CONCLUSIONES

Tras la realización de los ensayos descritos con anterioridad y a la vista de los resultados obtenidos no se puede sacar ninguna conclusión significativa.

La literatura sí describe una mejora en la degradación de compuestos como el dibenzotiofeno (DBT) en los suelos en los que se añade grafito para fomentar un metabolismo sintrófico.

Es necesario realizar un balance de masa para el CPF donde se determine la porción de pesticida que se volatiliza, mineraliza, biodegrada o acumula para poder acotar el porqué de los resultados obtenidos.

Sería conveniente realizar más ensayos, con mayor número de réplicas que permitan realizar estudios estadísticos significativos, así como un estudio detallado de las comunidades microbianas implicadas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Abo-Amer, A.E., 2011. Biodegradation of Diazinon by Serratia marcescens DI101 and its Use in Bioremediation of Contaminated Environment. J. Microbiol. Biotechnol. 21, 71–80.

Aurelia, O., 2009. Study of the effect of some pesticides on soil microorganisms. Anal Univer Din Oradea Fasc. Protecţia Mediu. 14, 763–765.

Barceló, D., Sole, M., Durand, G., Albaigés, J., 1991. Analysis and behaviour of organophosphorus pesticides in a rice crop field. Fresenius J. Anal. Chem. 339, 676–683.

Chishti, Z., Hussain, S., Arshad, K.R., Khalid, A., Arshad, M., 2013. Microbial degradation of chlorpyrifos in liquid media and soil. J. Environ. Manage. 114, 372–380.

Cisar and Snyder, 2000. Mobility and persistence of turf grass pesticides in a U. S. Golf Association green: pesticides in percolate, thatch, soil, and clippings, and approaches to reduced fenamiphos and fenamiphos metabolite leaching,. Fate Manag. Turf Grass Chem. 106–126.

Ghadari, H., Rose, C.., Connell, D.., 1995. Degradation of Organochiorine Pesticides in Soils Under Controlled Environment and Outdoor Conditions. J. Environ. Manage. 43, 141–151.

Giordano, G., Afsharinejad, Z., Guizzetti, M., Vitalone, A., Kavanagh, T.G., Costa, L.G., 2007. Organophosphorus insecticides chlorpyrifos and diazinon and oxidative stress in neuronal cells in a genetic model of glutathione deficiency. Toxicol Appl Pharmacol 219, 181–189.

Halimah et al., 2010. Downward movement of chlorpyrifos in the soil of an oil palm plantation in Sepang, Selangor, Malaysia. J Oil Palm Res 22, 721–728.

Karpouzas, D. g., Walker, A., 2000. Factors influencing the ability of Pseudomonas putida strains epI and II to degrade the organophosphate ethoprophos. J. Appl. Microbiol. 89, 40–48.

Kato, S., Watanabe, K., 2010. Ecological and Evolutionary Interactions in Syntrophic Methanogenic Consortia. Microbes Environ. 25, 145–151.

Kirk, S., 1998. Thermal Conductivity Detector Analysis of Hidrogen Using Helium Carrier Gas and HayeSep® D Columns. J. Chromatogr. Sci.

Lee, W.., Blair, A., Hoppin, J.A., Lubin, J.H., Rusiecki, J.A., Sandler, D.P., Dosemeci, M., Alavanja, M.J., 2004. Cancer incidence among pesticide applicators exposed to chlorpyrifos in the agricultural health study. J Nat Cancer Inst 96, 1781–1791.

Liu, F., Rotaru, A.-E., Shrestha, P.M., Malvankar, N.S., Nevin, K.P., Lovley, D.R., 2012. Promoting direct interspecies electron transfer with activated carbon. Energy Environ. Sci. 5, 8982–8989.

Lovley, D.R., 2011. Reach out and touch someone: potential impact of DIET (direct interspecies energy transfer) on anaerobic biogeochemistry, bioremediation, and bioenergy. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 10, 101–105.

Nielsen, L.P., Risgaard-Petersen, N., Fossing, H., Christensen, P.B., Sayama, M., 2010. Electric currents couple spatially separated biogeochemical processes in marine sediment. Nature 463, 1071–1074.

Pedersen, J.A., Yeager, M.A., Suffet, I.H. (Mel), 2006. Organophosphorus Insecticides in Agricultural and Residential Runoff: Field Observations and Implications for Total Maximum Daily Load Development. Environ. Sci. Technol. 40, 2120–2127.

Pimentel, D., 1995. Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. Journal of Agricultural and Environmental Ethics 8.

Racke, K.D., Coats, J.R., 1988. Comparative degradation of organophosphorus insecticides in soil: specificity of enhanced microbial degradation. J. Agric. Food Chem. 36, 193–199.

Reglamento de Ejecución (UE) nº 762/2013 de la Comisión, de 7 de agosto de 2013, que modifica el Reglamento de Ejecución (UE) nº 540/2011 en lo que respecta a la prórroga de los períodos de aprobación de las sustancias activas clorpirifos, clorpirifos-metil, mancoceb, maneb, MCPA, MCPB y metiram.

Rigas, M.L., Okino, M.S., Quackenboss, J.J., 2001. Use of a pharmacokinetic model to assess chlorpyrifos exposure and dose in children, based on urinary biomarker measurements. Toxicol. Sci. 61, 374–381.

Rodrigo, J., Boltes, K., Esteve-Nuñez, A., 2014. Microbial-electrochemical bioremediation and detoxification of dibenzothiophene-polluted soil. Chemosphere 101, 61–65.

Seiber, J.., Ragsdale, N.., 1999. Examining risks and benefits associated with pesticide use. Am. Chem. Soc. Symp Ser 734 1–6.

Singh, B.K., Walker, A., Morgan, J.A.W., Wright, D.J., 2004. Biodegradation of Chlorpyrifos by Enterobacter Strain B-14 and Its Use in Bio-

remediation of Contaminated Soils. Appl. Environ. Microbiol. 70, 4855–4863.

Summers, Z.M., Fogarty, H.E., Leang, C., Franks, A.E., Malvankar, N.S., Lovley, D.R., 2010. Direct exchange of electrons within aggregates of an evolved syntrophic coculture of anaerobic bacteria. Science 330, 1413–1415.

Tilman, D., 1998. The greening of the green revolution. Nature 396, 211–212.

Tiwari, M.K., Guha, S., 2014. Kinetics of biotransformation of chlorpyrifos in aqueous and soil slurry environments. Water Res. 51, 73–85.

Vidali, M., 2001. Bioremediation. An overview. Pure Appl. Chem. 73, 1163–1172.

Watanabe, K., Manefield, M., Lee, M., Kouzuma, A., 2009. Electron shuttles in biotechnology. Curr. Opin. Biotechnol. 20, 633–641.

Zhang, Q., Zhu, L., Han, C., Wang, J., Xie, H., Wang, J., Sun, S., 2011. Analysis of chlorpyrifos and TCP residues in agricultural soil and apples by HPLC. J. Food Agric. Environ. 9, 659–662.

# 8. APÉNDICES

## 8.1. ANEJO 1

| Semana | Día | Columna | Volumen gas | Área | Mmol $CH_4$ en 500µl muestra | mmol $CH_4$ en volumen total | Media áreas | Media mmol $CH_4$ | Media volumen | Desviación estándar | mmol $CH_4$ promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 31 | 11G | 31,50 | 13076466,0 | 4,32 | 272,03 | 11567271,00 | 3,81 | 32,25 | 37,80 | 246,05 |
| | | 13G | 33,00 | 10058076,0 | 3,31 | 218,58 | | | | | |
| | | 11 | 26,00 | 14786599,0 | 4,89 | 254,17 | 13637194,00 | 4,50 | 27,00 | 16,52 | 242,43 |
| | | 12 | 28,00 | 12487789,0 | 4,12 | 230,81 | | | | | |
| 5 | 38 | 15G | 48,00 | 11390601,0 | 3,76 | 360,57 | 10950669,00 | 3,61 | 42,25 | 76,22 | 306,67 |
| | | 16G | 36,50 | 10510737,00 | 3,46 | 252,78 | | | | | |
| | | 14 | 33,00 | 16730225,00 | 5,54 | 365,37 | 15262513,33 | 5,05 | 27,00 | 87,27 | 276,69 |
| | | 15 | 26,00 | 15918212,00 | 5,27 | 273,79 | | | | | |
| | | 16 | 22,00 | 13139103,00 | 4,34 | 190,91 | | | | | |
| 6 | 45 | 18G | 25,00 | 13051972,00 | 4,31 | 215,49 | 13051972,00 | 4,31 | 25 | - | 215,49 |
| | | 18 | 23,00 | 13632353,92 | 4,50 | 207,15 | 13632353,92 | 4,50 | 23,00 | - | 207,15 |
| 7 | 52 | 22G | 23,00 | 11363060,00 | 3,75 | 172,35 | 11363060,00 | 3,75 | 23,00 | - | 172,35 |
| | | 20,00 | 23,00 | 15196321,00 | 5,02 | 231,13 | 12002194,50 | 3,96 | 22,50 | 73,36 | 178,19 |
| | | 22,00 | 22,00 | 8808068,00 | 2,90 | 127,39 | | | | | |
| 8 | 59 | 25G | 37,00 | 11096029,00 | 3,66 | 270,68 | 12960753,00 | 4,28 | 31,50 | 11,19 | 262,76 |
| | | 26G | 26,00 | 14825477,00 | 4,90 | 254,85 | | | | | |
| | | 23,00 | 22,00 | 15426006,00 | 5,10 | 224,45 | 14897605,00 | 4,92 | 22,50 | 4,24 | 221,62 |
| | | 24,00 | 23,00 | 14369204,00 | 4,75 | 218,45 | | | | | |

| | Columna | g suelo | g suelo seco | g suelo tratado | Vol. Recuperado filtración | Área | µmol CPF | µmol CPF en vol. recuperado | µmol CPF en 60ml acetona | µmol CPF/g suelo seco | Media µmol CPF/g suelo seco | Desv. estándar | µmol CPF inicial | Media µmol CPF inicial | % recuperado | Media% recuperado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1S | 46,6 | 45,7 | 15,20 | 38,00 | 4,40 | 31,14 | 0,31 | 0,49 | 1,48 | 1,88 | 0,56 | 2,61 | 2,74 | 56,71 | 68,40 |
| | 2S | 51,4 | 50,5 | 15,30 | 24,00 | 3,90 | 27,57 | 0,28 | 0,69 | 2,28 | | | 2,88 | | 78,98 | |
| | 3G | 45,9 | 45 | 15,60 | 30,00 | 3,60 | 25,43 | 0,25 | 0,51 | 1,47 | 1,68 | 0,30 | 2,57 | 2,47 | 57,15 | 67,95 |
| | 4G | 42,6 | 41,7 | 13,50 | 16,50 | 2,40 | 16,86 | 0,17 | 0,61 | 1,89 | | | 2,38 | | 79,60 | |
| 4 | 10S | 50,4 | 49,5 | 15,00 | 32,00 | 3,00 | 21,14 | 0,21 | 0,40 | 1,31 | 1,77 | 0,08 | 2,82 | 2,92 | 44,86 | 45,59 |
| | 11S | 53,9 | 53 | 15,00 | 32,00 | 3,00 | 21,14 | 0,21 | 0,40 | 1,40 | | | 3,02 | | 46,33 | |
| | 11G | 45,2 | 44,3 | 13,00 | 22,00 | 2,70 | 19,00 | 0,19 | 0,52 | 1,77 | 1,45 | 0,22 | 2,53 | 2,50 | 69,87 | 58,17 |
| | 13G | 44,2 | 43,3 | 14,30 | 30,00 | 3,40 | 24,00 | 0,24 | 0,48 | 1,45 | | | 2,47 | | 58,84 | |
| 5 | 15S | 45,2 | 44,3 | 20,00 | 41,00 | 5,60 | 39,71 | 0,40 | 0,58 | 1,29 | 1,36 | 0,10 | 2,53 | 2,70 | 50,94 | 50,45 |
| | 16S | 51,2 | 50,3 | 20,00 | 36,50 | 4,90 | 34,71 | 0,35 | 0,57 | 1,44 | | | 2,87 | | 50,02 | |
| | 14G | 43,6 | 42,7 | 11,80 | 39,50 | 2,50 | 17,57 | 0,18 | 0,27 | 0,97 | 1,01 | 0,05 | 2,44 | 2,37 | 39,65 | 42,37 |
| | 15G | 40,5 | 39,6 | 12,00 | 44,00 | 3,30 | 23,29 | 0,23 | 0,32 | 1,05 | | | 2,26 | | 46,39 | |
| | 16G | 43,4 | 42,5 | 12,00 | 43,50 | 2,80 | 19,71 | 0,20 | 0,27 | 0,96 | | | 2,42 | | 39,72 | |
| 7 | 21S | 44,6 | 43,7 | 20,00 | 29,00 | 1,80 | 12,57 | 0,13 | 0,26 | 0,57 | 0,56 | 0,01 | 2,49 | 2,66 | 22,80 | 21,04 |
| | 22S | 50,6 | 49,7 | 20,00 | 32,00 | 1,70 | 11,86 | 0,12 | 0,22 | 0,55 | | | 2,84 | | 19,49 | |
| | 21G | 49,2 | 48,3 | 15,00 | 31,00 | 1,40 | 9,71 | 0,10 | 0,19 | 0,61 | 1,02 | 0,29 | 2,76 | 2,68 | 21,97 | 38,03 |
| | 22G | 46,7 | 45,8 | 15,00 | 20,00 | 1,60 | 11,14 | 0,11 | 0,33 | 1,02 | | | 2,61 | | 39,07 | |
| 8 | 23S | 50,2 | 49,3 | 20,00 | 32,50 | 2,70 | 19,00 | 0,19 | 0,35 | 0,86 | 0,66 | 0,18 | 2,81 | 2,87 | 30,74 | 23,12 |
| | 24S | 54 | 53,1 | 20,00 | 31,00 | 1,50 | 10,43 | 0,10 | 0,20 | 0,54 | | | 3,03 | | 17,69 | |
| | 25S | 49,4 | 48,5 | 20,00 | 31,00 | 1,80 | 12,57 | 0,13 | 0,24 | 0,59 | | | 2,77 | | 21,33 | |
| 8 | 24G | 45,7 | 44,8 | 15,00 | 39,00 | 1,90 | 13,29 | 0,13 | 0,20 | 0,61 | 0,96 | 0,18 | 2,56 | 2,61 | 23,89 | 36,91 |
| | 25G | 47,5 | 46,6 | 15,00 | 29,00 | 1,30 | 9,00 | 0,09 | 0,19 | 0,58 | | | 2,66 | | 21,76 | |
| | 26G | 47 | 46,1 | 15,00 | 23,00 | 2,40 | 16,86 | 0,17 | 0,44 | 1,35 | | | 2,63 | | 51,39 | |
| 10 | 28S | 49,1 | 48,2 | 20,00 | 27,00 | 2,10 | 14,71 | 0,15 | 0,33 | 0,79 | 0,50 | 0,17 | 2,75 | 2,63 | 28,66 | 18,89 |
| | 29S | 44,9 | 44 | 20,00 | 41,00 | 2,20 | 15,43 | 0,15 | 0,23 | 0,50 | | | 2,51 | | 19,79 | |
| | 29G | 47,7 | 46,8 | 15,00 | 37,00 | 1,60 | 11,14 | 0,11 | 0,18 | 0,56 | 0,40 | 0,13 | 2,67 | 2,54 | 21,12 | 15,81 |
| | 30G | 43,22 | 42,32 | 15,00 | 34,00 | 2,30 | 16,14 | 0,16 | 0,28 | 0,80 | | | 2,41 | | 33,29 | |
| | | | | | | | | CONTROLES | | | | | | | | |
| 5 | 5S | 12,7 | 11,8 | 5,00 | 9,50 | 1,10 | 7,57 | 0,08 | 0,16 | 0,38 | 0,31 | 0,09 | 0,67 | 0,65 | 55,89 | 47,40 |
| | 6S | 12,02 | 11,12 | 5,00 | 6,00 | 0,50 | 3,29 | 0,03 | 0,11 | 0,24 | | | 0,63 | | 38,40 | |
| | 4G | 12,73 | 11,83 | 5,00 | 9,00 | 0,70 | 4,71 | 0,05 | 0,10 | 0,25 | 0,25 | 0,00 | 0,67 | 0,71 | 36,73 | 34,37 |
| | 6G | 14,13 | 13,23 | 5,00 | 4,00 | 0,30 | 1,86 | 0,02 | 0,09 | 0,25 | | | 0,75 | | 32,56 | |
| 10 | 8S | 12,3 | 11,4 | 5,00 | 10,00 | 0,90 | 6,14 | 0,06 | 0,12 | 0,28 | 0,18 | 0,07 | 0,65 | 0,63 | 43,07 | 36,75 |
| | 9S | 11,67 | 10,77 | 5,00 | 11,00 | 0,70 | 4,71 | 0,05 | 0,09 | 0,18 | 0,30 | | 0,61 | | 30,05 | |
| | 8G | 11,8 | 10,9 | 5,00 | 10,00 | 1,00 | 6,86 | 0,07 | 0,14 | 0,30 | 0,24 | 0,08 | 0,62 | 0,55 | 48,08 | 44,20 |
| | 9G | 9,3 | 8,4 | 5,00 | 11,00 | 0,90 | 6,14 | 0,06 | 0,11 | 0,19 | | | 0,48 | | 39,16 | |

escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

**máster universitario**

en hidrología y gestión de recursos hídricos

**proyectos**

**2014**

# Caracterización de las propiedades hidráulicas de la zona no saturada en una parcela experimental para el uso de agua regenerada en riego

autor

**Raúl Ortego Martínez**

directores

**Dra. Raffaella Meffe (Imdea Agua)**

**Dr. Ángel de Miguel (Imdea Agua)**

Alcalá de Henares, 10 de Junio de 2014

## ÍNDICE

1. Resumen ... 349
2. Introducción ... 349
3. Metodología ... 350
   3.1. Densidad aparente ... 350
   3.2. Determinación de la textura ... 351
   3.3. Utilización y calibración de sondas de humedad ... 351
   3.4. Conductividad hidráulica ... 352
      3.4.1. Conductividad hidráulica en laboratorio ... 352
      3.4.2. Conductividad hidráulica en campo (ensayo de infiltración) ... 352
   3.5. Análisis de datos meteorológicos ... 353
   3.6. Análisis de los datos de humedad de campo ... 353
   3.7. Simulación del movimiento de agua en la ZNS mediante el modelo Hydrus-1D ... 353
      3.7.1. Ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento de agua en el medio poroso ... 354
      3.7.2. Relaciones constitutivas de la ecuación de Richards: Funciones de las propiedades hidráulicas del suelo ... 354
      3.7.3. Simulación del flujo en la zona no saturada ... 355
4. Resultados ... 357
   4.1. Descripción de los horizontes en campo ... 357
   4.2. Densidad aparente ... 357
   4.3. Textura ... 357
   4.4. Calibración de sondas de humedad ... 358
   4.5. Conductividad hidráulica ... 358
      4.5.1. Conductividad hidráulica en laboratorio ... 358
      4.5.2. Conductividad hidráulica en campo ... 358
      4.5.3. Comparación de resultados de la conductividad hidráulica ... 359
   4.6. Resultados de los análisis de datos meteorológicos ... 359
   4.7. Resultados del análisis de los datos de humedad de campo ... 359
   4.8. Parámetros hidráulicos obtenidos ... 361
      4.8.1. Parámetros obtenidos a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ... 361
      4.8.2. Parámetros obtenidos a partir del ensayo de infiltración ... 361
      4.8.3. Parámetros obtenidos a partir de los datos diarios de las sondas ... 362
   4.9. Simulación del movimiento de agua en la ZNS ... 362
      4.9.1. Simulación a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ... 362
      4.9.2. Simulación a partir de la calibración con el ensayo de infiltración ... 363
      4.9.3. Simulación a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas ... 364
5. Discusión ... 364
   5.1. Sobre la diferencia entre simulaciones ... 364
   5.2. Sobre el comportamiento hidráulico de la ZNS ... 365
   5.3. Sobre la conductividad hidráulica ... 365
   5.4. Sobre la calibración de los modelos ... 366
   5.5. Sobre la calibración de las sondas ... 366
6. Conclusiones ... 366
7. Bibliografía ... 367
8. Apéndices ... 368
   8.1. Apéndice 1. Mapa y datos de las estaciones meteorológicas ... 368
   8.2. Apéndice 2. Gráfico con registros de humedad calibrados ... 372
   8.3. Apéndice 3. Gráficos con precipitaciones cada 30 min ... 374
   8.4. Apéndice 4. Gráficos con el balance hídrico simulado a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ... 377
   8.5. Apéndice 5. Gráficos con el balance hídrico simulado a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas ... 378
   8.6. Apéndice 6. Gráfico con la velocidad del flujo simulada a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas ... 379

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de las funciones hidráulicas para la zona no saturada (Carsel y Parrish, 1988) ..... 355
Tabla 2. Cálculo de la densidad aparente ..... 357
Tabla 3. Proporciones de las partículas minerales inferiores a 2 mm ..... 357
Tabla 4. Cálculo de la conductividad hidráulica en laboratorio ..... 358
Tabla 5. Resultado del ensayo de infiltración ..... 359
Tabla 6. Comparación de la conductividad hidráulica ... 359
Tabla 7. Datos meteorológicos totales y medias diarias .. 359
Tabla 8. Oscilaciones diarias de humedad por efecto de la temperatura del suelo ..... 360
Tabla 9. Parámetros hidráulicos de la ZNS obtenidos a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ..... 361
Tabla 10. Parámetros hidráulicos de la ZNS obtenidos a partir del ensayo de infiltración ..... 361
Tabla 11. Parámetros hidráulicos de la ZNS obtenidos a partir de los datos diarios de las sondas ..... 362
Tabla 12. Balance hídrico a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ..... 363
Tabla 13. Balance hídrico a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas ..... 364
Tabla 14. Efecto de la densidad aparente sobre las condiciones del suelo ..... 365
Tabla 15. Escala general de la densidad aparente ..... 365

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de situación ..... 350
Figura 2. Localización de la parcela de estudio ..... 350
Figura 3. Toma de muestras para el cálculo de la densidad aparente ..... 351
Figura 4. Proceso de calibración de las sondas de humedad ..... 351
Figura 5. Permeámetro de carga constante ..... 352
Figura 6. Ensayo de infiltración ..... 353
Figura 7. Curvas de retención de agua en la ZNS ..... 355
Figura 8. Curvas de conductividad hidráulica en la ZNS .. 355
Figura 9. Calicata para identificación de horizontes ..... 357
Figura 10. Triángulo de textura ..... 357
Figura 11. Curvas granulométricas ..... 358
Figura 12. Calibración de las sondas de humedad ..... 358
Figura 13. Resultado del ensayo de infiltración ..... 359
Figura 14. Humedad del sedimento y precipitaciones .... 360
Figura 15. Funciones hidráulicas de la ZNS obtenidas a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ..... 361
Figura 16. Funciones hidráulicas de la ZNS obtenidas a partir del ensayo de infiltración ..... 362
Figura 17. Funciones hidráulicas de la ZNS obtenidas a partir de los datos diarios de las sondas ..... 362
Figura 18. Humedad simulada a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia ..... 363
Figura 19. Humedad simulada a partir de la calibración con el ensayo de infiltración ..... 363
Figura 20. Humedad simulada a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas ..... 364

## INDICE DE ABREVIATURAS

| Símbolo | Descripción | Dimensiones |
|---|---|---|
| A | Sección transversal de la muestra | $[L^2]$ |
| C | Capacidad específica de humedad | $[L^{-1}]$ |
| EDAR | Estación depuradora de aguas residuales | |
| ETP | Evapotranspiración potencial | [L] |
| FDR | Frecuency Domain Reflectrometry | |
| H | Potencial hidráulico | [L] |
| h | Potencial de presión | [L] |
| $h_a$ | Potencial de entrada de aire | [L] |
| J | Flujo de agua | $[LT^{-1}]$ |
| K, K(h), K($\theta$) | Función de conductividad hidráulica | $[LT^{-1}]$ |
| $K_s$ | Conductividad hidráulica saturada | $[LT^{-1}]$ |
| L | Longitud de la columna de suelo | [L] |
| l | Parámetro de conectividad entre poros en el modelo de Mualem | [-] |
| m | Parámetro de la función de agua en el suelo según el modelo de van Genuchen | [-] |
| n | Índice de distribución de tamaño de poros | [-] |
| RMSE | Raíz cuadrada del error cuadrático medio | [-] |
| $S_e$ | Saturación efectiva | [-] |
| SIAR | Sistema de Información Agroclimática para el Riego | |
| t | Tiempo | [T] |
| V | Volumen de agua | $[L^3]$ |
| v | Velocidad de infiltración | $[LT^{-1}]$ |
| ZNS | Zona no saturada | |
| z | Coordenada espacial vertical o potencial gravitacional | [L] |
| $\alpha$ | Inverso del potencial de la entrada de aire | $[L^{-1}]$ |
| $\Delta$ | Incremento | [-] |
| $\theta$ | Contenido volumétrico de agua | $[L^3\ L^{-3}]$ |
| $\theta_r$ | Contenido de agua residual | $[L^3\ L^{-3}]$ |
| $\theta_s$ | Contenido de agua a saturación | $[L^3\ L^{-3}]$ |

## 1. RESUMEN

El estudio consiste en realizar una caracterización de las propiedades hidráulicas de la zona no saturada (ZNS) de una parcela situada en la terraza del río Henares junto a la EDAR de Guadalajara.

La caracterización de las propiedades hidráulicas de la ZNS es importante para gestionar de manera óptima el agua regenerada. En este trabajo se trata de analizar y determinar aquellas características y parámetros de la ZNS que influyen en el movimiento del agua, de manera que se puedan predecir las interacciones entre el agua regenerada y el suelo.

Se realizan los trabajos de campo y laboratorio necesarios para la descripción de las características físicas de la ZNS más relevantes: densidad aparente, textura, capacidad de infiltración, conductividad hidráulica, capacidad de retención y punto de saturación.

Como ayuda para el análisis y calibración de algunos de los parámetros hidráulicos más importantes se utiliza el modelo Hydrus-1D.

Otra herramienta básica para la realización del trabajo es la utilización de sondas de humedad que nos permiten analizar el comportamiento de la ZNS y nos proporcionan los datos necesarios para la calibración.

Con Hydrus se realizan tres modelizaciones. Una con parámetros hidráulicos inferidos a partir de ecuaciones de edafo-transferencia, y las otras dos se realizan para calibrar estos parámetros, mediante la comparación de la humedad registrada por las sondas con la humedad calculada por el modelo. Una compara la humedad durante un ensayo de infiltración y la otra compara la humedad diaria mediante la simulación del balance hidrológico natural.

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia son característicos de suelos de textura más gruesa que los analizados, por lo que no permiten simular con éxito el comportamiento hidráulico real de la ZNS. Sin embargo, los parámetros hidráulicos calibrados son característicos de un suelo de textura fina y se consigue un buen ajuste entre las humedades comparadas.

Se concluye con que la ZNS analizada tiene muy poca capacidad de infiltración y elevada capacidad de retención, adaptando como parámetros hidráulicos los conseguidos en el proceso de calibración.

Debido a que la calibración resulta compleja y se pueden encontrar varios conjuntos de parámetros que proporcionan una solución óptima a la modelización, sería necesaria la validación de estos resultados en periodos más largos. Y para un mejor análisis, es conveniente disponer de datos de potencial de succión medidos en campo o laboratorio.

Además, para mejorar la calibración y el análisis de los resultados es necesario que la modelización se realice con datos meteorológicos obtenidos en la misma parcela de estudio, con registros a escala horaria, que permitan simular un evento de precipitación real.

## 2. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las propiedades hidráulicas de la ZNS siempre es un factor importante a tener en cuenta en cualquier actividad donde existe una interacción del sistema agua-suelo. Algunas de estas actividades son el riego, la recarga de acuíferos, el drenaje o cualquier estudio hidrológico que requiera un cierto rigor en la determinación del balance hídrico a nivel de la zona no saturada.

La necesidad de conocer estas propiedades se acrecientan cuando se trata de la utilización de agua regenerada para riego. La composición del agua depurada puede implicar un riesgo sanitario, ambiental y productivo que hace necesario un conocimiento riguroso de las propiedades físicas de la ZNS para una gestión óptima del recurso.

Para evaluar los posibles efectos que la reutilización de agua puede generar sobre el sistema suelo-planta y sobre las aguas subterráneas, es preciso llevar a cabo una descripción previa del suelo que posibilite su clasificación y permita un análisis de los casos que puedan provocar degradación y pérdida o reducción de sus funciones (González- Naranjo et al., 2012).

El objetivo de la caracterización edáfica en las actividades de regeneración de aguas residuales es doble. Por un lado se trata de establecer el estado inicial de la zona no saturada y así poder hacer una primera aproximación de las interacciones que tendrán lugar entre el agua regenerada y el suelo en la zona de aplicación y los efectos derivados de las mismas. Por otro lado, se trata de estudiar la evolución de las distintas propiedades edáficas a lo largo del periodo de aplicación de aguas regeneradas (Casas et al., 2011). En este trabajo se aborda el estudio del estado inicial del suelo, dejando la evolución del mismo para futuros trabajos.

La caracterización de los parámetros hidráulicos trata de ofrecer una herramienta que ayude a la gestión y toma de decisiones de la actividad de regeneración. Las propiedades y parámetros más interesantes a analizar son: la capacidad de infiltración, conductividad hidráulica, capacidad de retención y punto de saturación.

En este trabajo se abordará esta caracterización mediante la interpretación de los trabajos de campo y laboratorio realizados. Así como un análisis del flujo en la zona no saturada mediante el desarrollo de un modelo numérico con la ayuda de la aplicación informática Hydrus-1D, versión 4.16.0090 (J. Simunek, M. Sejna, y M. Th. Van Genuchten, 2008).

La parcela de estudio se sitúa en la terraza del río Henares, en su margen izquierda, dentro del recinto de la EDAR de Guadalajara, y aproximadamente a la cota 626 msnm. En el figura 1 se adjunta un mapa de situación de la zona.

La elección de la parcela se realizó en base a tener la menor afección posible por la actividad humana, de manera que los resultados y conclusiones obtenidas sean representativos de un suelo natural. En la figura 2 se muestra la parcela de estudio. La superficie de dicha parcela presenta una ligera pendiente hacia el Arroyo de Mandambriles tributario del río Henares.

*Figura 1. Mapa de situación*

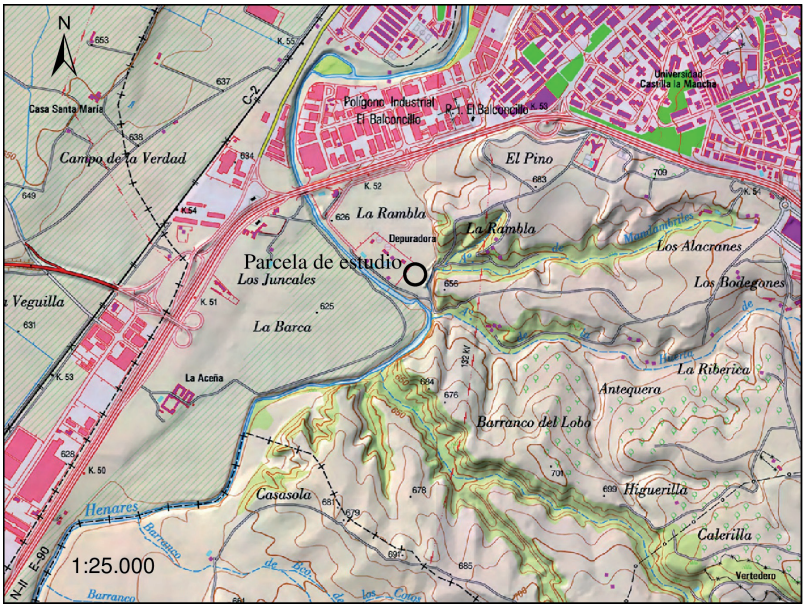



*Figura 2. Localización de la parcela de estudio*

## 3. METODOLOGÍA

Para evaluar las propiedades hidráulicas de la ZNS se estudia el perfil del suelo mediante la realización de una calicata de aproximadamente 110 cm, donde se identificaron los distintos horizontes, y se realizó la toma de muestras para los posteriores análisis de laboratorio.

### 3.1. DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen. Este volumen es el que ocupa la muestra en campo. La densidad aparente tiene interés desde el punto de vista del manejo del suelo, ya que informa sobre la compactación de cada horizonte, y permite inferir las dificultades para el enraizamiento, la circulación del agua y el aire (Porta et al., 2003).

Para su determinación, se tomaron tres muestras por horizonte con cilindros calibrados de 100 ml de capacidad (figura 3). Se

secaron en estufa a 105 °C hasta peso constante y se pesaron. Posteriormente se calculó la densidad aparente de cada muestra y finalmente se calculó la media para cada horizonte.

*Figura 3. Toma de muestras para el cálculo de la densidad aparente*

## 3.2. DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA

La determinación de la textura o granulometría del suelo consiste en calcular las proporciones de las diferentes partículas minerales atendiendo a su tamaño. El conocimiento de la textura de cada uno de los horizontes es fundamental para interpretar el comportamiento de la ZNS. Especialmente en el caso de la fracción fina (diámetro menor de 2 mm), ya que es la que tiene mayor influencia en la mayoría de propiedades del suelo.

Con una muestra seca de cada uno de los horizontes de aproximadamente 500 g. se desmenuzan los agregados. Posteriormente se tamizan en una cascada de tamices de un rango de luz de malla entre 50 µm y 12,7 mm. Los porcentajes obtenidos se representan gráficamente en escala semilogarítmica.

Adicionalmente con una muestra de 40 g. de la fracción fina y utilizando el método del densímetro se cuantifican las fracciones de arcilla, limos y arenas. Se trata de una sedimentación continua, y se realiza mediante la medida de las densidades variables de la suspensión de suelo en agua a medida que las partículas se van depositando.

Los porcentajes de cada una de las fracciones de partículas de la fracción fina del suelo se representan como proporciones en un triángulo de texturas con el objetivo de determinar su clase textural.

## 3.3. UTILIZACIÓN Y CALIBRACIÓN DE SONDAS DE HUMEDAD

Para estudiar como evoluciona la humedad del suelo en la parcela de estudio bajo condiciones ambientales, se instalan sondas de humedad en la calicata, una en cada uno de los horizontes que se van a caracterizar. Se trata de sensores tipo $ECH_2O$, fabricados por *Decagon Devices Inc.*, modelo 10HS. Las sondas $ECH_2O$ son sensores capacitivos FDR (*Frecuency Domain Reflectrometry*) que miden la constante dieléctrica o permitividad del suelo.

La fracción volumétrica del suelo ocupada por el agua tiene una enorme influencia en la permitividad del suelo ya que el valor dieléctrico del agua (80) es mucho mayor que el de los demás constituyentes de la ZNS (suelo mineral 4; materia orgánica 4; aire 1). Por ese motivo, cuando la cantidad de agua del suelo varía, las sondas detectan y miden esta variación y la relacionan directamente con el cambio en el contenido de agua.

*Figura 4. Proceso de calibración de las sondas de humedad*

Para obtener resultados aún más fiables, las sondas de humedad se calibraron en laboratorio con muestras de cada uno de los horizontes a analizar.

La calibración se realizó con el procedimiento propuesto por la misma casa comercial que se describe en los siguientes pasos:

- Las muestras se secan al aire y se desmenuzan los agregados hasta hacer pasar el sedimento por el tamiz con luz de malla de 2 mm. Eliminando las piedras grandes, e intentando no alterar significativamente la naturaleza del suelo.
- Se compacta el sedimento en un envase de plástico de 4,5 litros de capacidad hasta conseguir aproximadamente la densidad aparente. Las mediciones de los sensores utilizados no son muy sensibles a pequeñas diferencias en la densidad aparente. Pero, si la densidad aparente de las muestras de calibración tienen una diferencia superior al 20% de la densidad aparente real de campo, se debería repetir el proceso de calibración.
- Se inserta el sensor 10 HS hasta donde sea posible, rellenando después con más material compactado, hasta cubrir unos dos centímetros de cable de la sonda.
- Se toma lectura del sensor y se anota en una tabla el valor de humedad y el valor dependiente de la constante dieléctrica. Este último es necesario para el cálculo de dicha humedad, denominado por la marca comercial como *"Unprocessed Data"*.
- Se realizan varias lecturas insertando varias veces el sensor hasta conseguir medidas parecidas.
- Sin quitar el sensor, se saca una muestra con un cilindro metálico de 100 ml de capacidad. Se pesa y se seca en horno a 105 °C para poder calcular la humedad real de la muestra.
- Se añaden 500 ml de agua, se mezclan el suelo y el agua de manera homogénea y se repiten los pasos desde la compactación del sedimento en el envase de calibración hasta llegar a la saturación del sedimento (de 4 a 6 puntos de calibración). Este punto de saturación se determina mediante la identificación visual del agua libre.
- Los datos conseguidos (contenido de humedad y el valor no procesado dado por la sonda) se grafican y sucesivamente se interpolan para obtener una recta que es la función de calibración. La función suele ser lineal pero a veces ajusta mejor una ecuación cuadrática, especialmente en suelos con alto contenido en materia orgánica.
- Los datos de humedad medidos en el campo por las sondas son corregidos de acuerdo a la función de calibración.

## 3.4. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

### 3.4.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LABORATORIO

Para la medición de la conductividad hidráulica en laboratorio se aplica la ley de Darcy a un permeámetro de carga constante.

El permeámetro utilizado tiene un cuerpo cilíndrico vertical en el que se coloca la muestra, con unas dimensiones de 9,5 cm de diámetro interno por 9 cm de altura.

En el permeámetro de carga fija se aplica una diferencia de nivel de agua constante y se determina el caudal de agua que circula:

$$K_s = \frac{V * L}{A * \Delta H * t} \qquad (1)$$

En la que:

$K_s$: conductividad hidráulica saturada [$LT^{-1}$]

V: volumen de agua que ha pasado en un tiempo [$L^3$]

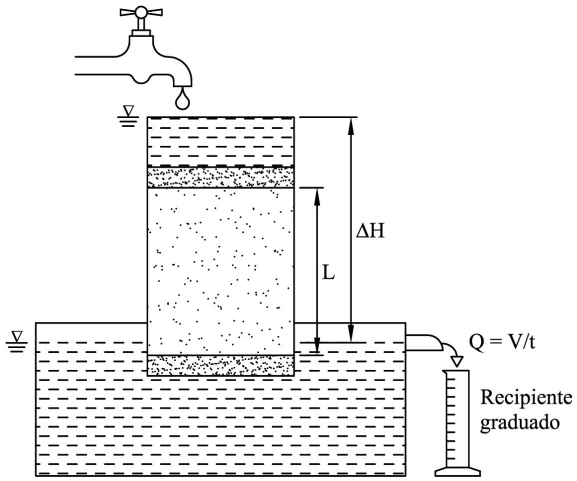
A: sección transversal de la muestra [$L^2$]

ΔH: diferencia de potencial hidráulico [L]

L: longitud de la columna de suelo [L]

t: tiempo [T]

*Figura 5. Permeámetro de carga constante*




### 3.4.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN CAMPO (ENSAYO DE INFILTRACIÓN)

El método utilizado se denomina ensayo del infiltrómetro de doble anillo (Porta et al., 2003). Consiste en dos cilindros concéntricos que se clavan en el suelo evitando alterar el estado de la superficie del mismo, se satura la porción de suelo limitada por los anillos, y a continuación se mide la variación del nivel del agua en el cilindro interior.

El anillo exterior tiene como función el evitar o reducir la infiltración horizontal del agua por debajo del cilindro interior, de tal forma que las medidas se correspondan lo más posible al flujo vertical.

La tasa de infiltración es la velocidad con la que el agua penetra en la ZNS a través de su superficie, y cuando este valor se vuelve constante (estado estacionario), coincide con la conductividad hidráulica del suelo saturado.

La ubicación de los anillos se hizo coincidir con la vertical de los sensores de humedad. Por lo general, este ensayo se realiza sin tener sondas de humedad. Pero su utilidad es doble, por un lado, nos aseguran el paso del frente de humectación por los distintos horizontes, y por otro lado, proporcionan datos para la posterior calibración del modelo.

Se llenan de agua los dos anillos hasta una altura de 15 cm empezando por el exterior y se realizan medidas de tiempo cada centímetro de descenso, tras el cual se reestablece el nivel inicial (15 cm), hasta un total de 6,16 horas (10 ciclos).

Finalizada esta fase del ensayo, se observó que la tasa de infiltración parecía constante, pero se comprobó que la sonda situada en el último de los horizontes a caracterizar no presentaba incrementos de humedad.

Para asegurarse que se alcanza la tasa de infiltración constante, se dejó 21,2 horas más, rellenando los cilindros hasta los 20 cm. Después de un total 27,36 horas y 13 medidas de tasas de infiltración se dio por concluido el ensayo. Comprobando que las sondas de humedad respondieron correctamente al frente de humectación, quedando los horizontes saturados.

*Figura 6. Ensayo de infiltración*

## 3.5. ANÁLISIS DE DATOS METEOROLÓGICOS

El análisis de los datos de las sondas de humedad y las condiciones de contorno necesarias para la posterior modelización requieren el conocimiento de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP).

Para saber la representatividad que una estación meteorológica próxima puede tener en la zona de estudio, se comparan los datos meteorológicos de las estaciones más cercanas.

Se analizan los datos de tres estaciones próximas de la red SIAR del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Para analizar estos datos se calcula la precipitación y ETP total y media diaria para el periodo de tiempo del que se tienen datos de humedad registrada por las sondas. Adicionalmente se realizan gráficos que facilitan la comparación.

Las tres estaciones analizadas son:

- Marchamalo a una distancia de 7 km de la parcela de estudio y una altitud de 692 msnm.
- Armuña de Tajuña a una distancia de 18 km y una altitud de 759 msnm.
- Center: Finca experimental a una distancia de 35 km y una altitud de 604 msnm.

Su posición se representa en el apéndice 1.

## 3.6. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE HUMEDAD DE CAMPO

Para comprobar el funcionamiento de las sondas y analizar el movimiento del agua en el suelo, se representan los datos registrados de humedad en gráficos.

Primero se representan y analizan los gráficos con todos los registros de las sondas, y posteriormente se representan los registros de humedad más representativos junto a los datos de precipitaciones diarias y de 30 minutos.

## 3.7. SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE AGUA EN LA ZNS MEDIANTE EL MODELO HYDRUS-1D

Existe un gran número de modelos matemáticos basados en la resolución de la ecuación de Richards que permiten la simulación del movimiento de agua a través de la zona no saturada en distintas condiciones de contorno de riego o precipitaciones.

La definición de las condiciones de contorno será decisiva para obtener resultados realistas. Además, hay que tener en cuenta las limitaciones de la ecuación de Richards. Por ejemplo, subestima la velocidad de flujo de agua en suelos con macro poros o grietas, donde el flujo preferencial de agua puede ser importante.

Hydrus-1D es un programa de simulación que describe el movimiento de agua en una dimensión, resolviendo la ecuación de Richards mediante métodos numéricos.

### 3.7.1. ECUACIONES MATEMÁTICAS QUE RIGEN EL MOVIMIENTO DE AGUA EN EL MEDIO POROSO

La ley de Darcy en flujo saturado puede escribirse como:

$$J = -K_s * \frac{\Delta H}{L} \qquad (2)$$

donde $J$ es el flujo de agua [$L\,T^{-1}$], $\Delta H/L$ [$L\,L^{-1}$], es el gradiente de potencial hidráulico y $K_s$ es la conductividad hidráulica [$L\,T^{-1}$] del medio poroso.

Buckingham (1907) modificó la ecuación de Darcy para la zona no saturada, sustituyendo el valor de $K_s$ por el de una función del potencial de presión $K(h)$, o bien del contenido de agua en el suelo $K(\theta)$. Quedando:

$$J = -K(\theta) * \frac{\partial H}{\partial z} \qquad (3)$$

donde $H$ es el potencial hidráulico [L] y $z$ es la elevación [L].

Cuando se considera la ecuación de conservación de la masa (ecuación de continuidad), la variación del contenido de agua en un determinado intervalo de tiempo, dentro del volumen de suelo considerado, es igual a la variación entre los flujos entrantes y salientes en dicho volumen. Considerando el agua incompresible, y que no hay aportes o pérdidas de agua en el sistema, matemáticamente puede escribirse como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial z} \qquad (4)$$

Combinando las ecuaciones de Darcy y de continuidad, se obtiene la ecuación de Richards (1931):

$$C * \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(h) * \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)\right] \qquad (5)$$

donde $C$ es la capacidad específica de humedad igual a: $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ [L-1]; $K$ es la conductividad hidráulica [LT-1]; $z$ es la elevación [L]; y $h$ es el potencial de presión [L].

### 3.7.2. RELACIONES CONSTITUTIVAS DE LA ECUACIÓN DE RICHARDS: FUNCIONES DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO

En el marco de la modelización del flujo de agua en medio no saturado a partir de la ecuación de Richards, la relación entre el contenido de agua $(\theta)$, potencial de presión $(h)$ y conductividad hidráulica $(K)$ representan relaciones constitutivas de dicha ecuación. Su caracterización resulta imprescindible para poder aplicar la ecuación de Richards. Para poder establecer cual es la relación entre $h$-$\theta$ y $h$-$K$ es muy corriente el uso de funciones paramétricas. La función que relaciona $h$ y $\theta$ se denomina de retención de agua en el suelo o característica del suelo, y la que relaciona $h$ y $K$, función de conductividad hidráulica. Ambas constituyen las funciones hidráulicas del suelo.

La función de retención de agua en el suelo $(h$-$\theta)$ es altamente no lineal y puede determinarse a partir de pares de valores $h$-$\theta$ medidos experimentalmente a través de cámaras de presión.

Una de las funciones paramétricas más extendidas, y utilizada con resultados satisfactorios, es la de van Genuchten (1980), que se caracteriza porque describe una forma de S invertida cuando se representa $h$-$\theta$ en una escala semilogarítmica.

La función de van Genuchten (1980) se basa en la definición de saturación efectiva $(S_e)$ a partir de la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n}\right]^m \qquad (6)$$

Aislando el contenido de agua se obtiene la relación entre $\theta$-h, conocida como la ecuación de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (ah)^n]^m} \qquad (7)$$

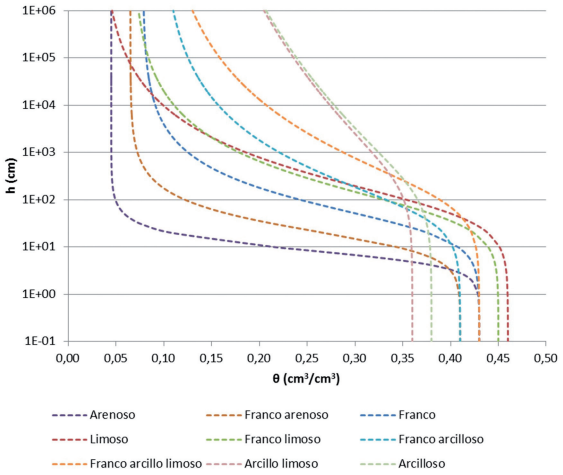
donde $\theta_r$ y $\theta_s$ son los contenidos de agua residual y en saturación [$L^3L^{-3}$], respectivamente; $K_s$ es la conductividad hidráulica saturada [$LT^{-1}$], $\alpha$ es el inverso del valor de la entrada de aire [$L^{-1}$], $n$ es un índice de distribución de tamaño de poros adimensional, y $m = 1 - 1/n$, $n>1$.

Los parámetros $\theta_r$, $\theta_s$, $\alpha$ y $n$ tienen un significado físico aunque en muchas ocasiones se utilizan meramente como parámetros de ajuste.

El contenido de agua en saturación $(\theta_s)$ puede obtenerse fácilmente de forma experimental. Teóricamente su valor coincide con el de la porosidad, pero en la práctica es inferior debido a la presencia de aire atrapado o disuelto. El contenido de agua residual $(\theta_r)$ es por lo general dado como la humedad a -1,5 MPa, o el obtenido experimentalmente a partir de la determinación del contenido de agua de una muestra de suelo secada al aire, van Genuchten (1980) sugiere estimarlo a partir de extrapolar los puntos de la curva de retención en la región de bajos contenidos de agua, utilizando la definición de que $\theta_r$ se da cuando el gradiente $d\theta/dh$ tiende a cero. Otro punto característico de la curva de retención es el potencial de entrada de aire $(h_a)$, que corresponde al valor límite de succión para el cual los poros de mayor tamaño empiezan a perder agua. El parámetro $\alpha$ está estrechamente ligado a la inversa del potencial de entrada de aire: $\alpha \sim 1/h_a$. Los suelos con una textura más gruesa se caracterizan por tener valores de $\alpha$ superiores a los suelos de textura fina. El parámetro n también viene correlacionado con la textura, aumentando a medida que aumenta el porcentaje de arena. La forma de la curva de retención es afectada por el valor de $n$, reduciéndose la pendiente en su zona central al aumentar el valor de $n$, lo que se traduce en que a igual aumento de la succión, el contenido de agua se reduce más en un suelo de textura gruesa que en un suelo de textura fina.

En la figura 7 se representan algunas curvas características para suelos de diferentes texturas.

*Figura 7. Curvas de retención de agua en la ZNS*




En la tabla 1 se muestran los valores dados por Carsel y Parrish (1988) para los parámetros de la ecuación de van Genuchten (1980) en función del tipo de textura, obtenidos a partir del promedio de un gran número de muestras.

*Tabla 1. Parámetros de las funciones hidráulicas para la zona no saturada (Carsel y Parrish, 1988)*

| Clase textural | $\theta_r$ (cm³/cm³) | $\theta_s$ (cm³/cm³) | Alpha (1/cm) | n | $K_s$ (cm/día) |
|---|---|---|---|---|---|
| Arena | 0,045 | 0,43 | 0,145 | 2,68 | 712,80 |
| Arena francosa | 0,057 | 0,41 | 0,124 | 2,28 | 350,16 |
| Franco arenosa | 0,065 | 0,41 | 0,075 | 1,89 | 106,08 |
| Franca | 0,078 | 0,43 | 0,036 | 1,56 | 24,96 |
| Limosa | 0,034 | 0,46 | 0,016 | 1,37 | 6,00 |
| Franco limosa | 0,067 | 0,45 | 0,020 | 1,41 | 10,80 |
| Franco arcillo arenosa | 0,100 | 0,39 | 0,059 | 1,48 | 31,44 |
| Franco arcillosa | 0,095 | 0,41 | 0,019 | 1,31 | 6,24 |
| Franco arcillosa limosa | 0,089 | 0,43 | 0,010 | 1,23 | 1,68 |
| Arcillo arenosa | 0,100 | 0,38 | 0,027 | 1,23 | 2,88 |
| Arcillo limosa | 0,070 | 0,36 | 0,005 | 1,09 | 0,48 |
| Arcillosa | 0,068 | 0,38 | 0,008 | 1,09 | 4,80 |

Para la función de conductividad hidráulica *K-h* o alternativamente *K-θ* existen múltiples relaciones funcionales entre estos parámetros. La dificultad de medir estos pares de valores ha llevado a que algunos autores desarrollen modelos conceptuales que permitan relacionar la distribución y el tamaño de los poros con la conductividad hidráulica.

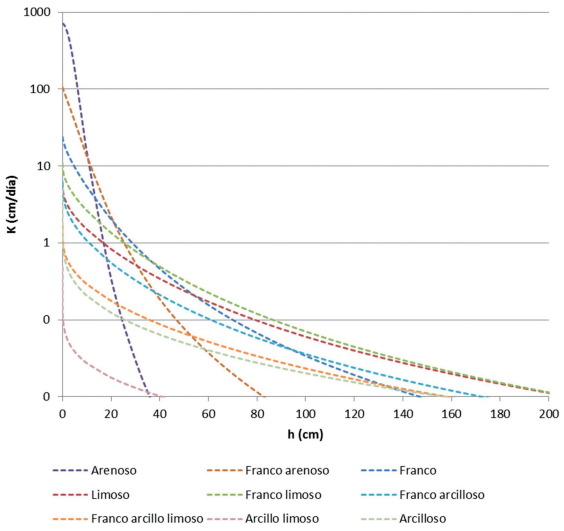
Modelos como el de Mualem (1976), basado en que el suelo está formado por multitud de tubos capilares interconectados, permite obtener la función de conductividad hidráulica insaturada *(K)* a partir de la curva de retención de agua en el suelo y de la conductividad hidráulica saturada *($K_s$)*:

$$K = K_s * S_e^l * \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \qquad (8)$$

en el cual *l* es un parámetro de conectividad entre poros adimensional, que suele tomar el valor de 0,5.

En la figura 8 se representan algunas curvas características de conductividad hidráulica para suelos de diferentes texturas. La variación de *K* con respecto a *h* es mucho mayor en suelos con capacidad drenante (arenas) que en suelos con poros de menor tamaño.

*Figura 8. Curvas de conductividad hidráulica en la ZNS*




### 3.7.3. SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA

Para analizar el flujo en la zona no saturada se han realizado tres simulaciones. La primera simulación se realiza con los parámetros hidráulicos predichos por funciones de edafo-transferencia. Posteriormente se calibran estos mismos parámetros en dos simulaciones adicionales, mediante la comparación de la humedad registrada por las sondas con la humedad calculada. Uno simula el ensayo del infiltrómetro de doble anillo y el otro simula el balance hidrológico natural con las condiciones de contorno meteorológicas.

El modelo matemático utilizado para las simulaciones es el descrito en el apartado 3.7.2 (modelo de van Genuchten-Mualem).

A veces, la dificultad de poder disponer de los parámetros de las ecuaciones de van Genuchten-Mualem de manera experimental hace necesaria la utilización de métodos alternativos. En este sentido se pueden utilizar las funciones de edafo-transferencia, que permiten inferir dichos parámetros a partir de una base de datos de parámetros de suelo calculados experimentalmente. Rosetta (Schaap et al., 2001) es un programa que de este modo proporciona los parámetros del modelo de van Genuchten-Mualem.

Los datos de entrada pueden ser desde únicamente la clase textural, hasta porcentaje de arena, limo y arcilla, la densidad aparente y el contenido de agua a -33 y -1500 kPa, en función de

los datos disponibles. A mayor cantidad de datos introducidos, más fiable serán los resultados proporcionados por Rosetta.

A pesar del gran número de muestras que se han analizado para generar la base de datos, no siempre puede garantizarse que la curva que se obtenga se adapte a la curva real del suelo.

Una alternativa a las funciones de edafo-transferencia es calibrar los parámetros hidráulicos a partir de los registros de humedad recogidos durante el ensayo del infiltrómetro de doble anillo, y a partir de los registros de humedad diarios del régimen natural del suelo.

Para la calibración de los parámetros hidráulicos ($\theta_s$, $\theta_r$, $\alpha$, $n$ y $K$): $\theta_s$ se fija con la respuesta de las sondas en el ensayo del infiltrómetro; $\theta_r$ se deja con los valores dados por el programa Rosetta. Quedando por determinar los parámetros $K$, $\alpha$, y $n$.

La determinación de estos parámetros puede realizarse con una herramienta que incorpora el programa, denominada solución inversa (calibración del modelo), a partir de valores observados de contenido de agua. No obstante, las pruebas realizadas con esta herramienta no dieron buenos resultados, ya que no tiene ningún control sobre el significado físico de los parámetros, únicamente se limita a minimizar errores. Por lo que la calibración se realizó por el método de prueba-error, variando los parámetros de las funciones de manera que la predicción del modelo se ajuste a las observaciones tanto como sea posible. Este método requiere repetir las simulaciones multitud de ocasiones y analizar los resultados obtenidos identificando visualmente el mejor ajuste.

Además de los parámetros hidráulicos, el resto de entradas del modelo se describen a continuación.

### Información geométrica

El flujo vertical a través de los tres horizontes se simula mediante un dominio de 106 cm de longitud. Distribuyendo los horizontes con sus espesores reales.

Se incluyen puntos de observación a la profundidad donde se colocaron las sondas de humedad (16, 38, y 60 cm). De esta manera se pueden comparar las humedades calculadas por el programa con las medidas en campo.

### Información sobre el tiempo a simular

Para la simulación del ensayo del infiltrómetro se elige un tiempo de 15 horas. Este es el tiempo en el que las tres sondas alcanzaron una humedad constante. Y la escala de tiempo de cálculo seleccionada fue la horaria.

Para las otras dos simulaciones, el periodo elegido es de 75 días. Y la escala de tiempo seleccionada fue la diaria.

### Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del suelo se hicieron corresponder con la humedad registrada por las sondas en cada horizonte.

### Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno están relacionadas con las atmosféricas (precipitación y evaporación) y sin permitir la acumulación de agua en superficie (sin encharcamiento).

Los datos meteorológicos utilizados son los de la estación de Marchamalo. Con la excepción de la precipitación de los días 12 y 21 de abril donde se introdujeron las precipitaciones de la estación de Armuña debido a que las sondas de humedad durante estos días no registraron una variación apreciable. Por el análisis también realizado en este mismo apartado, se desestimaron los primeros días con datos de humedad, simulando el periodo comprendido entre el 20 de febrero y el 5 de mayo (75 días).

La evaporación en la superficie del suelo puede resultar una componente importante en el balance de agua, según Campbell (1985) puede alcanzar un 10% del total de la evapotranspiración.

La intensidad de evaporación está relacionada con el tipo de suelo y con las condiciones climáticas. Las condiciones climáticas imponen la "evaporación potencial", que corresponde a la intensidad máxima de evaporación en una superficie de agua libre.

Después de un proceso de humectación (precipitación o riego) el suelo va secándose y la intensidad de evaporación decrece con el tiempo. La reducción de la intensidad no es lineal con el tiempo sino que pueden distinguirse 3 etapas (Philip, 1957; Ritchie, 1972). En la primera la intensidad es prácticamente constante y de magnitud igual a la evaporación potencial, el contenido de agua en el suelo se encuentra cercano al punto de saturación. La segunda etapa se caracteriza por una reducción en la intensidad de evaporación con respecto al valor potencial. En esta etapa, las propiedades hidráulicas del suelo juegan un papel importante. A medida que la reserva de agua en el suelo va agotándose, la fase líquida del suelo presenta discontinuidades y el flujo predominante se da por difusión del vapor de agua.

En la simulación realizada la evaporación es igual a la evaporación potencial mientras el potencial de presión en superficie sea superior a -100000 cm (valor recomendado por Hydrus), en caso contrario el programa aplica una reducción paulatina de la evaporación.

En la simulación del ensayo del infiltrómetro se sustituyen los datos de precipitación y evaporación por la condición de la altura de lámina de agua con la que se realizó el ensayo.

En la parte inferior del dominio de simulación se aplica una condición de drenaje libre, condición recomendada para los estudios de campo de flujo de agua y drenaje en la zona no saturada, cuando el nivel freático se encuentra por debajo del dominio de interés.

### Comparación de resultados

Para poder comparar los resultados entre simulaciones, se calcula la raíz cuadrada del error cuadrático medio:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (9)$$

En la que $P_i$ corresponde a los valores de predicción del modelo, $O_i$ corresponde a los valores observados en las sondas, y n el número de días.

# 4. RESULTADOS

## 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES EN CAMPO

De la calicata realizada se identifican los siguientes horizontes de arriba abajo (figura 9):

- Horizonte 1: profundidad de 0 a 8 cm. Suelo desarrollado con presencia de raíces, matriz compuesta por arenas-limosas y limos-arcillosos, presenta algo de plasticidad y se identifica como un suelo franco.
- Horizonte 2: profundidad de 8 a 30 cm. Gravas y cantos de tamaños variables. Bolos de hasta 8 cm de máximo y gravas de hasta 0,5 cm como mínimo. De matriz areno-limosa. Presencia de raíces en menor abundancia que el horizonte suprayacente. El límite con la unidad superior es neto e irregular.
- Horizonte 3: profundidad de 30 a 50 cm. Textura limo-arcillosa, bolos de hasta 8 cm y esporádicamente hasta 20 cm. Presenta una evidente plasticidad. Aparecen concreciones de carbono de manera esporádica y de una dimensión máxima de 1 cm. El límite con la capa inferior es difuso de unos 3 cm de espesor, donde la componente arcillosa va disminuyendo considerablemente.
- Horizonte 4: profundidad de 50 a 109 cm con textura areno-limosa con bastantes nódulos de carbono de hasta 3 cm. Se encuentran ocasionalmente granos de grava o clasto.
- Horizonte 5: Base de la calicata a una profundidad de más de 109 cm. Sedimento muy compacto con textura más arenosa que el horizonte 4. Se identifican granos de moscovita, pequeños nódulos de carbono de pocos mm y pequeños clastos de 3-4 mm de silicatos. Se destaca la presencia de zonas de color verdoso (que marca un ambiente reductor) debido posiblemente a la ocurrencia de episodios anóxicos.

*Figura 9. Calicata para identificación de horizontes*

La caracterización de los parámetros hidráulicos se realiza en los horizontes 2, 3 y 4. En lo sucesivo serán nombrados de esta forma.

## 4.2. DENSIDAD APARENTE

El cálculo de la densidad aparente se resume en la tabla 2.

*Tabla 2. Cálculo de la densidad aparente*

| Horizonte | Muestra | Peso seco (g) | Densidad aparente (g/ml) | Densidad aparente promedio (g/ml) |
|---|---|---|---|---|
| 2 | A | 170,87 | 1,71 | 1,62 |
| | B | 150,63 | 1,51 | |
| | C | 165,36 | 1,65 | |
| 3 | A | 174,86 | 1,75 | 1,68 |
| | B | 171,72 | 1,72 | |
| | C | 157,42 | 1,57 | |
| 4 | A | 141,89 | 1,42 | 1,56 |
| | B | 162,62 | 1,63 | |
| | C | 163,69 | 1,64 | |

El horizonte 2 tiene una proporción importante de elementos gruesos, por lo que la densidad calculada a partir de los cilindros de 100 ml es poco representativa.

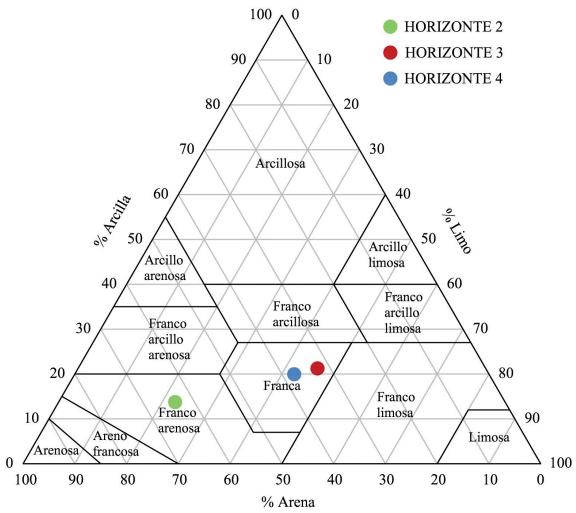
## 4.3. TEXTURA

Los resultados del método del densímetro se representan en la tabla 3 y en la figura 10.

*Tabla 3. Proporciones de las partículas minerales inferiores a 2 mm*

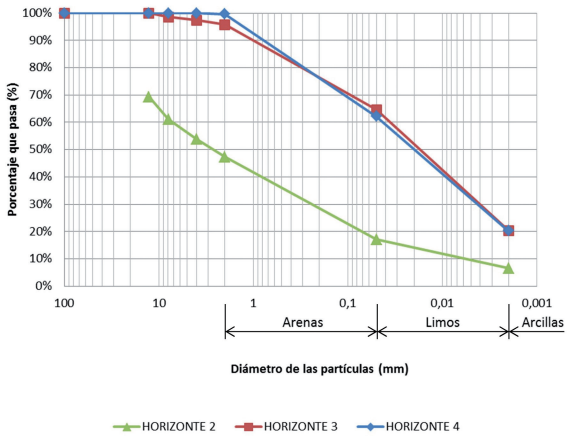
| Horizonte | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 63,75 | 22,50 | 13,75 | Franco arenosa |
| 3 | 32,50 | 46,25 | 21,25 | Franca |
| 4 | 37,64 | 42,40 | 19,96 | Franca |

*Figura 10. Triángulo de textura*



Con las fracciones representadas en el triángulo de textura se integran los datos en las curvas granulométricas. Estas curvas se muestran en la figura 11.

*Figura 11. Curvas granulométricas*




Los horizontes 3 y 4 están casi totalmente constituidos por la fracción fina. Mientras que el horizonte 2 tiene más de un 50% de gravas y cantos.

## 4.4. CALIBRACIÓN DE SONDAS DE HUMEDAD

El procedimiento descrito en el apartado 3.3 pudo ser aplicado para los horizontes 3 y 4. En cambio, para el horizonte 2, el quitar las piedras de mayor tamaño implica alterar significativamente la naturaleza del suelo. Pero no eliminarlas se traduce en una gran heterogeneidad alrededor de la sonda, lo que provoca que cada vez que se inserta la sonda, se obtienen lecturas muy variables. Para evitar dicho problema, la sonda se calibra con el suelo tamizado a 12,7 mm.

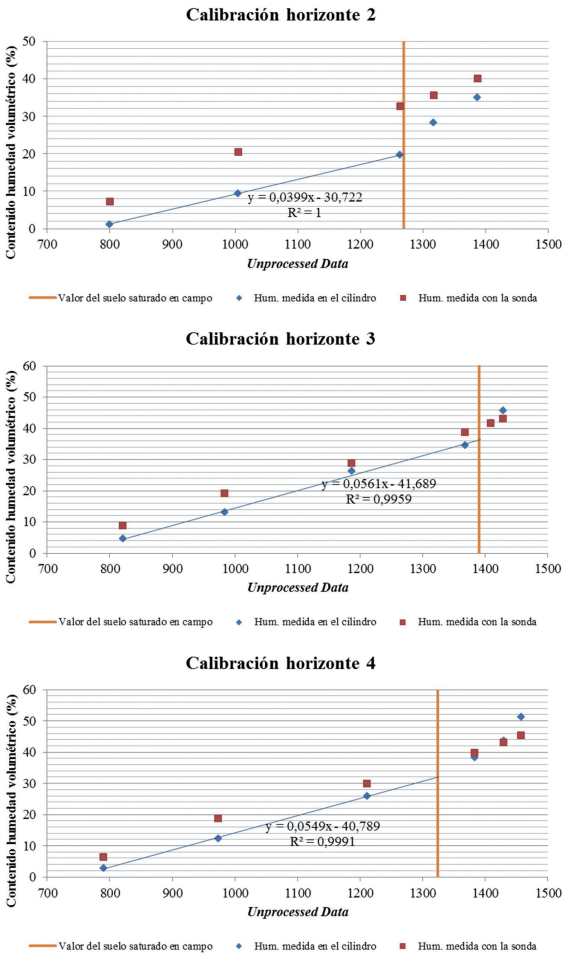
Otro problema añadido para el horizonte 2 es la imposibilidad de reproducir la densidad aparente en el laboratorio, debido a la estructura que presenta el sedimento en el campo. Este horizonte tiene una densidad aparente de 1,62 g/ml. En laboratorio, simplemente depositando el sedimento en el envase se obtiene 1,84 g/ml.

En la figura 12 se muestran los resultados de la calibración. Los puntos de mayor humedad no se ajustan bien a una recta. Sin embargo, si sólo se tienen en cuenta los puntos de humedad que se encuentran dentro del rango de humedad detectado en campo, el ajuste es mucho mejor.

La calibración del horizonte 2 da como resultados unos valores demasiado bajos para un suelo de estas características, por lo que se decide no utilizar esta calibración. Los valores de humedad para este horizonte vendrán determinados por la fórmula ofrecida por el fabricante del sensor.

Para las horizontes 3 y 4 la calibración se acepta, dando como resultado una humedad del orden de 0,04 m³/m³ inferior a la obtenida por la sonda. La precisión que garantiza *Decagon* es de ± 0,03 m³/m³.

*Figura 12. Calibración de las sondas de humedad*




## 4.5. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

### 4.5.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LABORATORIO

Los resultados de la conductividad hidráulica calculada en laboratorio se incluyen en la tabla 4.

*Tabla 4. Cálculo de la conductividad hidráulica en laboratorio*

| Horizonte | $K_s$ (cm/s) | V (ml) | L (cm) | A (cm²) | ΔH (cm) | t (s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 2,46E-05 | 3,4 | 9 | 70,9 | 58,6 | 300 |
| 3 | 1,31E-04 | 6,2 | 9 | 70,9 | 20,1 | 300 |
| 4 | 1,07E-04 | 5,5 | 9 | 70,9 | 21,7 | 300 |

### 4.5.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN CAMPO

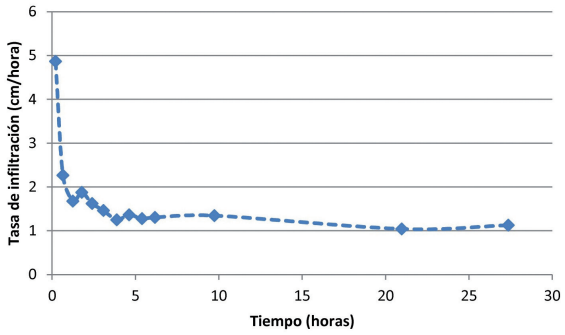
En la tabla 5 se muestran los resultados del ensayo. En la figura 13 se representa el tiempo frente a la tasa de infiltración obtenida en el ensayo del infiltrómetro de doble anillo, dando

como resultado final una conductividad hidráulica de la ZNS de aproximadamente 1 cm/hora. A diferencia del ensayo con el permeámetro, donde se obtienen valores para cada uno de los horizontes evaluados, con este ensayo se obtiene un único valor para todo el perfil del suelo.

*Tabla 5. Resultado del ensayo de infiltración*

| Medida | Tiempo | Tiempo acumulado (horas) | Nivel del agua inicial (cm) | Nivel del agua final (cm) | Descenso (cm) | Tasa de infiltración (cm/hora) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12'20" | 0,21 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 4,86 |
| 2 | 26'30" | 0,65 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 2,26 |
| 3 | 35'50" | 1,24 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,67 |
| 4 | 32'00" | 1,78 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,88 |
| 5 | 37'00" | 2,39 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,62 |
| 6 | 41'00" | 3,08 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,46 |
| 7 | 48'00" | 3,88 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,25 |
| 8 | 44'00" | 4,61 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,36 |
| 9 | 47'00" | 5,39 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,28 |
| 10 | 46'00" | 6,16 | 15,00 | 14,00 | 1,00 | 1,30 |
| 11 | 3h34' | 9,73 | 15,00 | 10,20 | 4,80 | 1,35 |
| 12 | 11h14' | 20,96 | 20,00 | 8,30 | 11,70 | 1,04 |
| 13 | 6h24' | 27,36 | 20,00 | 12,80 | 7,20 | 1,13 |

*Figura 13. Resultado del ensayo de infiltración*




El ensayo se empezó a realizar en unas condiciones muy húmedas: el horizonte 2 con una humedad de 0,250 $m^3/m^3$, a 0,079 $m^3/m^3$ de la saturación; el horizonte 3 con una humedad de 0,256 $m^3/m^3$, a 0,007 $m^3/m^3$ de la saturación; y el horizonte 4 con una humedad de 0,298 $m^3/m^3$, a 0,009 $m^3/m^3$ de la saturación.

### 4.5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Para poder comparar los datos de conductividad hidráulica de campo con los de laboratorio, se puede utilizar la ley de Darcy aplicada a un flujo perpendicular que atraviesa varias capas:

$$K_{sv} = \frac{B}{\sum_{i=1}^{n} \frac{b_i}{K_{si}}} \qquad (10)$$

siendo:

$K_{sv}$: conductividad hidráulica vertical equivalente [$LT^{-1}$]

$K_{si}$: conductividad hidráulica de cada una de las capas [$LT^{-1}$]

$b_i$: espesor de cada una de las capas [L]

B: espesor total, suma de todos los espesores [L]

Los resultados de la conductividad hidráulica calculado por los distintos procedimientos se resumen en la tabla 6. La conductividad hidráulica total se refiere a la calculada a partir de la ley de Darcy, excepto en el método del infiltrómetro que es directamente la velocidad de infiltración medida en el ensayo.

*Tabla 6. Comparación de la conductividad hidráulica*

| Horizonte | $K_s$ permeámetro (cm/s) | $K_s$ infiltrómetro (cm/s) | Espesor (cm) |
|---|---|---|---|
| 2 | 2,46E-05 | | 22 |
| 3 | 1,31E-04 | | 20 |
| 4 | 1,07E-04 | | 59 |
| Total | 6,32E-05 | 2,78E-04 | 101 |

## 4.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos de precipitación y ETP diarios, y sus gráficos correspondientes a las tres estaciones seleccionadas y al periodo de estudio establecido por los datos de humedad, entre el 13 de Febrero de 2014 y el 6 de Mayo, se adjuntan en el apéndice 1. En la tabla 7 se representa los datos totales y las medias diarias.

*Tabla 7. Datos meteorológicos totales y medias diarias*

| Estación | Precipitación total (mm) | Precipitación media diaria en días con precipitación (mm) | ETP total (mm) | ETP diaria media (mm) |
|---|---|---|---|---|
| Marchamalo | 111,37 | 4,28 | 216,55 | 2,64 |
| Armuña | 65,32 | 2,25 | 256,77 | 3,13 |
| Center | 55,25 | 2,13 | 252,74 | 3,08 |

Se puede observar la gran variabilidad de los datos meteorológicos, sobre todo de la estación de Marchamalo con respecto a las otras dos, tanto en precipitaciones como en ETP.

## 4.7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS DATOS DE HUMEDAD DE CAMPO

Los datos de las sondas de humedad analizados corresponden al mismo periodo que el descrito anteriormente.

El gráfico con todos estos datos registrados se incluye en el apéndice 2. En dicho gráfico se observa picos muy marcados en el horizonte 2 que corresponden a los días con mayor precipitación, se puede observar como los horizontes 3 y 4 los

cambios de humedad por dichos episodios de precipitación no son tan evidentes. También se ven unas oscilaciones diarias periódicas, más acentuadas cuanto más cerca de la superficie. Estas oscilaciones pueden estar provocadas por cambios en la temperatura del suelo. Cogiendo el periodo entre el 5 y 18 de marzo donde no hubo precipitaciones, las oscilaciones y hora donde se produzco la humedad máxima y mínima se detallan en la siguiente tabla 8:

*Tabla 8. Oscilaciones diarias de humedad por efecto de la temperatura del suelo*

| Horizonte | Hora de la máxima | Hora de la mínima | Oscilaciones de humedad ($cm^3/cm^3$) |
|---|---|---|---|
| 2 | 1:30-9:00 | 18:00-21:00 | 0,0032-0,0041 |
| 3 | 15:00-17:00 | 3:00-8:00 | 0,0011-0,0022 |
| 4 | 10:00-15:00 | 0:30-8:00 | 0,0011-0,0022 |

En el mismo apéndice 2 se representa la humedad máxima, mínima y media diaria para los tres horizontes.

En los horizontes 2 y 4 la tendencia de la humedad es a descender, mientras que el horizonte 3 tiende a mantener e incluso a aumentar ligeramente su humedad inicial. Esto indica un comportamiento hidráulico diferente entre horizontes, y una mayor capacidad de retención de agua del horizonte 3.

Para analizar mejor los datos de humedad, en la figura 14 se compara la humedad máxima diaria frente a las precipitaciones de las estaciones meteorológicas.

Entre el 12 y el 19 de febrero se detecta un comportamiento anómalo en el horizonte 4, este puede ser debido a la gran cantidad de agua que había en la calicata cuando se colocaron las sondas de humedad. Entre el 1 y 11 de febrero se recogieron 51,16 mm en la estación de Marchamalo, de los cuales 11,37 mm se registraron el día 11.

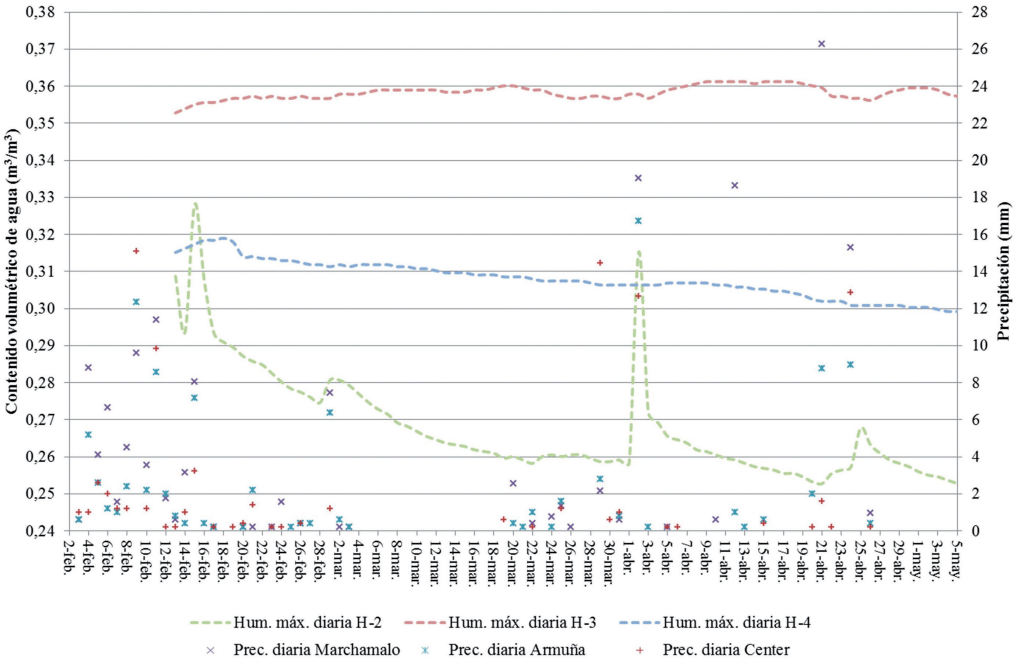
En los días siguientes a los principales eventos de precipitación, la tendencia del horizonte 3 es a aumentar su contenido de humedad, mientras que en el horizonte 4 tiende a estabilizarse.

Algunas precipitaciones importantes registradas en la estación más cercana (Marchamalo) apenas obtuvieron respuesta en la sonda de humedad del horizonte 2. Como ejemplo, el 12 y el 21 de Abril en esta estación se recogieron 18 y 26 mm, respectivamente, y no hubo un incremento apreciable en la humedad. Es posible que estos días no lloviera en la parcela o lo hiciera con menor intensidad. La respuesta de esta sonda se ve mejor si se analizan los datos de precipitación cada media hora. En el apéndice 3 se representan los principales eventos de precipitación con registros cada 30 minutos frente a los datos de humedad de la sonda del horizonte 2.

Entre las 21:30 del 14 de febrero y las 7:30 del 15 de febrero cayeron entre 2 y 7 mm (dependiendo de la estación), con intensidades entre 0,2-1 mm/30 min, provocando un incremento en la humedad de aproximadamente 3,5%. Este evento se puede relacionar mejor con la estación de Marchamalo y Center que con la de Armuña.

El 1 de marzo precipitaron entre 1 y 8 mm en 12 horas e intensidades de 0,2-0,6 mm/30 min. Provocando un incremento en la humedad de aproximadamente un 1%. A diferencia de los episodios de precipitaciones de días anteriores con similares características en intensidad y cantidad, aquí se empieza a dar una respuesta de la sonda menos inmediata (6 horas después de comenzada la precipitación) y menos pronunciada.

*Figura 14. Humedad del sedimento y precipitaciones*



El 2 de abril entre las 7:30 y las 14:30 se registraron entre 8 y 12 mm de lluvia, con intensidades de 0,2-2,8 mm/30 min, aunque no se produjo ningún incremento en la respuesta de la sonda.

Este mismo día entre las 17:00 y las 23:00 se registraron entre 4 y 7 mm de lluvia, con intensidades de 0,2-3,0 mm/30 min, que produjo un incremento brusco del 6% de humedad en apenas 30 min, para volver a descender rápidamente un 4%. Esto puede implicar una apertura de vía de flujo preferente en la zona de influencia de la sonda, o simplemente una anomalía en el funcionamiento de la sonda. La humedad empezó a incrementarse 12 horas después de que comenzase la precipitación.

El 24 de abril se registraron entre 9 y 15 mm en 14 horas con intensidades entre 0,2-2,8 mm/30 min, que empiezan a provocar un incremento de humedad del 1,5% al concluir la lluvia.

Del análisis general del comportamiento de la sonda del horizonte 2 se observa que los eventos de precipitación en la parcela de estudio no se pueden asociar, sin cometer grandes errores, a ninguna de las estaciones, incluso a la más cercana (Marchamalo) situada a escasos 7 km.

También es importante destacar el cambio de comportamiento de la capa superficial. Los primeros días con precipitaciones implicaban una respuesta rápida en la sonda de humedad del horizonte 2, después esta respuesta se fue haciendo mucho más lenta ante precipitaciones de similares características e incluso superiores, a excepción de lo ocurrido el día 2 de abril, ya comentado. Esto puede ser debido al denominado efecto salpicadura, donde las gotas de lluvia impactan sobre los agregados del suelo desprovisto de vegetación. La desintegración de los agregados lleva asociada una colmatación de los huecos en la capa superficial que hace disminuir la infiltración (Porta et al, 2003). Este cambio de comportamiento se podría evitar cubriendo el suelo con una grava.

Los descensos rápidos de humedad detectados después de las precipitaciones de los primeros días, pueden ser debidos a un drenaje horizontal subsuperficial del horizonte 2. La oscilación brusca del día 2 de abril también podría estar influida por este motivo. Este efecto está claramente influido por la poca capacidad de infiltración del horizonte 3.

## 4.8. PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS

De las funciones de edafo-transferencia y de las dos calibraciones a partir de los registros de humedad, se obtienen 3 conjuntos de parámetros hidráulicos. Las ecuaciones de edafo-transferencia dan unos valores más propios de suelos arenosos y francos. Mientras que los obtenidos de las calibraciones dan resultados de texturas más finas. A continuación se detallan estos resultados:

### 4.8.1. PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE EDAFO-TRANSFERENCIA

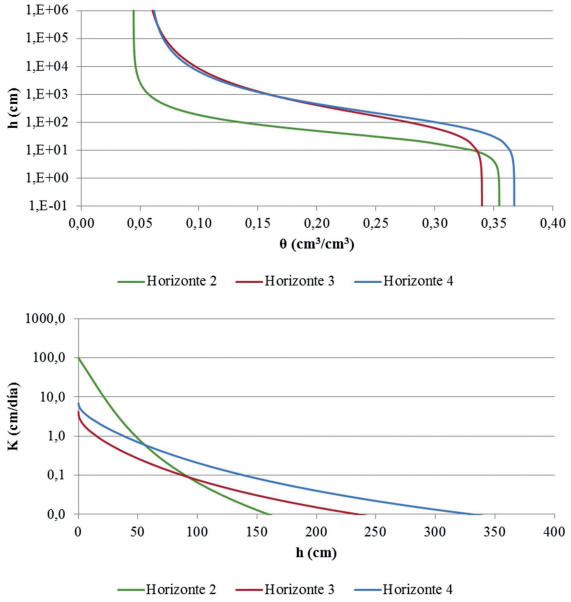
En la tabla 9 se indican los parámetros de las funciones de van Genuchten-Mualem obtenidas a partir de Rosetta. Para ello se ha utilizado el porcentaje de arena, limo y arcilla, y la densidad aparente.

*Tabla 9. Parámetros hidráulicos de la ZNS obtenidos a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia*

| Horizonte | $\theta_r$ (cm³/cm³) | $\theta_r$ (cm³/cm³) | Alpha (1/cm) | n | $K_s$ (cm/día) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0,0445 | 0,3547 | 0,0391 | 1,8673 | 100,14000 |
| 3 | 0,0534 | 0,3400 | 0,0125 | 1,3903 | 4,15001 |
| 4 | 0,0578 | 0,3674 | 0,0108 | 1,4673 | 6,84000 |

En la figura 15 se representan las funciones hidráulicas del suelo a partir de los parámetros obtenidos de Rosetta.

*Figura 15. Funciones hidráulicas de la ZNS obtenidas a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia*




### 4.8.2. PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DEL ENSAYO DE INFILTRACIÓN

En la tabla 10 se muestran los parámetros calibrados y en la figura 16 se representan las funciones hidráulicas del suelo a partir de estos parámetros.

*Tabla 10. Parámetros hidráulicos de la ZNS obtenidos a partir del ensayo de infiltración*

| Horizonte | $\theta_r$ (cm³/cm³) | $\theta_r$ (cm³/cm³) | Alpha (1/cm) | n | $K_s$ (cm/día) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0,045 | 0,324 | 0,040 | 1,600 | 3,840 |
| 3 | 0,053 | 0,363 | 0,010 | 1,200 | 0,600 |
| 4 | 0,058 | 0,306 | 0,010 | 1,300 | 1,440 |

*Figura 16. Funciones hidráulicas de la ZNS obtenidas a partir del ensayo de infiltración*

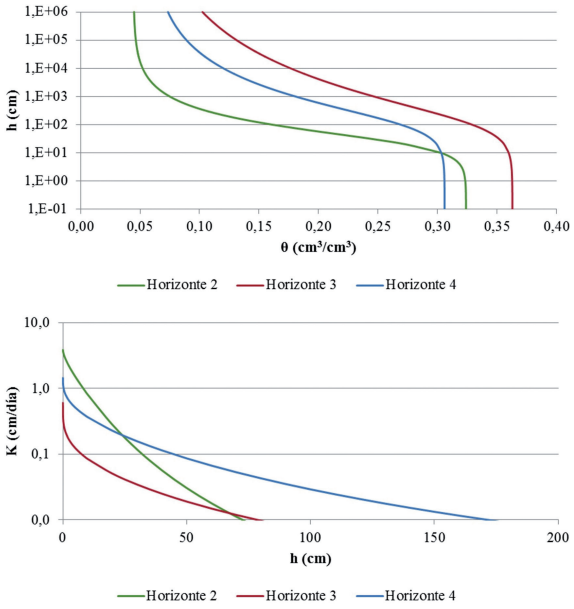
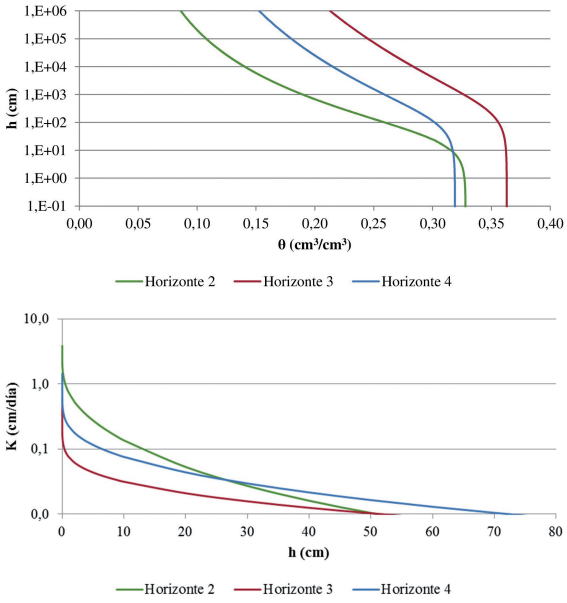



*Figura 17. Funciones hidráulicas de la ZNS obtenidas a partir de los datos diarios de las sondas*




### 4.8.3. PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE LOS DATOS DIARIOS DE LAS SONDAS

Después de muchas pruebas de calibración se adoptaron los mismos valores de conductividad hidráulica que los obtenidos en la calibración anterior, obteniendo buenos resultados.

Lo parámetros $\alpha$ y $n$ se calibran probando primero las diferentes combinaciones de la tabla 1, cuando se encontró la pareja que mejor reproducía las humedades registradas (según el RMSE), se fueron cambiando poco a poco hasta alcanzar el mejor ajuste, identificándolo visualmente.

También se probaron los parámetros calibrados en el apartado 4.8.2 pero no se obtuvo un buen ajuste, debido a que el suelo perdería más humedad que lo registrado por las sondas.

En la tabla 11 se muestran los parámetros calibrados y en la figura 17 se representan las funciones hidráulicas del suelo a partir de estos parámetros.

*Tabla 11. Parámetros hidráulicos de la ZNS obtenidos a partir de los datos diarios de las sondas*

| Horizonte | $\theta_r$ (cm³/cm³) | $\theta_r$ (cm³/cm³) | Alpha (1/cm) | n | $K_s$ (cm/día) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0,045 | 0,328 | 0,040 | 1,181 | 3,840 |
| 3 | 0,053 | 0,363 | 0,004 | 1,080 | 0,600 |
| 4 | 0,058 | 0,319 | 0,010 | 1,110 | 1,440 |

## 4.9. SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE AGUA EN LA ZNS

De cada conjunto de parámetros hidráulicos descritos en el apartado 4.8 se obtiene un resultado final de simulación. En la simulación realizada a partir de los parámetros de Rosetta no se consigue un buen ajuste. De las otras dos simulaciones realizadas a partir de los parámetros calibrados si se consigue un buen ajuste. A continuación se detallan los resultados.

### 4.9.1. SIMULACIÓN A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE EDAFO-TRANSFERENCIA

En la figura 18 se representan los contenidos de humedad simulados frente a la humedad medida en el campo y las precipitaciones. Se puede observar como la humedad de los tres horizontes decae mucho más rápidamente que lo indicado por las sondas de humedad. La humedad real registrada denota un comportamiento hidráulico de una textura más fina y compacta que la predicha por las ecuaciones de edafo-transferencia.

Los valores de RMSE obtenidos a través de esta simulación son de 0,1435, 0,0993 y 0,0340, para los horizontes 2, 3, y 4 respectivamente.

Se incluye en la tabla 12 un resumen del balance hídrico calculado por Hydrus-1D. No hay escorrentía, debido a que la intensidad de las precipitaciones simuladas es siempre inferior a la capacidad de infiltración del suelo. En el apéndice 4 se adjuntan los gráficos.

*Tabla 12. Balance hídrico a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia*

| Precipitación (mm) | Evaporación potencial (mm) | Evaporación real (mm) | Reserva inicial (mm) | Reserva final (mm) | Infiltración al subsuelo (mm) | Escorrentía (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 64,28 | 209,40 | 53,67 | 330,84 | 234,36 | 107,09 | 0,00 |

*Figura 18. Humedad simulada a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia*

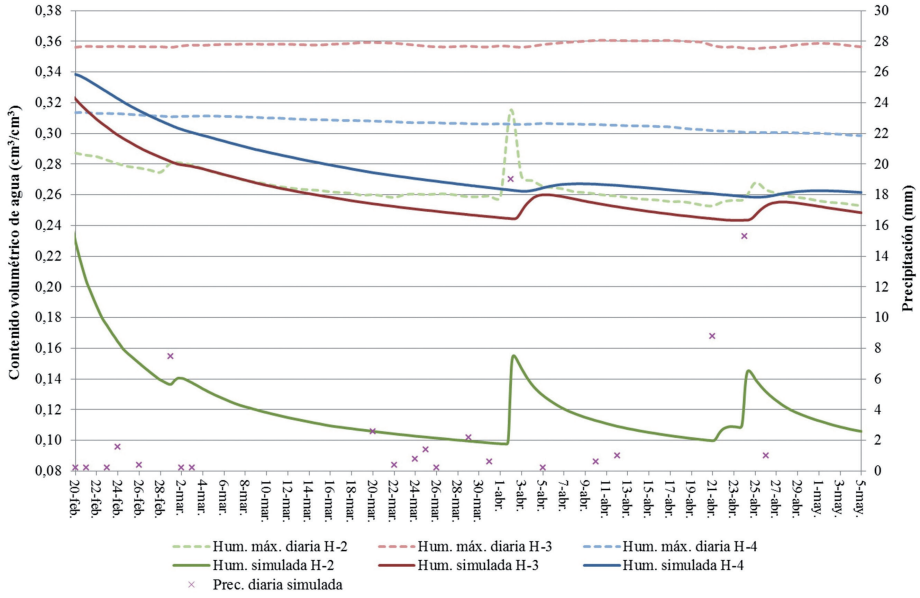
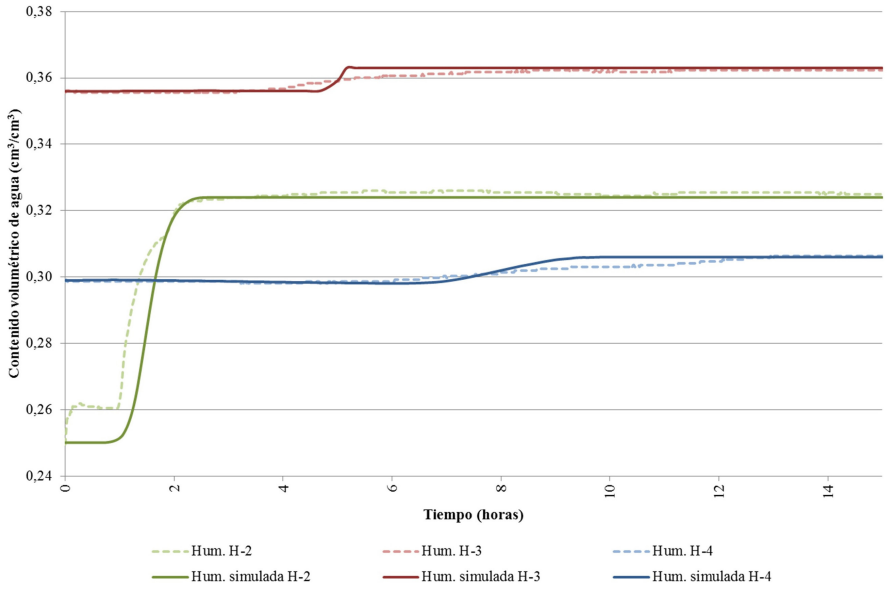



*Figura 19. Humedad simulada a partir de la calibración con el ensayo de infiltración*




### 4.9.2. SIMULACIÓN A PARTIR DE LA CALIBRACIÓN CON EL ENSAYO DE INFILTRACIÓN

En la figura 19 se representan los contenidos de humedad simulados frente a la humedad medida en el ensayo. Aproximadamente, la saturación en el punto de inserción de la sonda del horizonte 2 se alcanzó a las 2 horas, la del horizonte 3 a las 5 horas y la del horizonte 4 a las 9 horas. Se logra un buen ajuste, aunque hay un cierto desfase entre el frente de humectación simulado y el registrado por las sondas. Esto puede ser debido al hecho de que las sondas de humedad tienen un radio de influencia, mientras que la humedad simulada corresponde a un único punto.

Los valores de RMSE son de 0,0014, 0,0005 y 0,0006, para los horizontes 2, 3, y 4 respectivamente.

#### 4.9.3. SIMULACIÓN A PARTIR DE LA CALIBRACIÓN CON LOS DATOS DIARIOS DE LAS SONDAS

En la figura 20 se representan los contenidos de humedad simulados frente a la humedad medida en el campo y las precipitaciones. Se ve una correlación mucho mejor que la obtenida con los datos de Rosetta (apartado 4.9.1). Después de los principales eventos de precipitación, el horizonte 2 simulado presenta más humedad que la indicada por la sonda, esto es debido principalmente al hecho de que Hydrus-1D distribuye la precipitación diaria uniformemente a lo largo de todo el día, distribución que favorece la infiltración. También influye en gran medida el drenaje horizontal subsuperficial del horizonte 2. Este movimiento no se puede simular con un modelo unidimensional.

Los valores de RMSE son de 0,0109, 0,0019 y 0,0029, para los horizontes 2, 3, y 4 respectivamente.

Se incluye en la tabla 13 un resumen del balance hídrico calculado por Hydrus-1D. No hay escorrentía, debido a que la intensidad de las precipitaciones simuladas es siempre inferior a la capacidad de infiltración del suelo. En el apéndice 5 se adjuntan los gráficos.

## 5. DISCUSIÓN

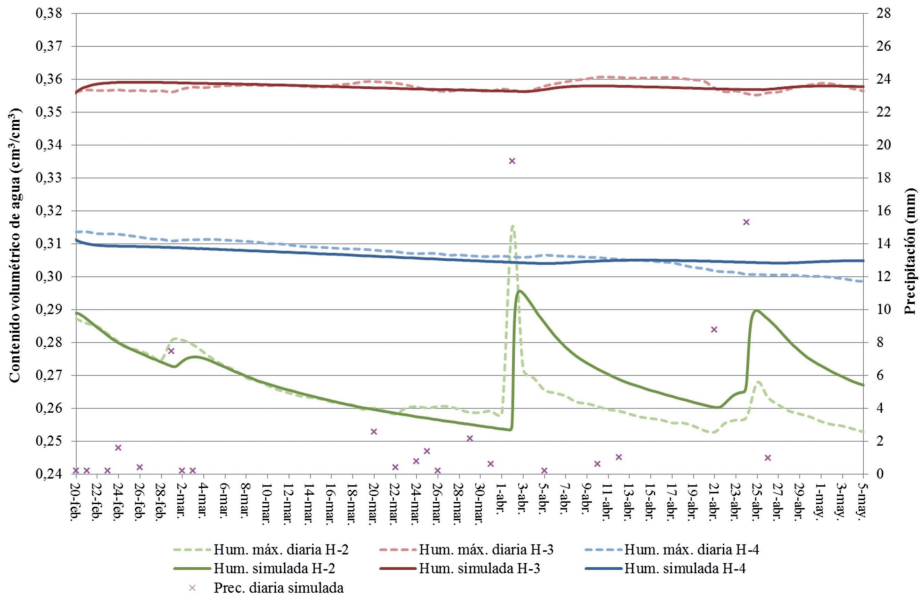
### 5.1. SOBRE LA DIFERENCIA ENTRE SIMULACIONES

La simulación realizada a partir de los parámetros de ecuaciones de edafo-transferencia da un comportamiento hidráulico con mayor capacidad de infiltración que lo indicado por los registros de humedad. Algo parecido sucede a partir de los parámetros calibrados con el ensayo de infiltración. Esto es debido a que los parámetros así obtenidos son propios de un suelo de textura más gruesa que la real. En cambio, los parámetros calibrados a partir de los datos diarios de las sondas, consiguen simular de manera más fiel el comportamiento del suelo, con mayor capacidad de retención y menor infiltración. Estos parámetros corresponden a un suelo de textura mucho más fina que los primeros.

*Tabla 13. Balance hídrico a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas*

| Precipitación (mm) | Evaporación potencial (mm) | Evaporación real (mm) | Reserva inicial (mm) | Reserva final (mm) | Infiltración al subsuelo (mm) | Escorrentía (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 64,28 | 209,40 | 70,30 | 332,64 | 316,61 | 9,99 | 0,00 |

*Figura 20. Humedad simulada a partir de la calibración con los datos diarios de las sondas*



## 5.2. SOBRE EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LA ZNS

Los análisis de laboratorio que determinan la textura indican un suelo franco para los horizontes 3 y 4, y franco arenoso para el horizonte 2. A una textura franca le correspondería una conductividad hidráulica y compacidad media, y una capacidad de retención media-alta. Mientras que para una textura gruesa le corresponde una conductividad hidráulica elevada, y una compacidad y capacidad de retención baja (Marañes et al., 1998). Y en este sentido las ecuaciones de edafo-transferencia del programa Rosetta proporcionan unos parámetros hidráulicos acordes a texturas de tipo franco y franco arenoso.

Sin embargo, el comportamiento hidráulico analizado a partir de los datos de las sondas de humedad y los resultados de las calibraciones, indican un comportamiento de un suelo con una textura más fina, compacta e impermeable, sobre todo el horizonte 3, que se estaría comportando con una velocidad de infiltración baja. En el apéndice 6 se muestra la velocidad de infiltración simulada de los diferentes horizontes. La velocidad de infiltración en los horizontes 3 y 4 nunca supera los 0,02 cm/día.

Este comportamiento también puede estar influido por la plasticidad y compacidad claramente identificada en campo. Las densidades aparentes obtenidas entre 1,56 y 1,68 g/cm³ indican una elevada compacidad para un suelo franco o arcilloso. Esto se debe a la heterogeneidad de la textura con una fracción importante de partículas finas, que al intercalarse entre las partículas más gruesas, dificultan el movimiento del agua. En la tabla 14 se indican los efectos de la densidad aparente sobre las condiciones de suelo en relación con la penetración de las raíces de las plantas (Hazelton et al., 2007). Y en la tabla 15 se da una escala general de la densidad aparente (Hazelton et al., 2007).

*Tabla 14. Efecto de la densidad aparente sobre las condiciones del suelo*

| Densidad aparente (g/cm³) | Suelo arenoso | Suelo franco | Suelo arcillosos |
|---|---|---|---|
| <1,0 | — | satisfactorio | satisfactorio |
| 1,0-1,2 | — | satisfactorio | satisfactorio |
| 1,2-1,4 | muy abierto | satisfactorio | algo compacto |
| 1,4-1,6 | satisfactorio | algo compacto | muy compacto |
| 1,6-1,8 | bastante compacto | muy compacto | altamente compacto |
| >1,8 | muy compacto | extremadamente compacto | extremadamente compacto |

*Tabla 15. Escala general de la densidad aparente*

| Densidad aparente (g/cm³) | Clasificación |
|---|---|
| <1,0 | muy baja |
| 1,0-1,3 | baja |
| 1,3-1,6 | moderada |
| 1,6-1,9 | alta |
| >1,9 | muy alta |

La compacidad suele estar relacionada con el tamaño de grano y más concretamente con su distribución. En el análisis granulométrico realizado se ve una distribución de material poco seleccionado o textura heterogénea. Aunque para la fracción fina solo se ha identificado la separación entre arenas, limos y arcillas; se podría mejorar este análisis si se realizara un procedimiento de densitometría que identificara un mayor número de fracciones. Una textura heterogénea implica menor porosidad, sobre todo cuando hay un cierto contenido de partículas finas que se van colocando entre las partículas más grandes.

El contenido de agua en saturación, relacionado con la porosidad, lo da la respuesta de las sondas de humedad en el ensayo de infiltración, en dicho ensayo se pudo medir la cantidad de agua en condiciones de saturación. Estos valores fueron de 32,8%, 36,3% y 31,9% para los horizontes 2, 3 y 4, respectivamente, que, en general, resultan bajos en comparación con los datos de la tabla 1 (Parámetros de las funciones hidráulicas para la zona no saturada), donde se dan unos valores del 43% para suelos francos y 41% para suelos franco arenosos. Incluso con la humedad que resultaría de las sondas de humedad sin calibrar, resultarían contenidos de humedad sensiblemente más bajos: 40,1% y 34,7% para los horizontes 3 y 4, respectivamente.

## 5.3. SOBRE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica obtenida en laboratorio es con frecuencia sólo una primera aproximación ya que es muy difícil que una columna de material represente la constitución media del horizonte, y menos aún si el material es suelto y disturbado, teniendo que reconstruir la muestra. Siendo muy difícil reproducir la estructura, textura y porosidad, y con frecuencia la muestra ha perdido arcillas y limos, los cuales afectan muy notablemente a la conductividad hidráulica. El grado de compactación de la muestra a ensayar puede influir de forma muy importante en los resultados (Custodio y Llamas, 2001).

Los datos calculados en laboratorio se muestran en la tabla 4 (Cálculo de la conductividad hidráulica en laboratorio). Los datos obtenidos para el horizonte 3 y 4 son casi idénticos y están dentro de lo esperado para un suelo franco. La conductividad hidráulica obtenida para el horizonte 2 resulta de menor conductividad hidráulica que las anteriores, aun teniendo una granulometría mucho más gruesa, y una estructura mucho más marcada.

La estructura que el horizonte 2 presenta en campo es difícilmente reproducible en laboratorio. Además la curva granulométrica marca una textura muy heterogénea con una fracción todavía importante de finos. Por lo que no resulta tan ilógico pensar que este horizonte desprovisto de su estructura natural pueda llegar a ser más impermeable que los horizontes 3 y 4.

Resulta más conveniente calcular la conductividad hidráulica en campo, a partir de la velocidad de infiltración. Algunos autores, e.g. Mathieu y Pieltain (1998 en Porta et al., 2003), consideran que la velocidad de infiltración para tiempos largos puede aproximarse al valor de la conductividad hidráulica saturada. Aunque es preciso señalar que, debido a los posibles flujos late-

rales que se producen en el ensayo de infiltración, dicho valor puede introducir importantes errores.

La conductividad hidráulica calculada por el método del infiltrómetro de doble anillo puede presentar el inconveniente de que en el ensayo se dé un flujo horizontal no controlado, sobre todo pensando en la estructura del horizonte 2, o alguna otra heterogeneidad, grieta o flujo preferente que no sea representativo de toda la parcela. Por lo que puede resultar lógico que dé resultados algo superiores a los reales. Para minimizar estas incertidumbres se podrían realizar otros ensayos en otros emplazamientos cercanos e incluso algún ensayo de infiltración por cada horizonte estudiado, sobre todo encima del horizonte 3, retirando para ello el horizonte 2.

### 5.4. SOBRE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

En la calibración realizada a partir del ensayo del infiltrómetro se observó mayor sensibilidad del modelo a la variación de la conductividad hidráulica de los horizontes 2 y 3, que al resto de parámetros hidráulicos. Este hecho puede justificarse debido a que cuanto más cerca se encuentra la ZNS de la saturación, menor influencia tendrá la fuerza de succión sobre la velocidad de infiltración, hasta que llega un momento en que la velocidad de infiltración coincidirá con la conductividad hidráulica saturada.

El ensayo se empezó a realizar en unas condiciones muy cercanas a la saturación, especialmente en los horizontes más profundos.

Para poder calibrar el resto de parámetros hidráulicos se debería realizar el ensayo en unas condiciones iniciales menos húmedas. Y para una mejor calibración de la conductividad hidráulica del horizonte 4 se necesitaría colocar una sonda de humedad en la parte inferior del mismo.

En la calibración realizada a partir de la respuesta diaria de las sondas de humedad en campo, el hecho de realizarla a una escala diaria, dificulta en exceso la calibración de la conductividad hidráulica.

Esta calibración resulta mucho más sensible al cambio de los parámetros de la curva de retención ($\theta_s$, $\theta_r$, $\alpha$, y $n$), donde se consiguen valores aceptables.

Es importante saber que la calibración de estos parámetros no es unívoca, es decir, dos o más conjuntos de parámetros calibrados pueden ser aplicados al problema en estudio (Radcliffe, 2010). Por lo que los resultados de todos estos parámetros se podrán asumir como una primera aproximación y deberían ser validados con ayuda de datos de potencial de succión obtenidos en laboratorio o en campo. También convendría simular el modelo en otra época del año, para ver el comportamiento a la humectación partiendo de unas condiciones iniciales más secas.

También se puede decir que para una mejor calibración sería necesario incorporar una estación meteorológica en la parcela en estudio, con registros horarios. De esta manera se podría introducir en el modelo una intensidad de la precipitación más real.

### 5.5. SOBRE LA CALIBRACIÓN DE LAS SONDAS

El proceso de calibración de sondas trata de establecer una función de correlación entre la respuesta de las sondas de humedad y el contenido de agua que el sedimento natural puede tener, cubriendo todo el rango de humedad, desde su estado seco hasta su capacidad máxima o contenido de agua en saturación.

Debido a la subjetividad de la determinación de visu de este punto de saturación, se invalidaron varios de los puntos de calibración obtenidos. Por lo que convendría calcular el contenido de agua en saturación antes de iniciar el ensayo.

A la vista de los resultados de la calibración del horizonte 2 y a la naturaleza de su textura y estructura. Cabe destacar la imposibilidad de realizar una buena calibración a partir de una muestra totalmente alterada.

## 6. CONCLUSIONES

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de las ecuaciones de edafo-transferencia del programa Rosetta son característicos de suelos de textura más gruesa que los suelos analizados, por lo que no permiten simular con éxito el comportamiento hidráulico real del mismo. El uso de este tipo de ecuaciones debe ser considerado con cautela y como una primera aproximación a la solución del problema.

En cambio, los parámetros hidráulicos calibrados son característicos de un suelo de textura fina y se consigue un buen ajuste entre las humedades calculadas por el modelo Hydrus-1D y las registradas por las sondas.

Teniendo en cuenta estos aspectos y lo discutido en el apartado 5, se concluye con que el comportamiento hidráulico de la ZNS analizada tiene una capacidad de infiltración y conductividad hidráulica baja, y capacidad de retención alta, como cabría esperar de un suelo de textura fina. Este comportamiento está claramente condicionado por el horizonte 3, con una marcada plasticidad y compacidad detectadas en campo.

Los parámetros hidráulicos adoptados como resultado final del estudio realizado, son los obtenidos en el proceso de calibración a partir de los datos diarios de las sondas (tabla 11).

No obstante, debido a que la calibración resulta compleja y comprobado por otros autores (Radcliffe, 2010) que varias combinaciones de parámetros pueden encontrar una solución óptima al modelo, es necesaria la validación de los resultados mediante la modelización en periodos más largos, que incluyan periodos con menor humedad en el suelo. Y como ayuda, sería conveniente disponer de datos de potencial de succión medidos en laboratorio o campo.

Cuando se trabaja a escala diaria, una limitación del modelo Hydrus-1D, está en la imposibilidad de modelizar un hietograma que simule un evento de precipitación real. Para poder modelizar un hietograma se necesitaría cambiar a escala horaria y disponer de esta información en las estaciones meteorológicas, que no siempre resulta sencillo.

También es necesario que los datos meteorológicos sean representativos y la mejor forma de garantizarlo es con la implantación de una estación meteorológica en la misma parcela de estudio.

El drenaje horizontal que presenta el horizonte 2, claramente influido por la baja capacidad de infiltración del horizonte 3, no puede ser correctamente simulado con un modelo unidimensional. Requiere un análisis con un modelo que posibilite el cálculo del flujo horizontal.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Buckingham E. 1907. *Studies on the movement of soil moisture.* Bulletin 38. ESDA Bureau of Soils. Washington, DC.

Campbell G.S. 1985. *Soil Physics with Basic.* Elsevier. New York.

Carsel R, Parrish R. 1988. *Developing joint probability of soil water retention characteristics.* Water Resources Research, 24(5), 755-769.

Casas A, Tapias J, de Bustamente I, Iglesias J.A, de Miguel A, Lillo J, Leal M, Candela L, Cabrera M.C, Palacios-Díaz P, Salas J.J, Martín I. 2011. *Guía metodológica para el uso de aguas regeneradas en riego y recarga de acuíferos.* Ed. Consolíder-Tragua.

Custodio E, Llamas M.R. 2001. *Hidrología subterránea.* Ed. Omega, Barcelona.

González-Naranjo V, Leal M, Lillo J, de Bustamante I, Palacios-Díaz P. 2012. *Guía de caracterización edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales.* Ed. Consolíder-Tragua.

Hazelton P, Murphy B. 2007. *Interpreting soil test results.* CSIRO Publishing.

Marañes A, Sánchez J.A, de Haro S, Sánchez S.T, del Moral F. 1998. *Análisis de suelos. Metodología e interpretación.* Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones, Almeria.

Mualem Y. 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.* Water Resour. Res. 12:513-522.

Philip J.R. 1957. *Evaporation, and moisture and heat fields in the soil.* Journal of Meteorology, 14, 354-366.

Porta J, López-Acevedo M, Roquero C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

Radcliffe, Elliot D, Simunek J. 2010. *Soil physics with HYDRUS.* Ed. Ringgold Inc.

Richards, L.A. 1931. *Capillary conduction of liquids in porous mediums.* Physics, 318-333.

Ritchie, J.T. 1972. *Model for predicting evaporation from a row crop at incomplete cover.* Water Resources Research, 8, 1204-1213.

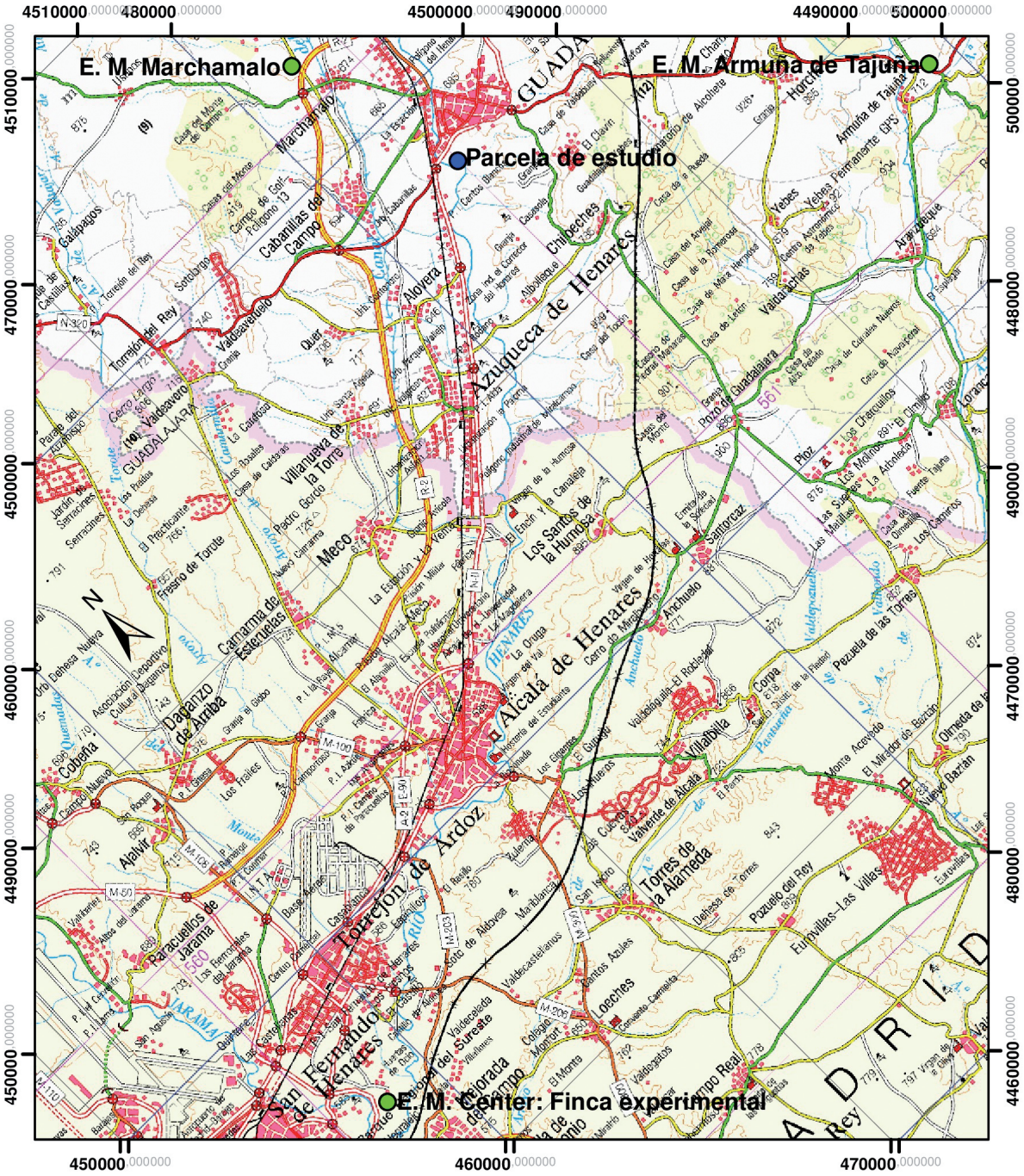
Schaap M. G., Leij F.J., van Genuchten M.T. (2001). *ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions.* Journal of Hydrology, 251, 163-176.

SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Riego). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <Accesible en URL: http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-sostenible-de-regadios/sistema-informacion-agroclimatica-regadio/Red-Estaciones-Agroclimaticas.aspx>.

van Genuchten, M.T. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* Soil Science Society of America Journal, 44(5), 318-333.

# 8. APÉNDICES

## 8.1. APÉNDICE 1. MAPA Y DATOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS




**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

PROYECTO FIN DE MASTER

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LA ZONA NO SATURADA EN UNA PARCELA EXPERIMENTAL PARA EL USO DE AGUAREGENERADA EN RIEGO

**SITUACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

0 2,5 5 10 15 Km

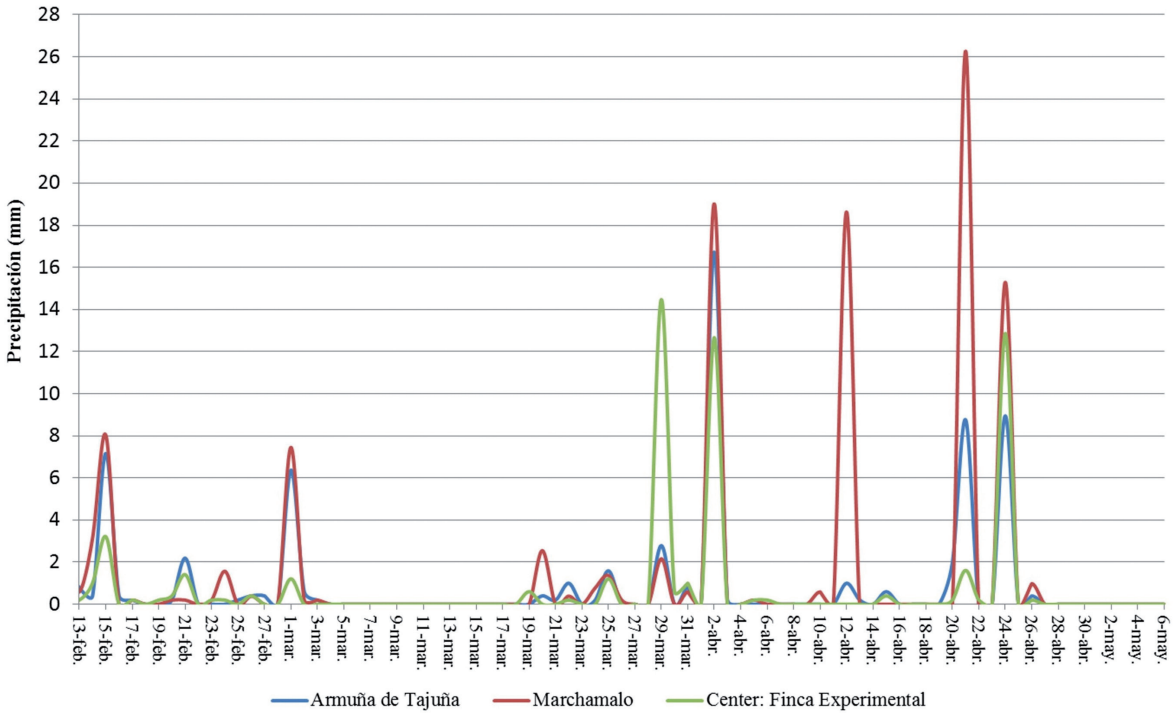
1:250.000

Proyección ETRS 1989 UTM Zona 30 N
Fuente: Mapa Geográfico Nacional 1:200.000 del IGN
Autor: Raúl Ortego Martínez

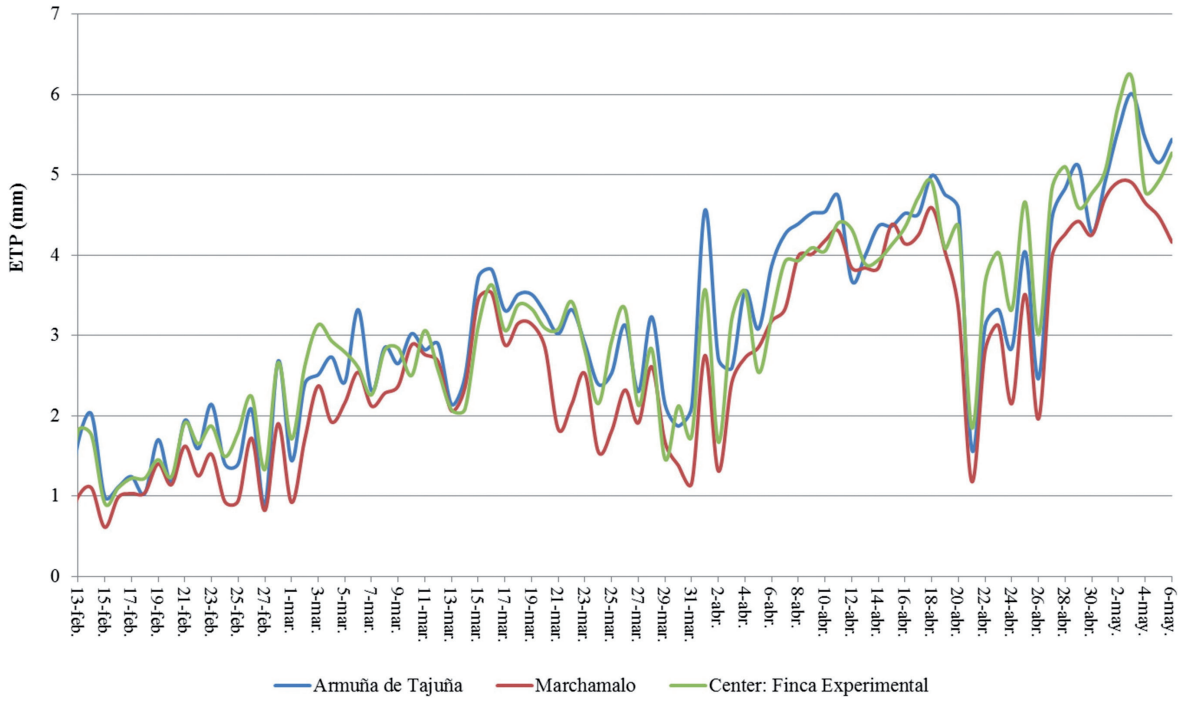
| | Armuña de Tajuña | | Marchamalo | | Center: Finca Experimental | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha | Precipitación (mm) | ETP (mm) | Precipitación (mm) | ETP (mm) | Precipitación (mm) | ETP (mm) |
| 13/02/2014 | 0,8 | 1,67 | 0,59 | 0,99 | 0,2 | 1,81 |
| 14/02/2014 | 0,4 | 2,02 | 3,14 | 1,1 | 1 | 1,76 |
| 15/02/2014 | 7,16 | 0,99 | 8,04 | 0,61 | 3,22 | 0,91 |
| 16/02/2014 | 0,4 | 1,11 | 0 | 0,98 | 0 | 1,1 |
| 17/02/2014 | 0,2 | 1,24 | 0,2 | 1,03 | 0,2 | 1,22 |
| 18/02/2014 | 0 | 1,03 | 0 | 1,04 | 0 | 1,22 |
| 19/02/2014 | 0 | 1,7 | 0 | 1,4 | 0,2 | 1,45 |
| 20/02/2014 | 0,2 | 1,17 | 0,2 | 1,14 | 0,4 | 1,24 |
| 21/02/2014 | 2,19 | 1,94 | 0,2 | 1,62 | 1,41 | 1,91 |
| 22/02/2014 | 0 | 1,59 | 0 | 1,25 | 0 | 1,65 |
| 23/02/2014 | 0 | 2,14 | 0,2 | 1,52 | 0,2 | 1,87 |
| 24/02/2014 | 0 | 1,4 | 1,57 | 0,93 | 0,2 | 1,49 |
| 25/02/2014 | 0,2 | 1,4 | 0 | 0,94 | 0 | 1,79 |
| 26/02/2014 | 0,4 | 2,08 | 0,39 | 1,72 | 0,4 | 2,24 |
| 27/02/2014 | 0,4 | 0,89 | 0 | 0,82 | 0 | 1,33 |
| 28/02/2014 | 0 | 2,68 | 0 | 1,9 | 0 | 2,66 |
| 01/03/2014 | 6,37 | 1,44 | 7,45 | 0,92 | 1,21 | 1,71 |
| 02/03/2014 | 0,6 | 2,4 | 0,2 | 1,71 | 0 | 2,62 |
| 03/03/2014 | 0,2 | 2,51 | 0,2 | 2,37 | 0 | 3,13 |
| 04/03/2014 | 0 | 2,73 | 0 | 1,92 | 0 | 2,93 |
| 05/03/2014 | 0 | 2,42 | 0 | 2,16 | 0 | 2,79 |
| 06/03/2014 | 0 | 3,32 | 0 | 2,54 | 0 | 2,6 |
| 07/03/2014 | 0 | 2,31 | 0 | 2,12 | 0 | 2,26 |
| 08/03/2014 | 0 | 2,85 | 0 | 2,28 | 0 | 2,82 |
| 09/03/2014 | 0 | 2,65 | 0 | 2,37 | 0 | 2,84 |
| 10/03/2014 | 0 | 3,02 | 0 | 2,88 | 0 | 2,5 |
| 11/03/2014 | 0 | 2,82 | 0 | 2,76 | 0 | 3,06 |
| 12/03/2014 | 0 | 2,89 | 0 | 2,67 | 0 | 2,56 |
| 13/03/2014 | 0 | 2,14 | 0 | 2,06 | 0 | 2,07 |
| 14/03/2014 | 0 | 2,48 | 0 | 2,35 | 0 | 2,08 |
| 15/03/2014 | 0 | 3,72 | 0 | 3,45 | 0 | 3,12 |
| 16/03/2014 | 0 | 3,82 | 0 | 3,53 | 0 | 3,63 |
| 17/03/2014 | 0 | 3,31 | 0 | 2,88 | 0 | 3,06 |
| 18/03/2014 | 0 | 3,51 | 0 | 3,15 | 0 | 3,38 |
| 19/03/2014 | 0 | 3,51 | 0 | 3,14 | 0,6 | 3,33 |
| 20/03/2014 | 0,4 | 3,28 | 2,55 | 2,85 | 0 | 3,09 |
| 21/03/2014 | 0,2 | 3,02 | 0 | 1,83 | 0 | 3,08 |
| 22/03/2014 | 1 | 3,32 | 0,39 | 2,14 | 0,2 | 3,42 |
| 23/03/2014 | 0 | 2,89 | 0 | 2,52 | 0 | 2,81 |
| 24/03/2014 | 0,2 | 2,39 | 0,78 | 1,55 | 0 | 2,15 |
| 25/03/2014 | 1,59 | 2,53 | 1,37 | 1,81 | 1,21 | 2,93 |
| 26/03/2014 | 0 | 3,13 | 0,2 | 2,32 | 0 | 3,33 |
| 27/03/2014 | 0 | 2,3 | 0 | 1,91 | 0 | 2,13 |
| 28/03/2014 | 0 | 3,23 | 0 | 2,61 | 0 | 2,83 |
| 29/03/2014 | 2,79 | 2,14 | 2,16 | 1,67 | 14,47 | 1,46 |
| 30/03/2014 | 0 | 1,87 | 0 | 1,38 | 0,6 | 2,12 |
| 31/03/2014 | 0,8 | 2,11 | 0,59 | 1,16 | 1 | 1,75 |

| | Armuña de Tajuña | | Marchamalo | | Center: Finca Experimental | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha | Precipitación (mm) | ETP (mm) | Precipitación (mm) | ETP (mm) | Precipitación (mm) | ETP (mm) |
| 01/04/2014 | 0 | 4,56 | 0 | 2,75 | 0 | 3,57 |
| 02/04/2014 | 16,72 | 2,71 | 19,01 | 1,31 | 12,66 | 1,67 |
| 03/04/2014 | 0,2 | 2,59 | 0 | 2,41 | 0 | 3,2 |
| 04/04/2014 | 0 | 3,55 | 0 | 2,72 | 0 | 3,55 |
| 05/04/2014 | 0 | 3,08 | 0,2 | 2,85 | 0,2 | 2,54 |
| 06/04/2014 | 0 | 3,87 | 0 | 3,18 | 0,2 | 3,24 |
| 07/04/2014 | 0 | 4,26 | 0 | 3,33 | 0 | 3,92 |
| 08/04/2014 | 0 | 4,39 | 0 | 3,99 | 0 | 3,93 |
| 09/04/2014 | 0 | 4,52 | 0 | 4,01 | 0 | 4,09 |
| 10/04/2014 | 0 | 4,54 | 0,59 | 4,18 | 0 | 4,05 |
| 11/04/2014 | 0 | 4,73 | 0 | 4,3 | 0 | 4,4 |
| 12/04/2014 | 1 | 3,68 | 18,62 | 3,84 | 0 | 4,32 |
| 13/04/2014 | 0,2 | 3,99 | 0 | 3,84 | 0 | 3,89 |
| 14/04/2014 | 0 | 4,36 | 0 | 3,84 | 0 | 3,94 |
| 15/04/2014 | 0,6 | 4,36 | 0 | 4,38 | 0,4 | 4,13 |
| 16/04/2014 | 0 | 4,52 | 0 | 4,14 | 0 | 4,35 |
| 17/04/2014 | 0 | 4,51 | 0 | 4,25 | 0 | 4,72 |
| 18/04/2014 | 0 | 4,99 | 0 | 4,59 | 0 | 4,91 |
| 19/04/2014 | 0 | 4,75 | 0 | 4,04 | 0 | 4,08 |
| 20/04/2014 | 1,99 | 4,57 | 0 | 3,32 | 0,2 | 4,35 |
| 21/04/2014 | 8,76 | 1,58 | 26,26 | 1,18 | 1,61 | 1,85 |
| 22/04/2014 | 0 | 3,12 | 0 | 2,81 | 0,2 | 3,66 |
| 23/04/2014 | 0 | 3,32 | 0 | 3,12 | 0 | 4,03 |
| 24/04/2014 | 8,95 | 2,84 | 15,29 | 2,15 | 12,86 | 3,32 |
| 25/04/2014 | 0 | 4,04 | 0 | 3,51 | 0 | 4,66 |
| 26/04/2014 | 0,4 | 2,46 | 0,98 | 1,96 | 0,2 | 3,01 |
| 27/04/2014 | 0 | 4,45 | 0 | 3,97 | 0 | 4,82 |
| 28/04/2014 | 0 | 4,83 | 0 | 4,26 | 0 | 5,1 |
| 29/04/2014 | 0 | 5,11 | 0 | 4,42 | 0 | 4,59 |
| 30/04/2014 | 0 | 4,28 | 0 | 4,25 | 0 | 4,77 |
| 01/05/2014 | 0 | 4,92 | 0 | 4,71 | 0 | 5,05 |
| 02/05/2014 | 0 | 5,57 | 0 | 4,91 | 0 | 5,87 |
| 03/05/2014 | 0 | 6,01 | 0 | 4,9 | 0 | 6,21 |
| 04/05/2014 | 0 | 5,45 | 0 | 4,65 | 0 | 4,79 |
| 05/05/2014 | 0 | 5,15 | 0 | 4,48 | 0 | 4,92 |
| 06/05/2014 | 0 | 5,44 | 0 | 4,16 | 0 | 5,27 |

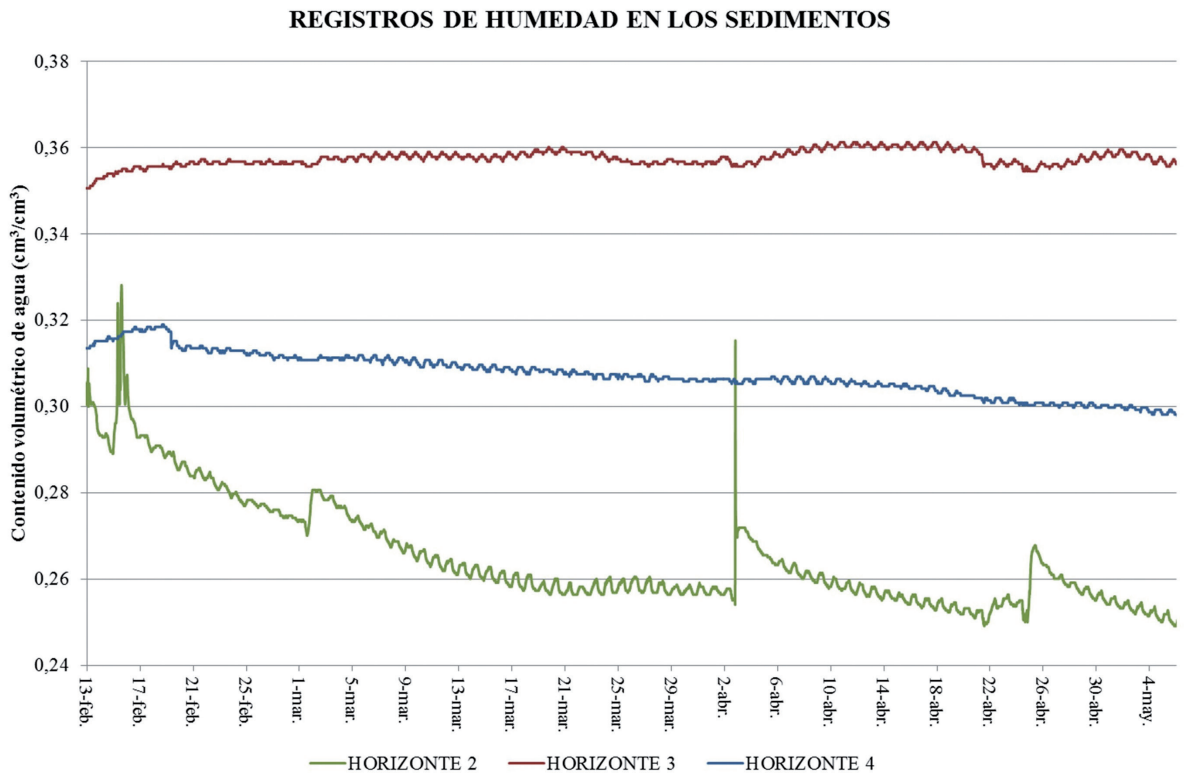
**PRECIPITACIÓN DIARIA**

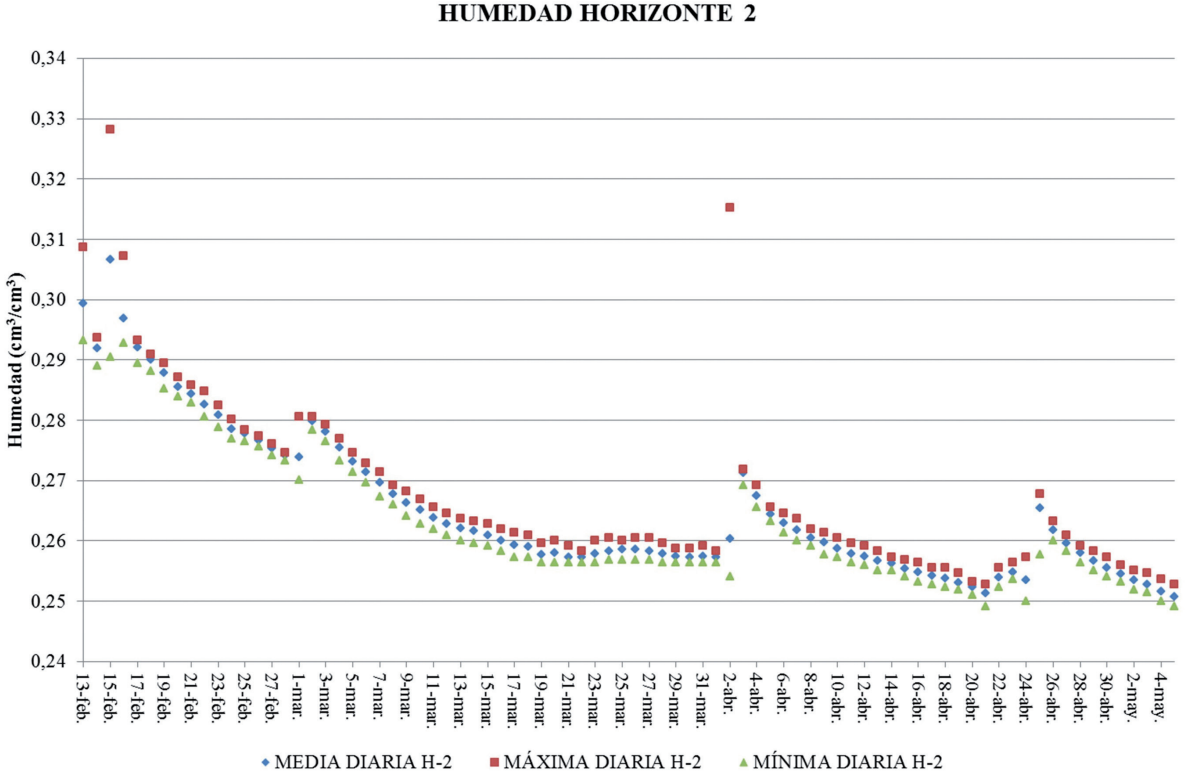


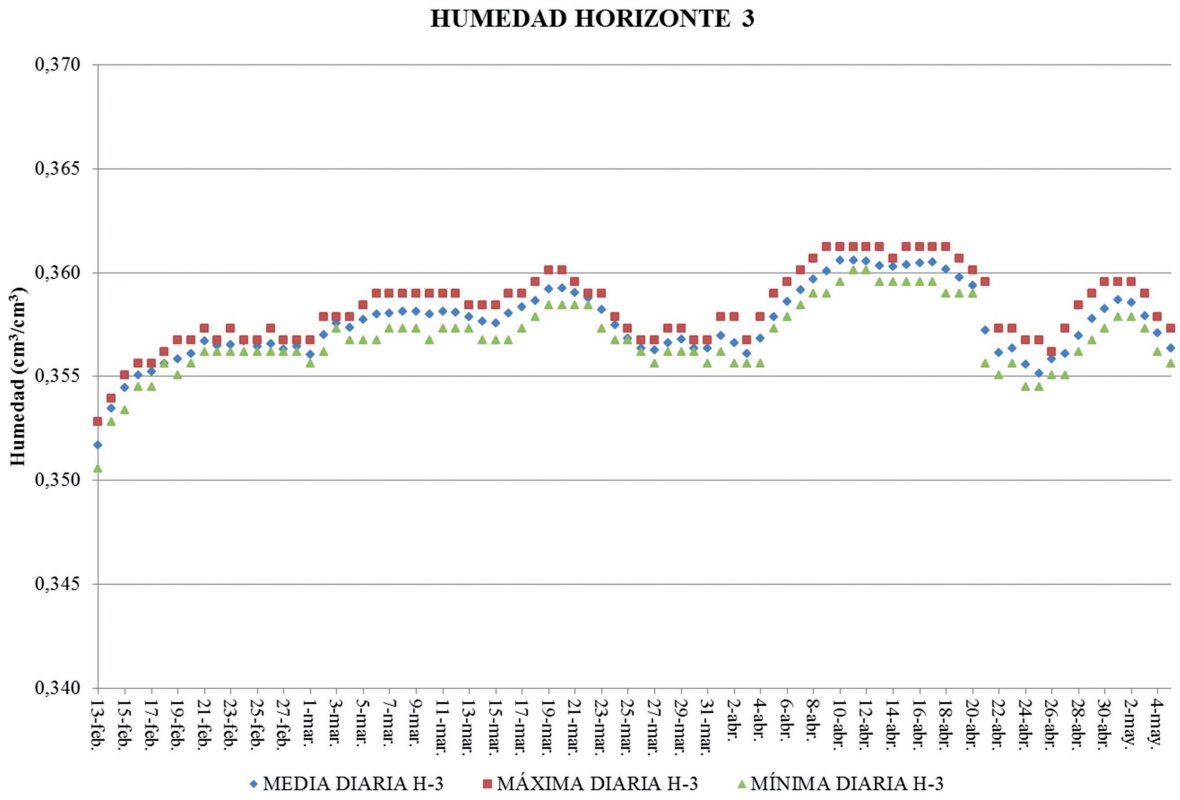

**EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL**

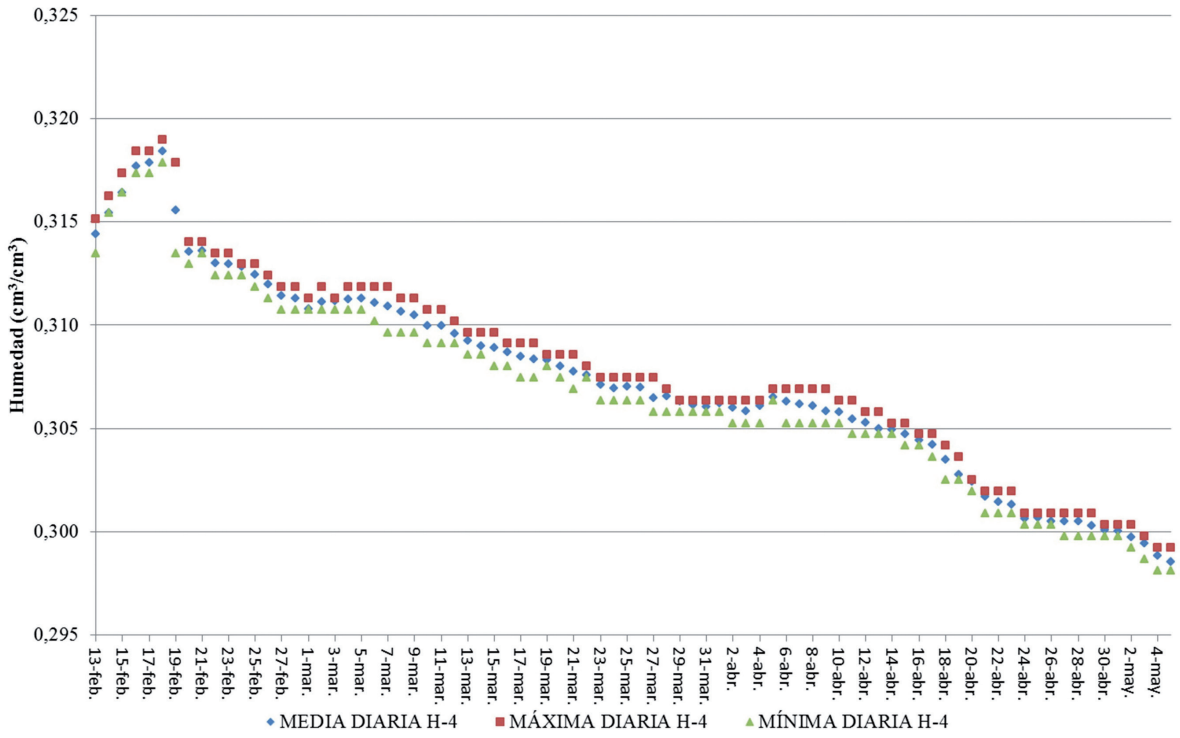


## 8.2. APÉNDICE 2. GRÁFICO CON REGISTROS DE HUMEDAD CALIBRADOS

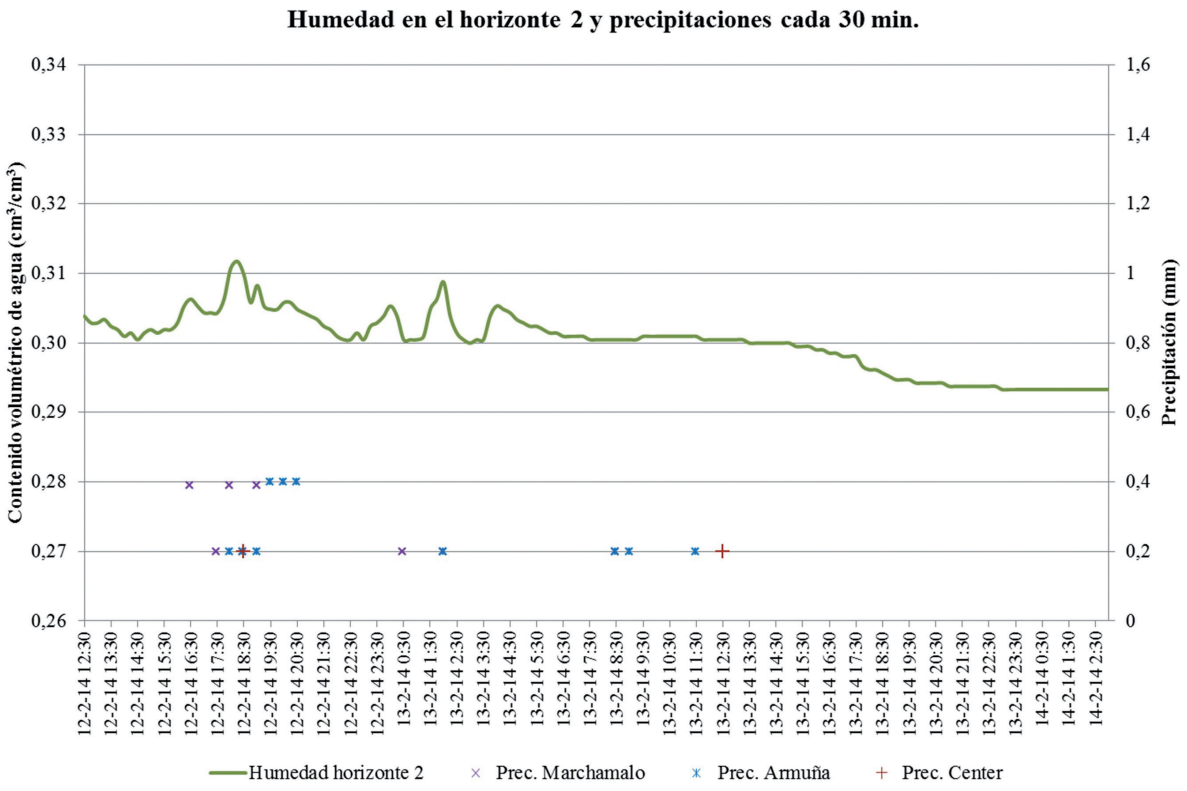


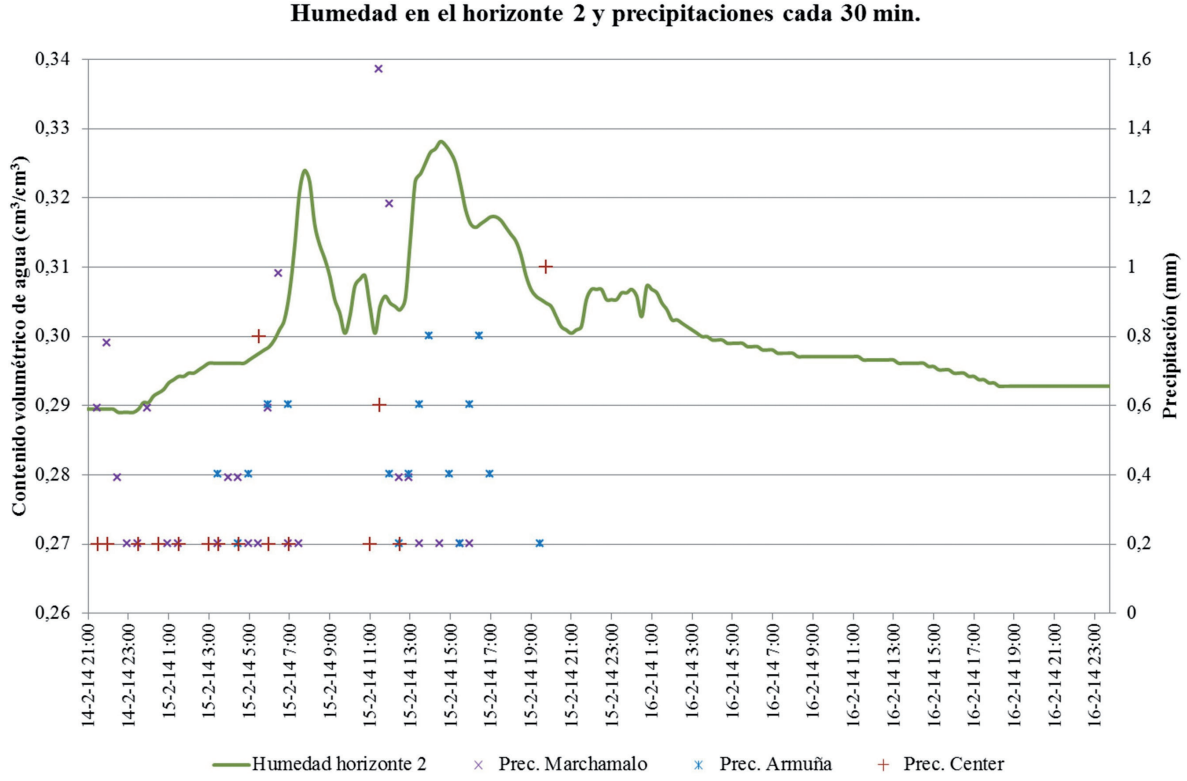



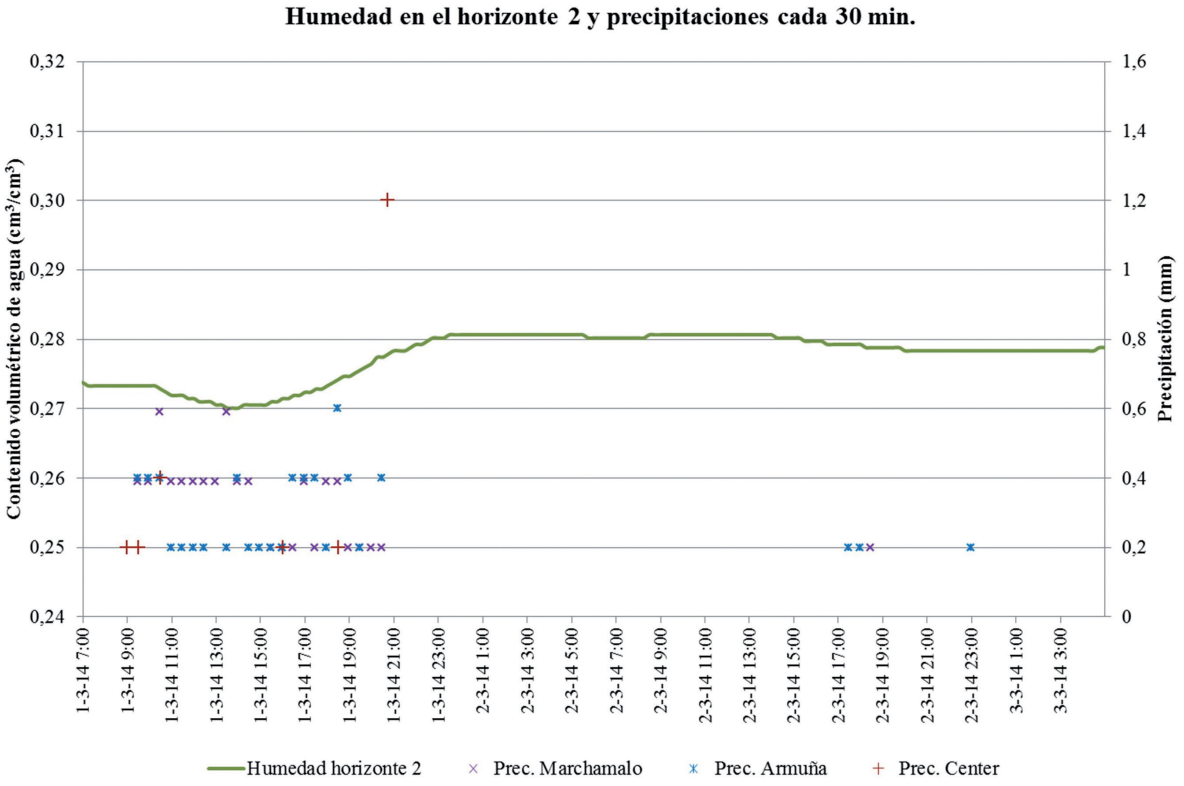

HUMEDAD HORIZONTE 3
Humedad (cm³/cm³)
0,370
0,365
0,360
0,355
0,350
0,345
0,340
13-feb. 15-feb. 17-feb. 19-feb. 21-feb. 23-feb. 25-feb. 27-feb. 1-mar. 3-mar. 5-mar. 7-mar. 9-mar. 11-mar. 13-mar. 15-mar. 17-mar. 19-mar. 21-mar. 23-mar. 25-mar. 27-mar. 29-mar. 31-mar. 2-abr. 4-abr. 6-abr. 8-abr. 10-abr. 12-abr. 14-abr. 16-abr. 18-abr. 20-abr. 22-abr. 24-abr. 26-abr. 28-abr. 30-abr. 2-may. 4-may.
MEDIA DIARIA H-3
MÁXIMA DIARIA H-3
MÍNIMA DIARIA H-3

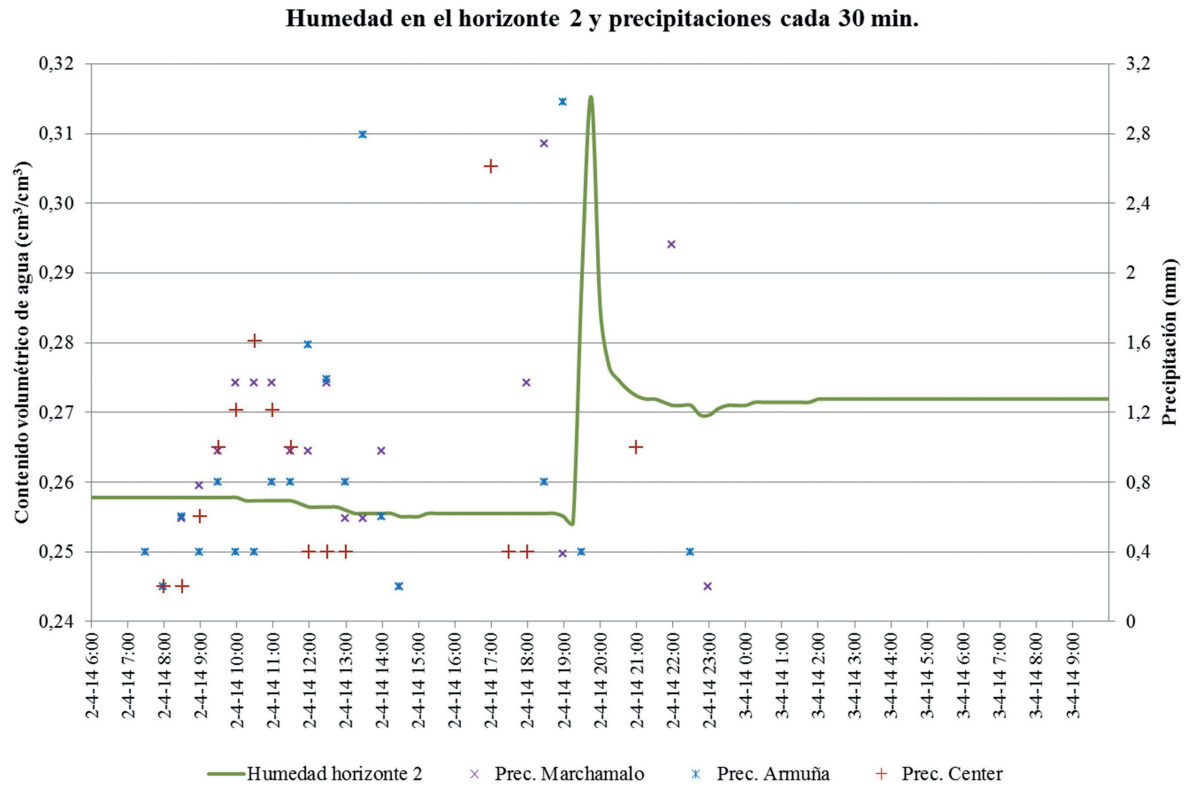

HUMEDAD HORIZONTE 4
Humedad (cm³/cm³)
0,325
0,320
0,315
0,310
0,305
0,300
0,295
13-feb. 15-feb. 17-feb. 19-feb. 21-feb. 23-feb. 25-feb. 27-feb. 1-mar. 3-mar. 5-mar. 7-mar. 9-mar. 11-mar. 13-mar. 15-mar. 17-mar. 19-mar. 21-mar. 23-mar. 25-mar. 27-mar. 29-mar. 31-mar. 2-abr. 4-abr. 6-abr. 8-abr. 10-abr. 12-abr. 14-abr. 16-abr. 18-abr. 20-abr. 22-abr. 24-abr. 26-abr. 28-abr. 30-abr. 2-may. 4-may.
MEDIA DIARIA H-4
MÁXIMA DIARIA H-4
MÍNIMA DIARIA H-4

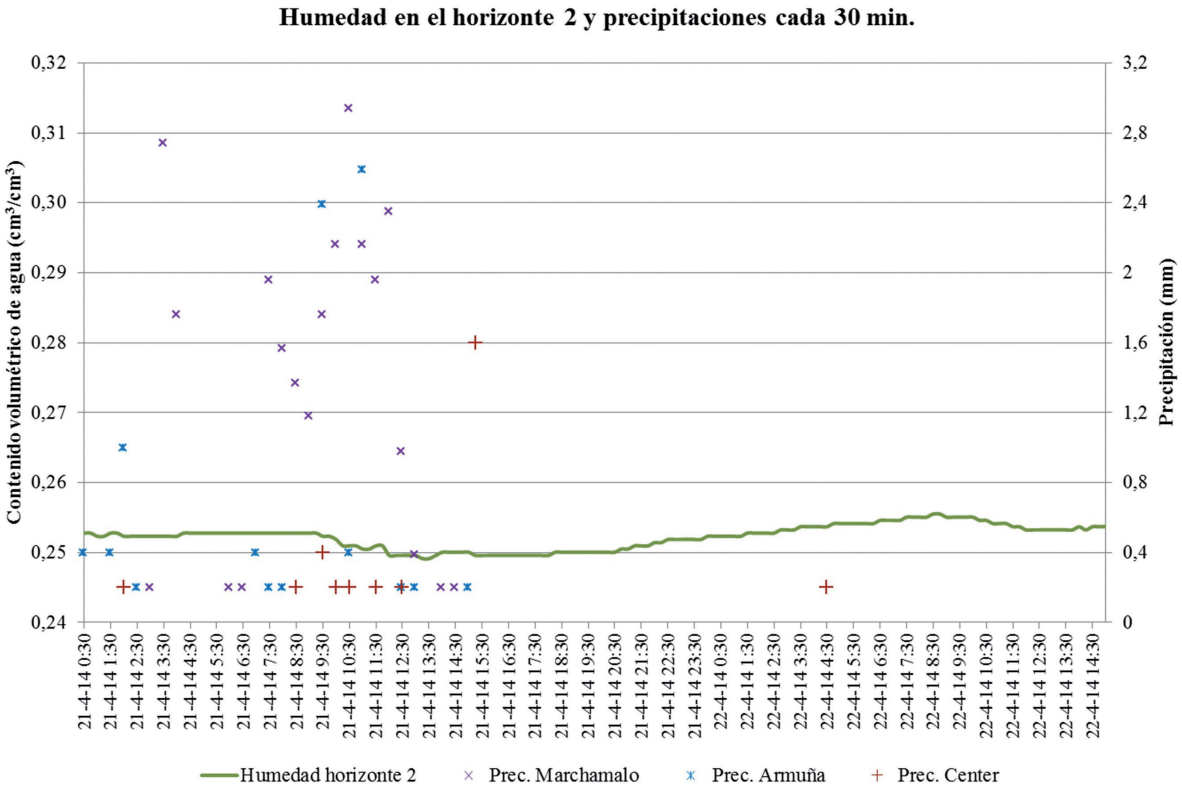
## 8.3. APÉNDICE 3. GRÁFICOS CON PRECIPITACIONES CADA 30 MIN

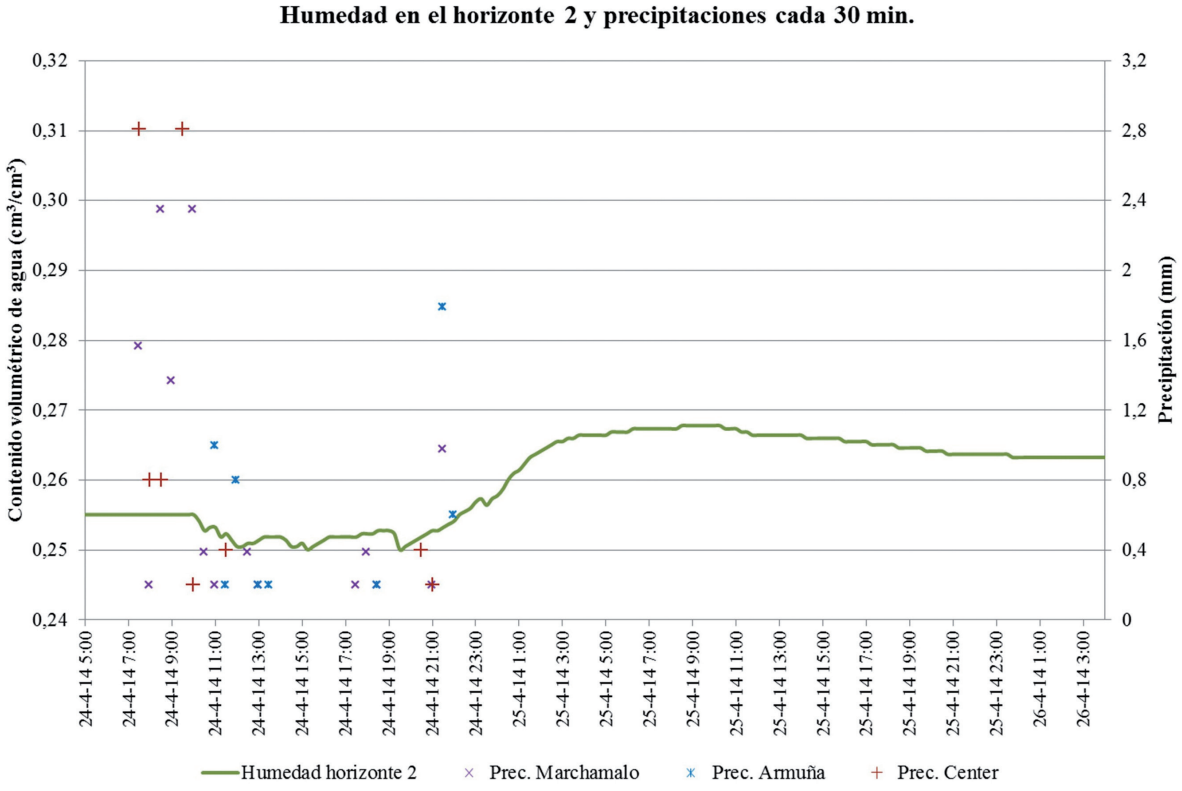


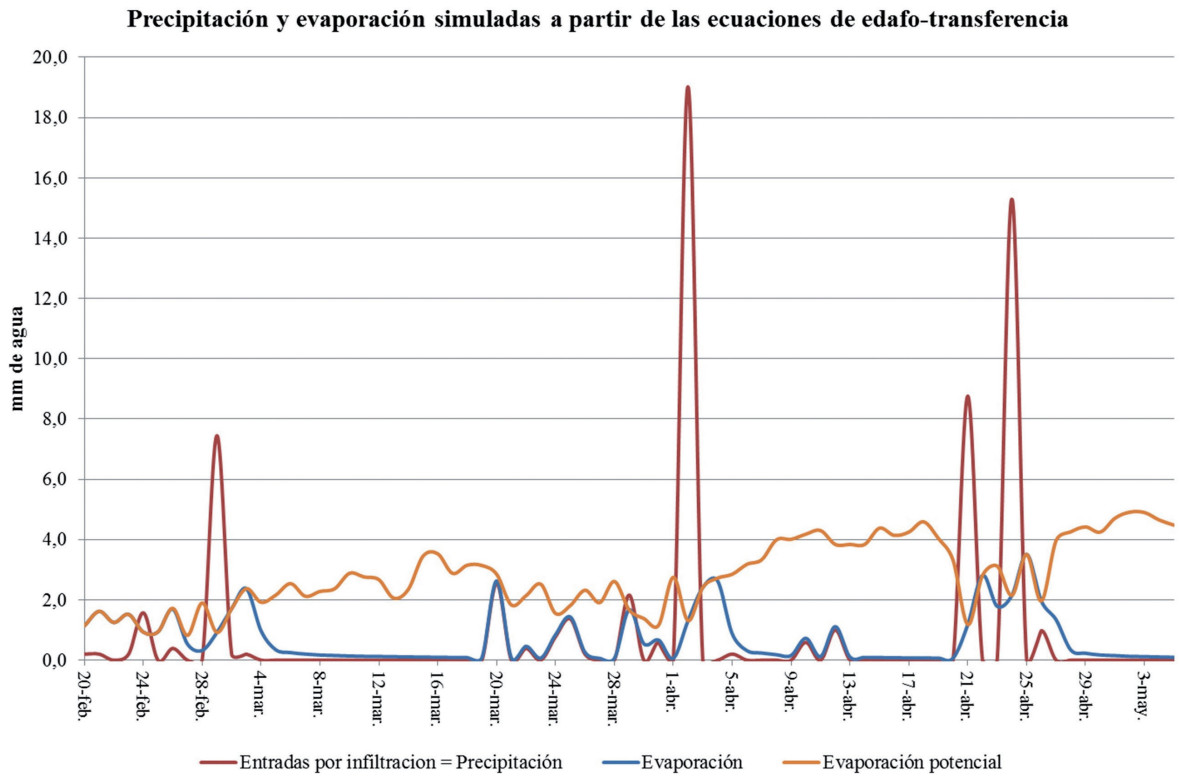

Humedad en el horizonte 2 y precipitaciones cada 30 min.
Contenido volumétrico de agua (cm³/cm³)
Precipitación (mm)
0,32
0,31
0,30
0,29
0,28
0,27
0,26
0,25
0,24
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1-3-14 7:00
1-3-14 9:00
1-3-14 11:00
1-3-14 13:00
1-3-14 15:00
1-3-14 17:00
1-3-14 19:00
1-3-14 21:00
1-3-14 23:00
2-3-14 1:00
2-3-14 3:00
2-3-14 5:00
2-3-14 7:00
2-3-14 9:00
2-3-14 11:00
2-3-14 13:00
2-3-14 15:00
2-3-14 17:00
2-3-14 19:00
2-3-14 21:00
2-3-14 23:00
3-3-14 1:00
3-3-14 3:00
Humedad horizonte 2
Prec. Marchamalo
Prec. Armuña
Prec. Center

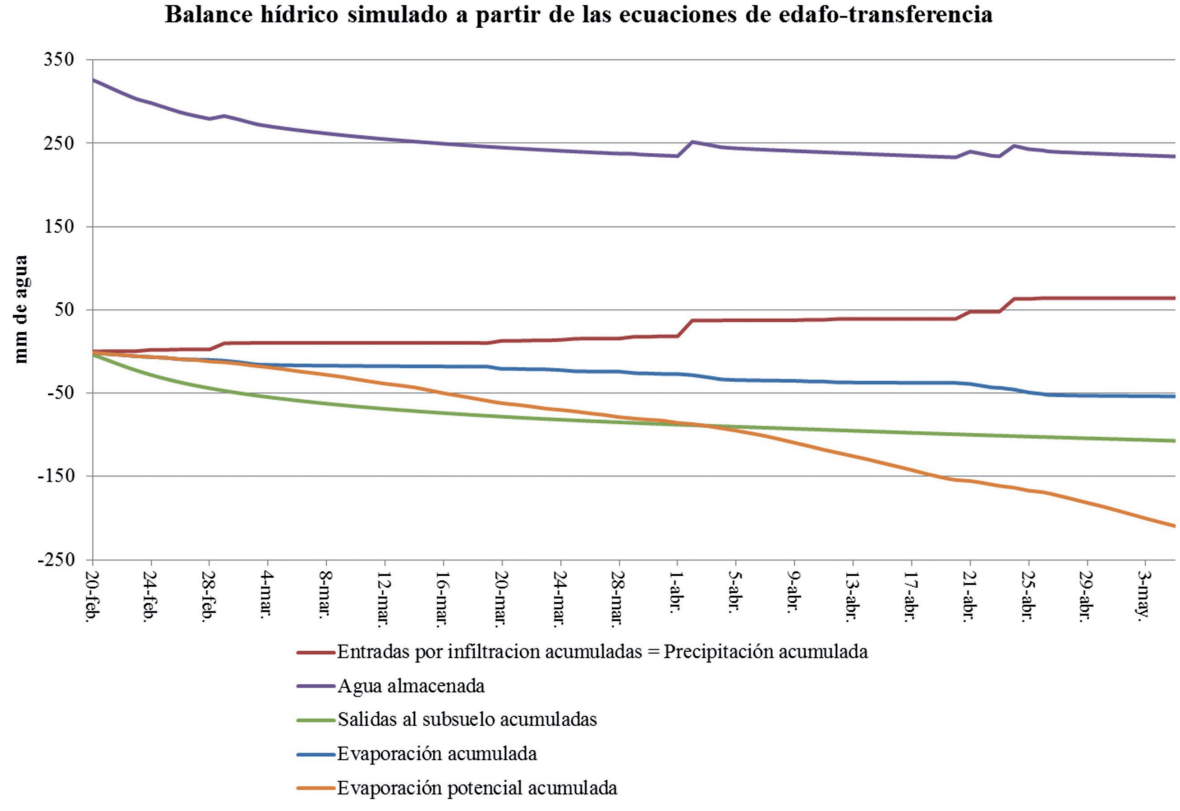

Humedad en el horizonte 2 y precipitaciones cada 30 min.
Contenido volumétrico de agua (cm³/cm³)
Precipitación (mm)
0,32
0,31
0,30
0,29
0,28
0,27
0,26
0,25
0,24
3,2
2,8
2,4
2
1,6
1,2
0,8
0,4
0
2-4-14 6:00
2-4-14 7:00
2-4-14 8:00
2-4-14 9:00
2-4-14 10:00
2-4-14 11:00
2-4-14 12:00
2-4-14 13:00
2-4-14 14:00
2-4-14 15:00
2-4-14 16:00
2-4-14 17:00
2-4-14 18:00
2-4-14 19:00
2-4-14 20:00
2-4-14 21:00
2-4-14 22:00
2-4-14 23:00
3-4-14 0:00
3-4-14 1:00
3-4-14 2:00
3-4-14 3:00
3-4-14 4:00
3-4-14 5:00
3-4-14 6:00
3-4-14 7:00
3-4-14 8:00
3-4-14 9:00
Humedad horizonte 2
Prec. Marchamalo
Prec. Armuña
Prec. Center


Humedad en el horizonte 2 y precipitaciones cada 30 min.
Contenido volumétrico de agua (cm³/cm³)
Precipitación (mm)
Humedad horizonte 2
Prec. Marchamalo
Prec. Armuña
Prec. Center

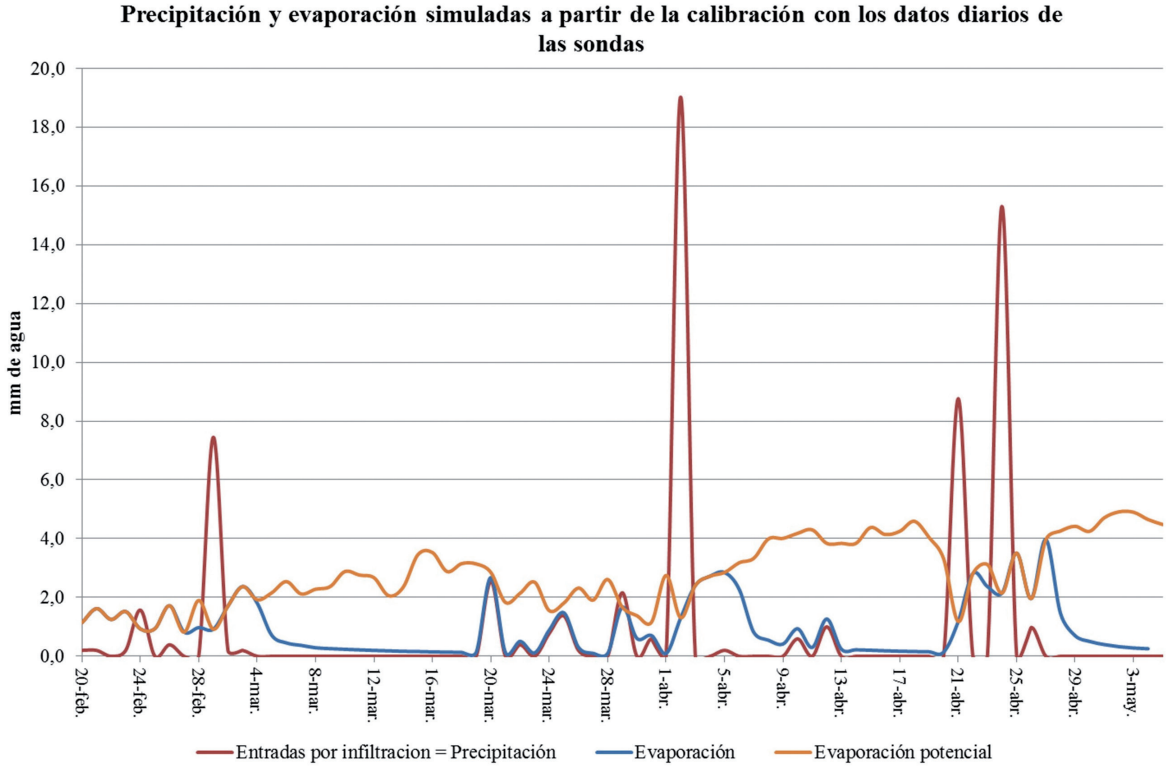

Humedad en el horizonte 2 y precipitaciones cada 30 min.
Contenido volumétrico de agua (cm³/cm³)
Precipitación (mm)
Humedad horizonte 2
Prec. Marchamalo
Prec. Armuña
Prec. Center

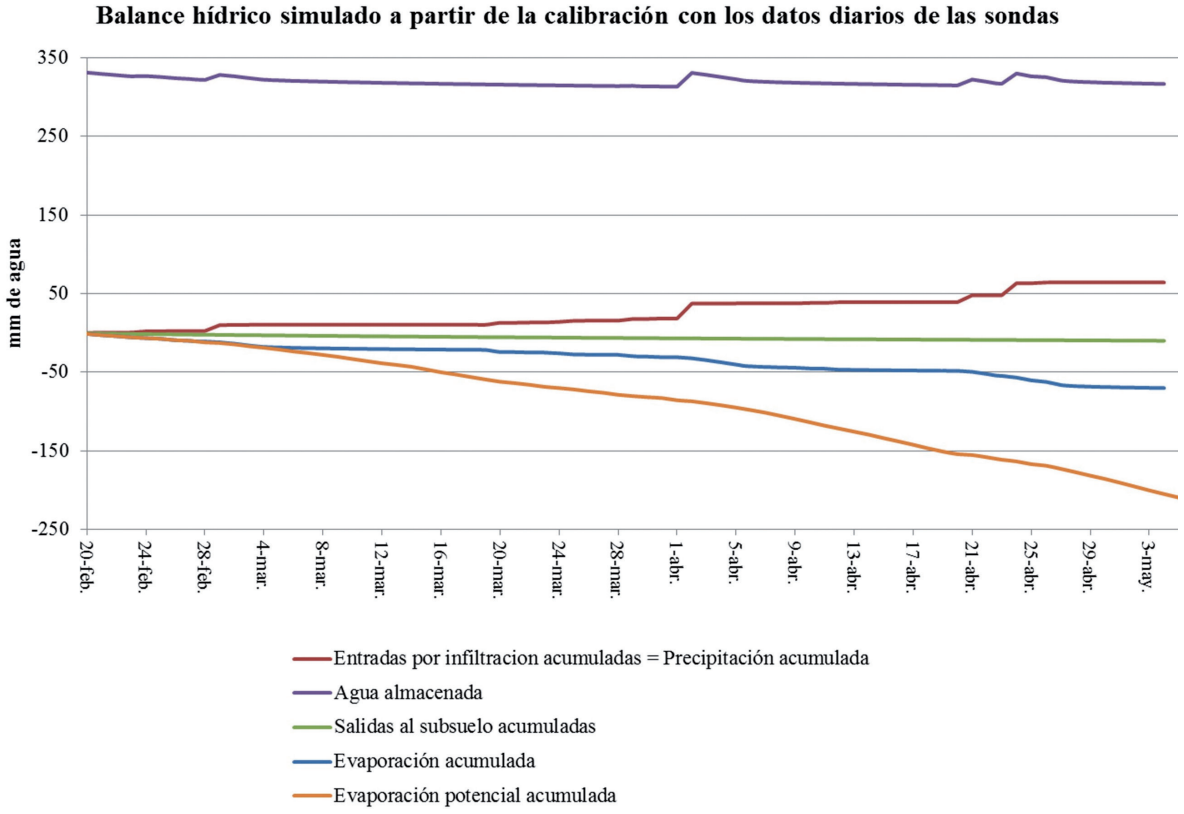
## 8.4. APÉNDICE 4. GRÁFICOS CON EL BALANCE HÍDRICO SIMULADO A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE EDAFO-TRANSFERENCIA



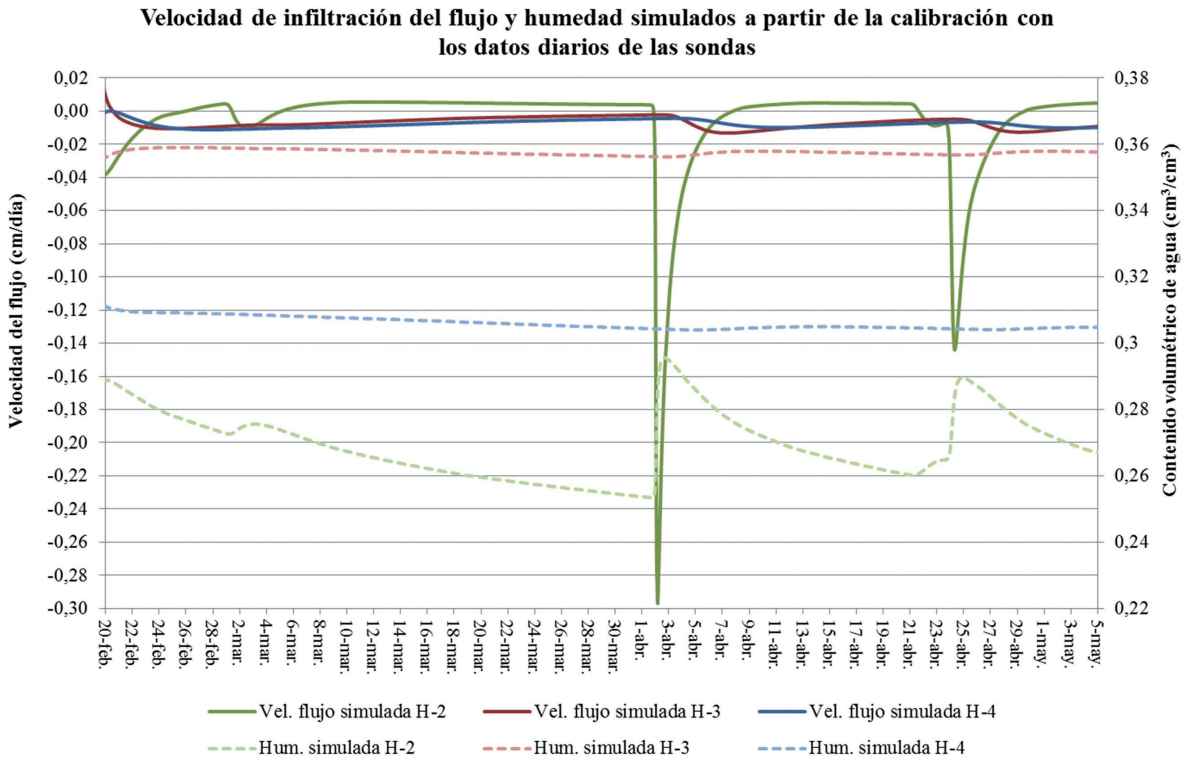



## 8.5. APÉNDICE 5. GRÁFICOS CON EL BALANCE HÍDRICO SIMULADO A PARTIR DE LA CALIBRACIÓN CON LOS DATOS DIARIOS DE LAS SONDAS



## 8.6. APÉNDICE 6. GRÁFICO CON LA VELOCIDAD DEL FLUJO SIMULADA A PARTIR DE LA CALIBRACIÓN CON LOS DATOS DIARIOS DE LAS SONDAS



escuela de posgrado

ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE POSGRADO EN **HIDROLOGÍA**

UAH URJC

**máster universitario**

en hidrología y gestión de recursos hídricos

**proyectos**

**2014**

# Infraestructuras y gestiones sostenibles para potabilización y distribución de agua potable

autora

**Sandra Susana Torres Vásquez**

director

**Dr. Eloy García Calvo (UAH)**

Alcalá de Henares, 10 de Junio de 2014

A Dios, por estar conmigo siempre, acompañándome y guiándome en cada una de las etapas de mi vida.

A mi familia, especialmente a mis padres, hermanos y sobrinos por tanto cariño, comprensión, inspiración y sobre todo por ese apoyo incondicional.

A Wilson, quien me enseñó tantas cosas, y a quien agradezco inmensamente su cariño, compañía y consejos.

A la Fundación Carolina, por ser la parte más importante de este máster, por la beca recibida y por toda su colaboración.

A la Comisión Docente del Máster en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos de la Universidad de Alcalá de Henares, a los docentes por la sabiduría transmitida y especialmente al Dr. Eloy García Calvo que, como tutor de este trabajo, me ha orientado, recomendado y apoyado de una manera excepcional.

A todos mis amigos y compañeros, que de una u otra forma estuvieron acompañándome, apoyándome y aconsejándome.

Mil gracias a todos, Susana Torres.

## ÍNDICE

1. Resumen ..... 384
2. Introducción ..... 384
3. Objetivos ..... 385
   3.1. General ..... 385
      3.1.1. Demostrar la necesidad de infraestructuras y gestiones sostenibles para potabilización y distribución de agua potable ..... 385
   3.2. Específicos ..... 385
      3.2.1. Analizar diferentes casos de estudios relacionados con la recuperación y reutilización de aguas residuales, restauración de cuencas hidrográficas y reducción de fugas en redes de distribución ..... 385
      3.2.2. Mostrar los beneficios obtenidos en cada uno de los casos analizados y su aplicabilidad en otras regiones ..... 385
4. Sostenibilidad ..... 385
   4.1. Atributos de eficiencia ..... 385
5. Casos de estudio de infraestructuras y gestiones sostenibles ..... 386
   5.1. Recuperación y reutilización de aguas residuales ..... 386
      5.1.1. Windhoek, Namibia, África ..... 386
      5.1.2. Singapur, Asia ..... 388
      5.1.3. Orange, California, América del Norte ..... 389
   5.2. Restauración de cuencas hidrográficas ..... 391
      5.2.1. Rio Wensum, Inglaterra ..... 391
      5.2.2. Rio Frome, Inglaterra ..... 392
   5.3. Reducción de fugas en redes de distribución ..... 393
      5.3.1. Ciudad de México, México ..... 394
      5.3.2. Madrid, España ..... 396
      5.3.3. Berlín, Alemania ..... 397
6. Otros aspectos ..... 398
   6.1. Gestión del riesgo ..... 398
   6.2. Salud pública ..... 399
7. Conclusiones ..... 399
8. Glosario ..... 400
9. Bibliografía ..... 401

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Composición del agua de Berlín ..... 398
**Tabla 2.** Comparativo de tarifa por m³ de agua potable en casos de estudio ..... 400

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Atributo de eficiencia en la sostenibilidad del Recurso Hídrico ..... 386
**Figura 2.** Ubicación geográfica de Windhoek, Namibia. (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 387
**Figura 3.** Diagrama de flujo en la planta NGWRP (Adaptado de LAZAROVA et al., 2013) ..... 387
**Figura 4.** Ubicación geográfica de Singapur, Asia (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 388
**Figura 5.** Diagrama de flujo en la planta NEWater (Adaptado de LAZAROVA et al., 2013) ..... 389
**Figura 6.** Ubicación geográfica de Orange, California, EE.UU. (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 390
**Figura 7.** Diagrama de flujo en la planta de GWRS (Adaptado de LAZAROVA et al., 2013) ..... 390
**Figura 8.** Ubicación geográfica de los ríos Wensum y Frome. (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 391
**Figura 9.** Ubicación geográfica de Ciudad de México, México (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 394
**Figura 10.** Crecimiento demográfico en Ciudad de México (Adaptado de SACMEX, 2012) ..... 394
**Figura 11.** Construcción y rehabilitación de tuberías 2007- 2011 (Adaptado de SACMEX, 2012) ..... 395
**Figura 12.** Ubicación geográfica de Madrid, España (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 396
**Figura 13.** Red de distribución - Comunidad de Madrid. (CANAL ISABEL II GESTIÓN, 2012) ..... 396
**Figura 14.** Ubicación geográfica de Berlín, Alemania (Adaptado de DIVA-SIG, 2014) ..... 397

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**ArcGIS:** Sistema de Información Geográfica Integrado

**BAC:** *Biological Activated Carbón filtration* - Filtración por Carbón Biológico Activado

**BAP:** *UK Biodiversity Action Plan* - Plan de Acción para la Diversidad del Reino Unido

**BM:** Banco Mundial

**BWB:** Departamento de agua de Berlín

**CCTV:** Circuito Cerrado de Televisión

**DAF:** *Dissolved air flotation* – Flotación de aire disuelto

**DMA:** Directiva Marco del Agua Europea

**EE.UU.:** Estados Unidos

**EPA:** Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.

**FFIA:** Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua

**FPWB:** *Finished Product water Bypass* -Derivación de Agua producto final

**GAC:** G*ranular Activated adsorption*-Adsorción por Carbón Granular Activado

**GDF:** Gobierno del Distrito Federal

**GWRS:** *The Groundwater Replenishment* - Sistema de Reposición de Aguas Subterráneas

**IbSST:** Asociación Ibérica de Tecnologías Sin Zanja

**ICLEI:** Gobiernos Locales por la Sostenibilidad

**INE:** Instituto Nacional de Estadísticas

**IPU:** *Indirect potable use* – Uso Potable Indirecto

**MDGs:** *Millennium Development Goals* -Objetivos de Desarrollo del Milenio

**MF:** Membranas de Microfiltración

**NDMA:** N-nitrosodimetilamina

**NGWRP:** *New Goreangab Water Reclamation* – Nueva planta de agua recuperada *Goreangab*

**OCSD:** Distrito de Sanidad del Condado de Orange, California

**OCWD:** Distrito de Agua del Condado de Orange, California

**ONU:** Organización de Las Naciones Unidas

**PAC:** Carbón en Polvo Activado

**PEAD:** Polietileno de Alta Densidad

**PGIRH:** Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos

**PSA:** Acuerdo de Servicio Público

**RO:** Ósmosis inversa

**SAC:** Área Europea de Especial Conservación

**SACMEX:** Sistema de Agua de la Ciudad de México

**SAR:** Río Santa Ana

**SMA:** Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal

**SSSI:** Sitios de Especial Interés Científico

**TDS:** Sólidos disueltos Totales

**TT** : Tecnologías Sin Zanja (*Trenchless Tecnology*)

**UE:** Unión Europea

**UF:** Ultrafiltración

**UNESCO:** Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

**UV:** Ultravioleta

**WATEREUM:** Water Effective Utility Management

**WRP:** Water Reclamation Plant – Planta de Recuperación de Agua

**WWAP:** *World Water Assessment Programme* - Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos

**WWDR1:** *The World Water Development Report* – Primer Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo

**WWDR2:** *The World Water Development Report* – Segundo Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo

**WWDR4:** *The World Water Development Report* – Cuarto Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo

**ZMCM:** Zona Metropolitana de la Ciudad de México

## 1. RESUMEN

El agua dulce disponible para el consumo humano es menos del 1% del agua del planeta y se *"estima que el tamaño de la población mundial será* de casi 8.000 millones para 2034, de 9.000 millones para principios de la década de 2050 y de más de 10.460 millones posteriormente" (UNESCO, 2012). Teniendo en cuenta además que la contaminación y el cambio climático ejercen presiones sobre el recurso hídrico, convirtiéndolo en un recurso limitado e insostenible.

Dado lo anterior, este trabajo tiene como objetivo demostrar que se requirieren nuevas e innovadoras soluciones en cuanto a planificación, diseño y construcción de infraestructuras para la captación, potabilización y distribución de agua potable con el fin de ofrecer soluciones sostenibles en tiempos ilimitados, razón por la cual se mostrará la experiencia de algunas comunidades que han tenidos grandes perturbaciones relacionadas con el recurso hídrico y las medidas adoptadas en cada uno de los casos, convirtiéndolas en un ejemplo claro y digno para muchas regiones del planeta que están viviendo situaciones similares o están muy cerca de vivirlas.

Ciudades como Windhoek, Namibia al Sudoeste de África, Singapur en Asia y el condado de Orange, California, han optado por la recuperación y reutilización de aguas residuales, generando agua para consumo humano que supera incluso estándares normales de calidad; otra de las estrategias utilizadas por ciudades en Inglaterra, es la restauración de cuencas hidrográficas de los ríos Wensum y Frome y finalmente una tercera estrategia para una distribución sostenible del agua en las redes es la que han implementado ciudades como México en América del Norte, Madrid en España y Berlín en Alemania, donde se han planteado soluciones innovadoras encaminadas a reducir las fugas, teniendo en cuenta que muchas tuberías ya han cumplido su vida útil y que además estas pérdidas de agua generan de manera paralela una sobreexplotación de los recursos hídricos convencionales para compensar los grandes volúmenes que desaparecen a diario.

## 2. INTRODUCCIÓN

El agua dulce disponible para el consumo humano es menos del 1% del agua del planeta y se *"estima que el tamaño de la población mundial será de casi 8.000 millones para 2034, de 9.000 millones para principios de la década de 2050 y de más de 10.460 millones posteriormente"* (UNESCO, 2012). Sin embargo, el recurso hídrico continua distribuido de la siguiente manera: el 97,5% del agua disponible en el planeta es agua salada. El restante 2,5% del agua del planeta es dulce y de este porcentaje el 68,9% está en forma de hielo permanente en casquetes polares y glaciares, el 29,9% en aguas subterráneas, el 0,3% en lagos, embalses y ríos y el restante 0,9% procede de otras fuentes, lo cual también genera la incertidumbre del porcentaje de la población mundial que tendrá acceso a agua potable y algo más desalentador, ¿Cuál será el porcentaje de la población que no tendrá agua segura para sobrevivir?

Dado lo anterior, el fututo del recurso hídrico en el mundo no es positivo, y millones de personas en el mundo que carecen de acceso al agua potable segura y que dentro de muchas otras presiones, "*la demanda creciente de agua en los países en desarrollo podría aumentar un 50% con respecto a 2011"* (UNESCO, 2012), lo cual genera de manera proporcional una mayor contaminación del recurso, disminuyendo así la cantidad y calidad disponible para la demanda creciente, pues la cantidad de agua disponible se podría considerar como el volumen de agua no contaminada. De manera menos positiva y según la cuarta edición del informe de la UNESCO sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, denominada "*Gestionar el agua en un contexto de incertidumbre y riesgo*", determinó "*que antes de 2030 serán 1.700 millones de personas que sufrirán escasez de agua y a comienzos de 2030 serán 2.000 millones"* (UNESCO, 2012), considerando además que una de las principales fuentes de agua para consumo humano es el agua subterránea de la cual actualmente alrededor de 2.000 millones de personas en el mundo dependen y que la sobreexplotación de acuíferos en megaciudades como: Ciudad de México, Buenos Aires, Shanghai, Bangkok, Pekín, Calcuta, Londres, Tokio y otras muchas ciudades, genera grandes incertidumbres respecto al futuro del agua a nivel mundial.

Uno de los propósitos fundamentales de este proyecto es mostrar estrategias adoptadas ante diversas problemáticas relacionadas con el recurso hídrico. Se exponen tres casos de estudios encaminados a la recuperación y reutilización de aguas residuales para el consumo humano en ciudades como Windhoek, Namibia al Sudoeste de África, Singapur en Asia y el condado de Orange, California en Estados Unidos, en segundo lugar, se muestran dos casos asociados a la restauración de cuencas hidrográficas en los ríos Wensum y Frome ubicados al este y sur de Inglaterra. Finalmente, se presentan las estrategias adoptadas por Ciudad de México en América del Norte, Madrid en España y Berlín en Alemania, cuyos propósitos son la reducción de fugas en las redes de distribución, buscando ser ciudades más sostenibles y capaces de reducir las pérdidas de agua, ofreciendo un abastecimiento continuo en cantidad y calidad a estas urbes cuya población aumenta de manera considerablemente.

Un segundo objetivo de este proyecto es demostrar que se requiere nuevas e innovadoras soluciones para la proyección y construcción de sistemas potabilización y distribución de agua potable, razón por la cual no se puede seguir proyectando como hasta ahora se ha hecho, es decir, buscando solo cubrir la demanda y evitando graves epidemias, sino que se deben buscar soluciones sostenibles en el tiempo utilizando los mínimos recursos posibles, donde se realicen análisis permanentes a las presiones generadas sobre los diferentes sistemas y se permita mediante acciones preventivas y correctivas anticiparse a los problemas, donde los sistemas sean capaces de soportar cambios climáticos, contaminación, crecimiento demográfico, sobreexplotaciones, disminución de caudales, deshielos, aumento de la evaporación, presiones naturales, socio-naturales y antropogénicas, contribuyendo así al cuidado, protección y distribución equitativa del recurso hídrico. Dado que las infraestructuras y gestiones deben verse desde un punto de vista interdisciplinar, acompañadas de innovadoras tecnologías que garanticen los objetivos para los cuales hayan sido concebidas, en tiempos razonables, costes y cuidados medioambientales, permitiendo que un recurso hídrico finito se convierta en un bien renovable e infinito.

# 3. OBJETIVOS

## 3.1. GENERAL

### 3.1.1. DEMOSTRAR LA NECESIDAD DE INFRAESTRUCTURAS Y GESTIONES SOSTENIBLES PARA POTABILIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

## 3.2. ESPECÍFICOS

### 3.2.1. ANALIZAR DIFERENTES CASOS DE ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES, RESTAURACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y REDUCCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

### 3.2.2. MOSTRAR LOS BENEFICIOS OBTENIDOS EN CADA UNO DE LOS CASOS ANALIZADOS Y SU APLICABILIDAD EN OTRAS REGIONES

# 4. SOSTENIBILIDAD

Son muchas las inversiones que han fracasado, es decir, que no han logrado cumplir con el objetivo principal, primero por falta de estrategias eficientes y segundo por inadecuada planeación, ejecución, operación y/o mantenimiento. Estas ineficiencias se podrían denominar como una falta de sostenibilidad, por lo tanto, las infraestructuras y gestiones proyectadas deben ser capaces de resolver problemas actuales y futuros relacionados con la calidad, cantidad y distribución del recurso hídrico, de una manera sostenible y amigable con el medio ambiente.

La sostenibilidad se viene manejando desde hace más de 20 años, y se ha definido como aquella que "*satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*" (ONU, 1987), es decir, que garantizar y promover un uso eficiente del recursos hídrico es el propósito fundamental para garantizar que las futuras generaciones puedan acceder sin limitaciones a lo que hoy tenemos y quizás en mejores condiciones, teniendo en cuenta además que "*nuestro consumo de recursos materiales y energéticos renovables no superen la capacidad de los sistemas naturales para reponerlos, y que la velocidad a la que consumimos los recursos no renovables no supere el ritmo de sustitución de los recursos renovables duraderos...*" (UE//ICLEI, 1994).

Sin embargo, lograr la sostenibilidad de infraestructuras y gestiones, requiere de una planificación integral, donde se tengan en cuenta factores como los costes y fuentes de financiación, necesidades futuras, capacidad de resiliencia, descentralización e implementación de tecnologías que ofrezcan soluciones prácticas, eficientes e innovadoras. A continuación se muestran los diez atributos que según la EPA y WATEREUM son necesarios para lograr una mayor eficiencia y por ende la sostenibilidad del recurso hídrico.

## 4.1. ATRIBUTOS DE EFICIENCIA

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) con el apoyo de Water Effective Utility Management (WATEREUM) han propuesto diez atributos para manejar de manera eficiente el servicio de agua potable, denominándolos de la siguiente manera:

1. Calidad: producir agua de calidad, es decir, de acuerdo a estándares nacionales e internacionales, garantizando un bienestar social, económico y de salud pública.

2. Satisfacción: fomentar la participación comunitaria para la toma de decisiones, dado que el cliente último, es decir, el usuario, es el mejor crítico y conocedor de la problemática y una fuente importante de información para proyectar una planificación y desarrollo eficiente.

3. Desarrollo: aprendizaje continuo del personal institucional, por medio de capacitaciones, donde se promuevan, generen y garanticen instituciones capaces de soportar, innovar y ofrecer soluciones eficientes a necesidades cambiantes.

4. Optimización operacional: garantizar que las infraestructuras y gestiones proyectadas sean rentables, fiables y sostenibles en aspectos operativos, adoptando e implementando tecnologías apropiadas que promuevan mejoras oportunas y eficientes.

5. Viabilidad financiera: es un factor que "*Comprende el costo del ciclo de vida completo de la utilidad y establece y mantiene un equilibrio eficaz entre la deuda a largo plazo, los valores de activos, operaciones y gastos de mantenimiento, y los ingresos de explotación*" (WATEREUM, 2014).

6. Infraestructuras estables: considerar el coste más bajo de mantenimiento durante todas la vida útil del proyecto, asegurando las reparaciones, rehabilitaciones y sustituciones de los activos con el fin de garantizar de manera eficiente el servicio y evitar situaciones de emergencia o riesgo.

7. Resiliencia operacional: anticiparse y evitar problemas, teniendo en cuenta aspectos legales, financieros, ambientales y desastres naturales.

8. Sostenibilidad comunitaria: tener claros y explícitos los impactos que se van a generar sobre la comunidad en el corto y largo plazo. Gestionar de manera eficiente el recurso, para garantizar una protección, restauración y mejoras del medio ambiente, como también garantizando una sostenibilidad económica, evitando la contaminación, protección de las fuentes hídricas como una estrategia global para dar una sostenibilidad comunitaria.

9. Disponibilidad de agua: evaluar necesidades actuales y futuras, para garantizar un suministro, conservación y educación hacia una mayor y mejor utilización del recurso hídrico, garantizando la disponibilidad y recuperación de las aguas subterráneas y superficiales en un largo plazo. Apoyo interinstitucional: generar apoyo multisectorial de instituciones gestoras, comunidad y órganos de supervisión, para lograr tener una visión global y por ende soluciones integrales, que

garanticen decisiones eficientes en cuanto a disponibilidad del recurso, gestión del riesgo y salud pública.

*Figura 1. Atributo de eficiencia en la sostenibilidad del Recurso Hídrico*

Otros aspectos importantes a considerar es la implementación de metodologías y técnicas participativas de la comunidad, las cual debe estar claramente definida desde la etapa de planeación y debe promoverse durante las etapas de operación y mantenimiento, deben ser consecuente con los recursos y tecnologías disponibles, tendientes a un manejo integral del recurso hídrico con una visión multisectorial, donde se incentive la protección y conservación del recurso hídrico y tengan un fuerte apoyo Interinstitucional.

## 5. CASOS DE ESTUDIO DE INFRAESTRUCTURAS Y GESTIONES SOSTENIBLES

La gestión de los recursos hídricos en el mundo tiene muchos retos para el futuro pues "*todas las señales parecen indicar que la crisis se está empeorando y que continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva. Se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, esencialmente causada por la utilización de métodos inadecuados*" (UNESCO, 2003). Estas tendencias no ha variado de manera significativa, razón por la cual se deben plantear soluciones eficientes a las inadecuadas gestiones que se evidencian sobre el recurso hídrico, proponiendo nuevas y mejores técnicas de aprovechamiento, que garanticen el suministro y permitan mejorar y controlar la calidad, es decir, se deben implementar técnicas que promuevan un manejo integral del recurso de manera sostenible y que se conviertan en un pilar de desarrollo para las sociedades, evitando problemas sociales, económicos o ambientales, que impidan el normal desarrollo de las regiones.

Soluciones sostenibles como la recuperación y reutilización de aguas residuales, la restauración de cuencas hidrográficas y la reducción de fugas en las redes de distribución, son estrategias que han sido concebida para enfrentar problemas de escasez, mejorar la calidad y cantidad de agua disponible para el consumo humano y sobre todo convertirse en alternativas viables y replicables para cualquier región del mundo.

### 5.1. RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La recuperación y reutilización consiste en someter las aguas residuales a un proceso de depuración con avanzadas tecnologías y obtener así un agua con parámetros óptimos y aceptables para los diferentes usos. Es una práctica que se viene realizando en muchos países del mundo para diferentes usos como por ejemplo en Israel, donde se recicla más del 80% de sus aguas para riego, España, países escandinavos y Estados Unidos. Actualmente, existen ciudades en el mundo que utilizan esta agua para consumo humano, por medio de la recarga de acuíferos o utilización en procesos industriales. Sin embargo, ante esta práctica existe aún un rechazo social y cultural muy grande, el cual debe manejarse de manera ecléctica y pragmática, indicando no solo los beneficios económicos, sino los beneficios sociales, políticos, ambientales, etc. a los cuales lleva la recuperación y reutilización del agua residual, además considerando que es una práctica viable en cualquier lugar del mundo, pues son aguas producidas por la misma población y tratadas en un área muy cercana, razón por la cual no se requiere de grandes extensiones de tubería para ser transportada o grandes inversiones en energía para la impulsión.

Situaciones climatológicas, topográficas, crecimientos demográficos, factores económicos, ausencia o insuficientes fuentes hídricas, entre otros factores, han incentivado sistemas eficientes de recuperación y reutilización de agua, permitiendo no solo cubrir las demandas crecientes, sino que también incentivan a mejorar, conservar y proteger el medio ambiente, disminuyendo la contaminación y garantizando una mejor calidad y cantidad del recurso hídrico disponible, teniendo en cuenta además que "*más del 80% de aguas residuales del mundo no se le hace ningún tratamiento, siendo así las zonas urbanas unas de las mayores fuentes de contaminación*" (UNESCO, 2012).

Algunas de las ciudades que reutilizan el agua residual son: Windhoek la capital de La República de Namibia, Singapur en Asia y el Condado de Orange en California, Estados Unidos.

#### 5.1.1. WINDHOEK, NAMIBIA, ÁFRICA

La ciudad de Windhoek es el centro económico y capital de Namibia, es la ciudad más grande de Namibia con 350.000 habitantes; está ubicada al sudoeste de África y por su ubicación geográfica es considerada una de las regiones más áridas del mundo, con lluvias anuales de 360 mm. Está localizada a 1.600 m.s.n.m.

El suministro de agua para la ciudad, proviene actualmente de tres fuentes, la primera de ella es superficial, captada de ríos efímeros en tres presas (*Von Bach*, *Swakoppoort* y *Omatako*), situadas entre 60 y 170 km, las cuales cubren un 65% de la demanda, un 7% es tomadas de aguas subterráneas y el 28% restante por la planta "*New Goreangab Water Reclamation (NGWRP)*" (LAZAROVA et al., 2013).

*Figura 2. Ubicación geográfica de Windhoek, Namibia. (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*

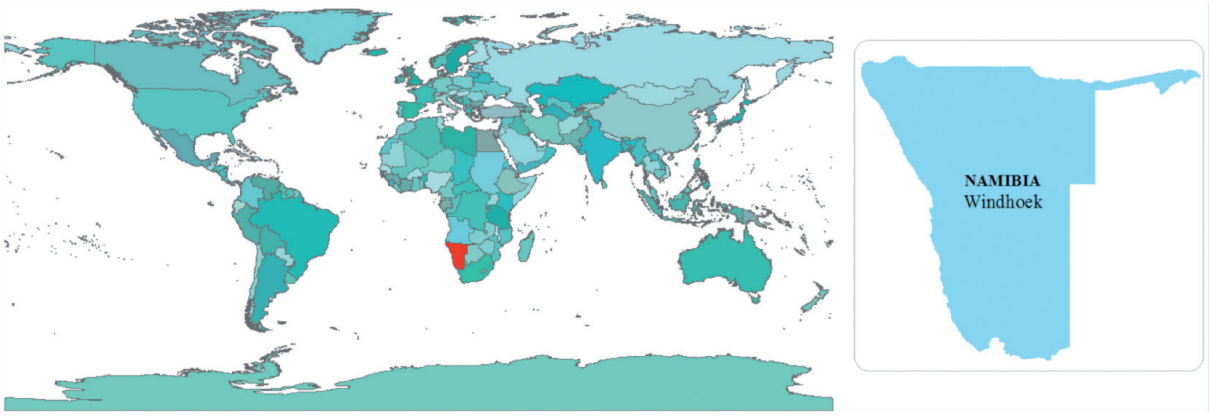
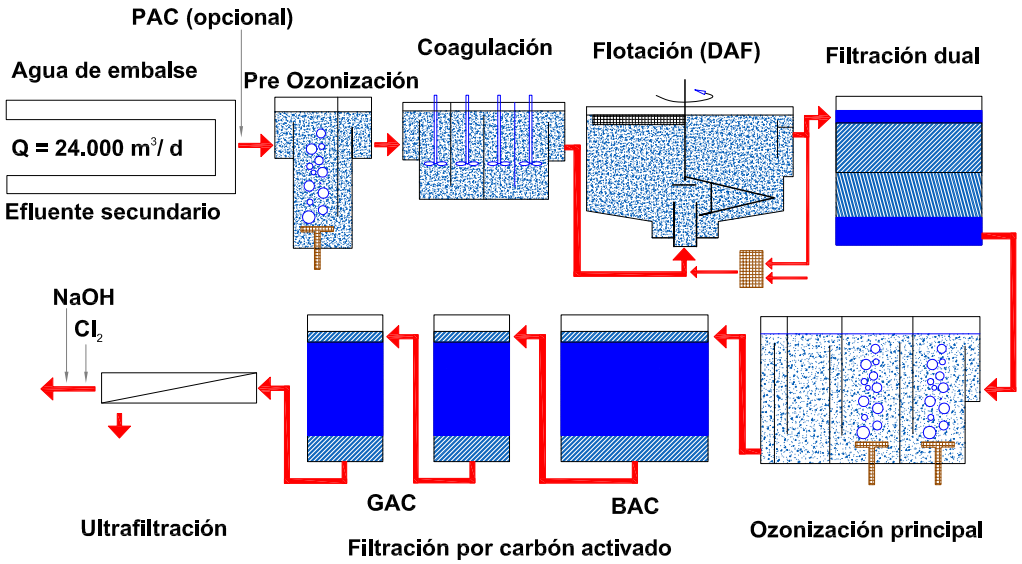



*Figura 3. Diagrama de flujo en la planta NGWRP (Adaptado de LAZAROVA et al., 2013)*




Desde 1968 inicia la reutilización de aguas residuales en este país africano, pero el proyecto denominado NGWRP en Windhoek, nace en la década de los 90 como consecuencia de una intensa sequia y aumento de la población, lo cual conllevo a generar nuevos sistemas para cubrir la demanda de agua potable. Este proyecto integra tres principios básicos con el fin de asegurar el suministro de agua a la ciudad, el primero es la reutilización de agua, el segundo la recarga de acuíferos y el tercero el control de la contaminación, por lo cual creó el proyecto denominado "*Goreangab*", el cual consiste en una la planta que utiliza las últimas tecnologías para la recuperación del agua y que a su vez cubre la demanda de agua potable de la ciudad.

Con el fin de alcanzar los más altos niveles de seguridad para una práctica tan particular como la reutilización de aguas residuales, se tienen en cuenta tres aspectos importantes. El primero de ellos consiste en una estricta separación de aguas residuales domésticas e industriales y solo utilizar las aguas domésticas para la reutilización. Otro aspecto, es el exhaustivo monitoreo de los influentes y efluentes tratados, así como monitoreo de la calidad de agua para consumo y un último aspecto, son los tratamientos y mediciones adicionales, los cuales pueden generar un tratamiento opcional como la dosificación de Carbón en Polvo Activado.

El tratamiento de aguas residuales dentro de la planta, se integra por procesos y operaciones como: "*Powdered Activated Carbón"(PAC)* – Carbón en Polvo Activado, cuya dosificación es opcional, "Pre-ozonation" – Pre–Ozonización para mejorando así la coagulación y floculación, "*Dissolved air flotation"* (DAF) – Flotación por aire disuelto, "*dual media filtration*" – filtración medio dual, "*main ozonation"* – ozonización principal, "*Biological Activated Carbón (BAC) filtration"* – Filtración por Carbón Biológico Activado, "*Granular Activated Carbón (GAC) adsorption"*- Adsorción por Carbón Granular Activado, "*Ultrafiltration"* (UF) –Ultrafiltración y "*Desinfection with chlorine and stabililization with caustic soda (NaOH)*" - Desinfección con cloro y estabilización con soda cáustica (NaOH). (Ver figura 3)

Los beneficios generados por el reciclaje de agua son principalmente dos: el primer es un coste económico bajo, dado que utilizar agua del río *Okavango* costaría 14 €/m³ y de acuíferos 4 €/m³, mientras que las tarifas de agua reutilizada oscilan entre los 0,75 y 2,30 €/m³ y el segundo es el desarrollo económico que se genera en la ciudad, dado el crecimiento demográfico, el turismo, el comercio y la industria, que en los últimos años ha aumentado de manera significativa en esta ciudad capital.

La experiencia de Windhoek tratando aguas residuales domésticas ha sido un éxito, dados los avanzados procesos que se utilizan y el cumplimiento de estándares de calidad requeridos para agua potable. Esta experiencia permite además una gestión integrada de los recursos hídricos y una gran contribución para el desarrollo social y económico de la ciudad, también mostrando que una de las principales razones para utilizar agua residual es la falta de otras fuentes de abastecimiento para obtener este preciado recurso y que además durante los más de 40 años de funcionamiento, no se han presentado problemas de salud humana asociados al consumo de esta agua.

La educación pública, es otro factor importante, el cual se vienen desarrollando desde 1968, lo cual genera una mayor confianza de los consumidores en cuanto a calidad y avances tecnológicos empleados en el tratamiento del agua. Finalmente, se considera un hecho histórico que una ciudad con tan pocos recursos técnicos y financieros logre tan buenos resultados y de manera consecutiva y que además sea líder y pionera en la recuperación y reutilización de aguas residuales para consumo humano.

Dentro de los retos planteados para el futuro se encuentra la gestión óptima en cuanto al agua tratada y no tratada, aumento de salinidad del efluente, microcontaminates emergentes y crecimiento demográfico.

### 5.1.2. SINGAPUR, ASIA

Singapur es un estado-ciudad, ubicada al sudeste de Asia, conformado por 63 islas y por su extensión geográfica es considerado el estado más pequeño del sudeste asiático con una extensión de 710 Km² y una poblacional de "*5,4 millones de habitantes para el año 2104*" (DEMOGRAPHIA, 2014).
Es además el centro económico de Asia y uno de los centros financieros más importantes del mundo. Sin embargo, en el "*segundo informe del desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*" (UNESCO, 2006), ocupó el puesto 170 de 190 en términos de disponibilidad de agua, dado que no cuenta con ninguna fuente hídrica.

Singapur no tiene fuentes hídricas, pero sus precipitaciones anuales de 2.400mm le permiten abastecer dos terceras partes de la demanda de agua potable por medio de captación de aguas lluvia, aunque su limitación en superficie no le permite almacenar toda el agua necesaria para abastecer la demanda doméstica, comercial e industrial, razón por la cual ha tenido que acudir a su vecino país Malasia para el suministro de agua potable, pero dado que no le es suficiente para toda la demanda, ha tenido que implementar desde la década de 1970 el uso de innovadoras y avanzadas tecnologías en el tratamiento de los efluentes de aguas residuales que por medio de un tratamiento de alta calidad, recupera y reutiliza el agua para usos no potables y usos potables indirectos como la refrigeración, la industria, entre otros. Es un proceso totalmente independiente a cambios climáticos o meteorológicos extremos, pues los volúmenes de influentes no variar de manera considerable en las diferentes épocas del año.

Actualmente, el 30% de la demanda es cubierta con agua suministrada por Malasia, otro 30% es almacenada del agua lluvia en un total de 17 embalses distribuidos por todo el estado y el 40% restante es cubierta por agua reutilizada y se prevé que para el 2061 cuando termine su contrato con Malasia será más del 50% de la demanda cubierta por agua reutilizada.

*Figura 4. Ubicación geográfica de Singapur, Asia (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*

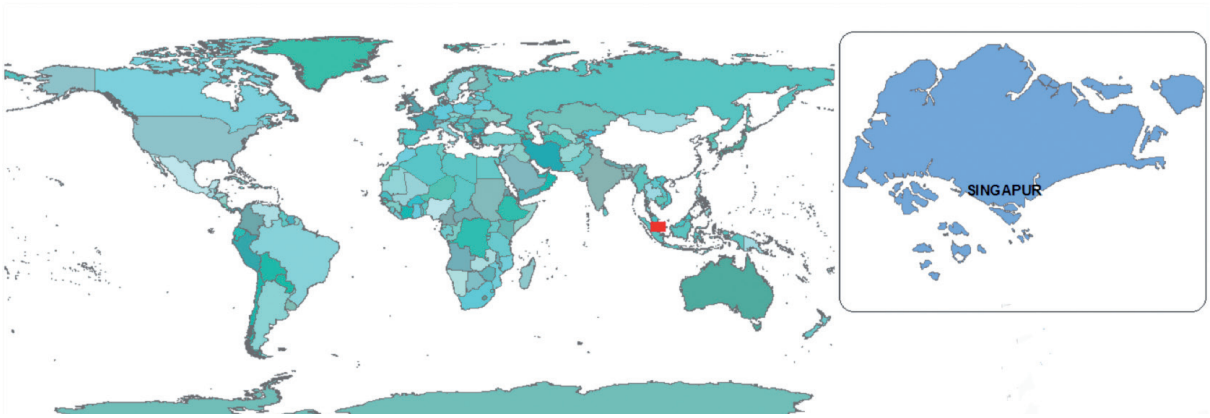
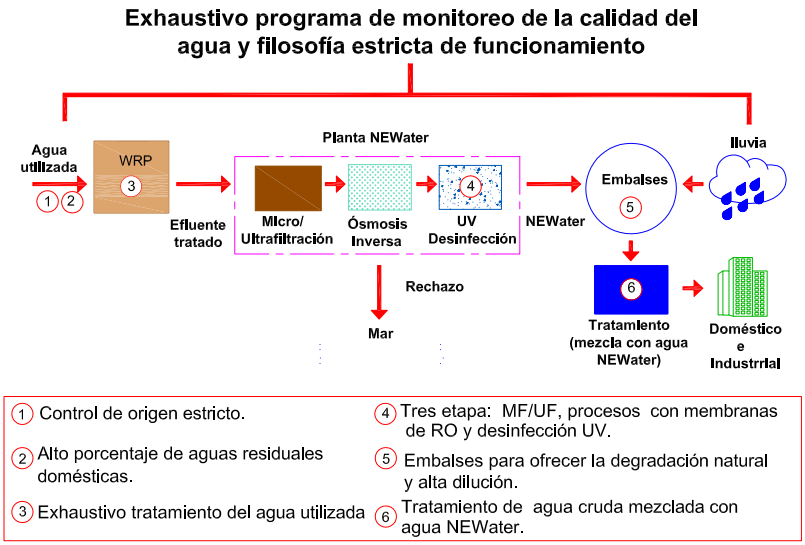


*Figura 5. Diagrama de flujo en la planta NEWater (Adaptado de LAZAROVA et al., 2013)*




El proyecto nació en 1974 con un plan piloto que consistía en la reutilización de aguas residuales con la ayuda de varias tecnologías entre ellas la ósmosis inversa (OR). Sin embargo, los costes iniciales fueron exagerado y las membranas utilizadas muy poco fiables, razón por cual en 1998 la fiabilidad y costes de las tecnología en las membranas permitieron continuar con la investigación y es ahí donde se construyó la planta en *Bedok* en el año 2000, con el proyecto denominado *NEWater*. Actualmente son cuatro plantas dentro de las cuales se encuentran *Kranji*, *Ulu Pandan* y *Changi* con "*una capacidad de tratamiento de 511Mm³/año y un coste aproximado de 1,22 S$/m³dólares de Singapur*" (LAZAROVA et al., 2013), es decir, 0,70 €/m³ aproximadamente. Un volumen del efluente es utilizado en procesos de refrigeración, industria y otra parte es mezclado con el agua almacenada en embalses, lo que han denominado *Indirect potable use (IPU)*, dado que al mezclar el agua obtenida del tratamiento *NEWater* con agua de los embalses, se recuperan los minerales que hubiesen sido retirados en el tratamiento y es además una estrategia para lograr una aceptación pública de manera gradual.

El proyecto nació con dos objetivos, el primero de ellos era abastecer las demandas actuales, dado que no cuentan con recursos hídricos suficientes y el segundo ser autosufiente para el 2061, año en el cual se acaba el contrato de suministro de agua con Malasia, razón por la cual el agua recuperada deberá cubrir un 70% de la demanda de agua de este estado asiático.

El agua obtenida del tratamiento en las plantas de *NEWater* cumple a cabalidad con las directrices y estándares de calidad exigidos para agua potable, dado que se ejerce un estricto control en la fuente y se aprovecha un alto porcentaje de aguas domésticas. El tratamiento en la planta consiste inicialmente en la utilización de membranas de Microfiltración (MF), las cuales permiten filtrar sólidos en suspensión, coloides, bacterias, virus y quistes de protozoarios, la siguiente etapa es un proceso de Osmosis Inversa (RO), donde las moléculas de agua atraviesan la membrana y contaminantes como bacterias, virus, metales pesados, nitratos, cloruro, sulfato y pesticidas son eliminados. La última etapa es un proceso realizado por ultravioleta (UV) para la desinfección, adicionando algunos productos químicos para estabilizar el pH.

El agua obtenida se mezcla con el agua de los embalses, reduciendo de forma natural los posibles contaminantes y finalmente aplicando procesos como la coagulación, floculación, filtros de arena, ozonización y desinfección. Existe además un exhaustivo control a cada proceso con el fin de garantizar una calidad de agua adecuada, el primero de ello se realiza en el influente, el segundo de ellos se realiza dentro de la planta y el tercero se realiza en los puntos finales de entrega, revisándose durante todo el proceso más de 300 parámetros, que incluyen características físicas, contaminantes orgánicos e inorgánicos, microbiológicos, entre otros.

En Singapur se ha mostrado que una buena planificación, genera soluciones sostenibilidad y por ende resultados exitosos, tal como se evidencia en la gestión actual y el futuro de este estado asiático en cuanto al recurso hídrico.

### 5.1.3. ORANGE, CALIFORNIA, AMÉRICA DEL NORTE

El Condado de Orange en el estado de California, está ubicada al sudoeste de Estados Unidos. Presenta lluvias anuales inferiores a 305 mm, lo cual indica que presenta un grave estrés hídrico. Históricamente, parte de la población ha dependido de las aguas subterráneas para abastecer la demanda interna, al norte de la ciudad dos terceras partes de la población se abastecen con agua de lluvia percolada del río Santa Ana. Sin embargo, en la década de 1920, el nivel dinámico del acuífero descendió, dado que hubo un cambio de población agrícola a población urbana y generando que actualmente más de 2 millones de personas dependan de agua subterránea en todo el estado de California, razón por la cual se tuvieron que buscar fuentes adicionales para garantizar el suministro de agua.

*Figura 6. Ubicación geográfica de Orange, California, EE.UU. (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*

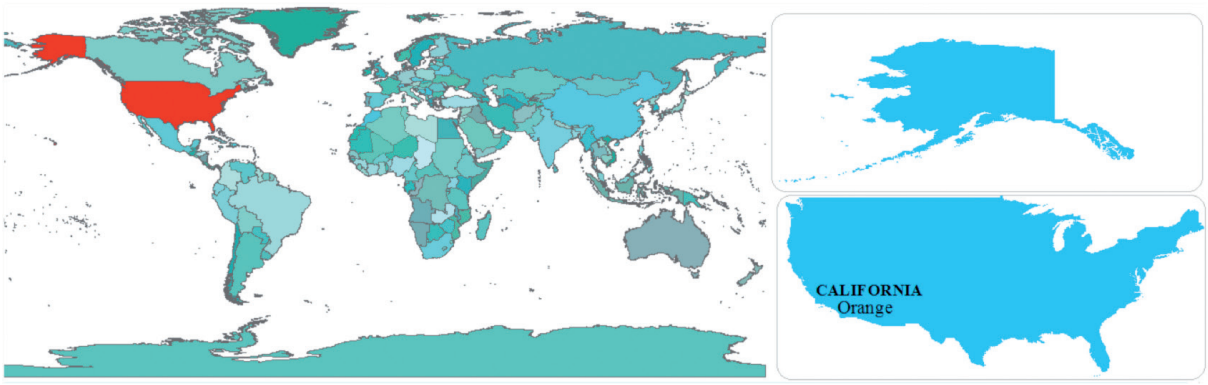
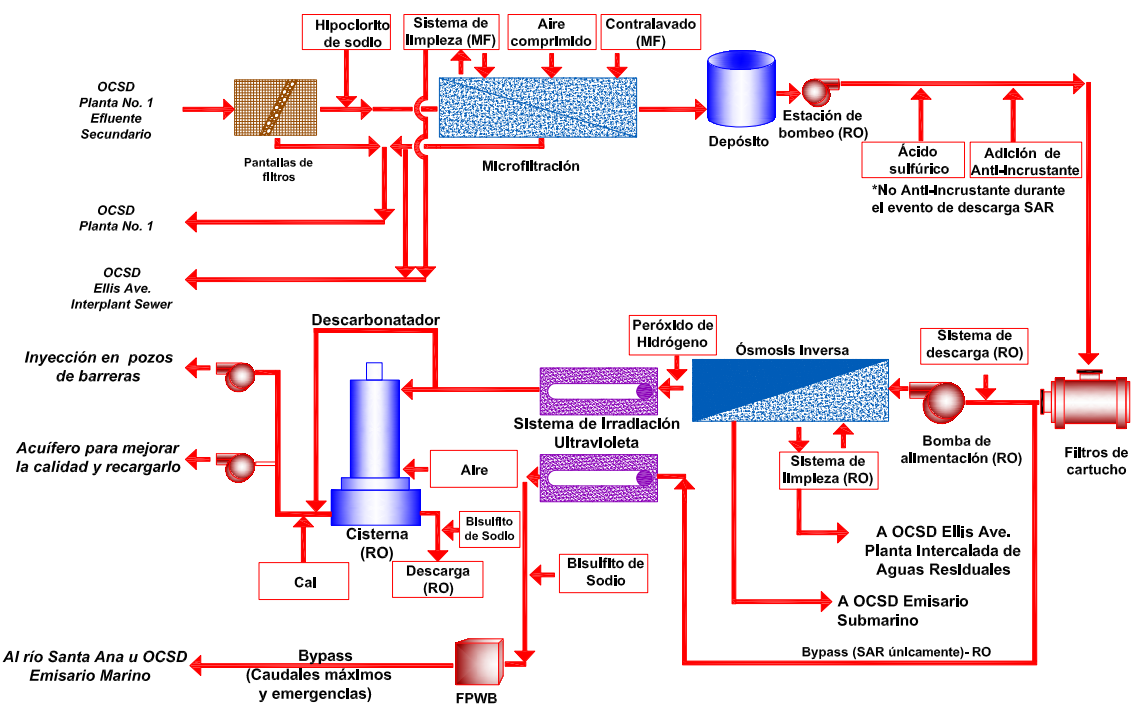



*Figura 7. Diagrama de flujo en la planta de GWRS (Adaptado de LAZAROVA et al., 2013).*




Dentro de las primeras medidas, se propusieron proyectos regionales en la década del año 1930, el primero fue captar agua del río Colorado y el segundo proyecto en 1972 era llevar agua desde el norte de California. Sin embargo, desde 1975 el Distrito de Agua del Condado de Orange, California (OCWD) junto con el Distrito de Sanidad del Condado de Orange, California (OCSD), se convirtieron en pioneros y líderes mundiales en cuanto a la recuperación y reutilización de aguas residuales y posterior recarga al acuífero. El proyecto se denominó inicialmente "*Water Factory 21*" y en junio de 2008 fue cambiado el nombre a "*The Groundwater Replenishment (GWRS)*". Con este proyecto, actualmente se abasten unas 600.000 personas en este Condado. Paralelamente también se construyó una planta desaladora como "*fuente de agua destilada para mezclar con el agua regenerada. Pero el gobierno, frente a los altos costos de la energía, pronto abandonó el proyecto*" (OCWD, 2014).

El sistema de reposición de aguas subterráneas (GWRS) es un proceso de purificación de las aguas residuales y posterior reutilización indirecta en agua potable, mediante la recarga artificial al acuífero. El volumen total de agua reciclada es 96,7 $Mm^3$/año, es decir, un aproximado de 265.000 $m^3$/d. de los cuales 132.000 $m^3$/d son inyectados a los pozos que sirven de barrera para evitar la intrusión marina y otros 132.000 $m^3$/d son para recarga del acuífero. El precio del agua reutilizada no superan los 0,15€/$m^3$ ó 0,20$/$m^3$ Dólares estadounidenses.

El tratamiento consiste inicialmente en un proceso de purificación antes de ser enviada al GWRS, en esta primera etapa, el agua pasa por desarenadores, filtros percoladores, lodos activados, clarificadores y procesos de desinfección. Posteriormente en el GWRS se inicia un proceso con membranas de Microfiltración (MF) de 0,2 micras de diámetro, dentro de las cuales se eli-

minan sólidos en suspensión, protozoos y baterías; el segundo paso es un proceso de ósmosis inversa (RO) en donde membranas semipermeable (de plástico) dejan pasar el agua a presión, lo cual permite la eliminación de productos químicos disueltos, virus y productos farmacéuticos, obteniendo un agua tan pura que requiere de una adición de minerales. Finalmente el tercero paso es la desinfección con luz ultra-violeta utilizando "*peróxido de hidrógeno (UV + $H_2O_2$), lo cual permite eliminar todos los compuestos orgánicos traza como el N-nitrosodimetilamina (NDMA) y 1-4 dioxano*" (GWRS, 2014).

Parte del agua tratada es inyectada en una barrera hidráulica para impedir la intrusión marina en el acuífero y el agua restante se percola en el acuífero para mejorar primero su calidad y segundo recargar el acuífero y evitar disminución del nivel dinámico.

El GWRS, es un proceso que ejerce un control local sobre las sequias y además un suministro de excelente calidad, resultado también de un proceso natural de la relación que existe entre el agua percolada y el suelo filtrante, lo cual hace de este sistema una gestión sostenible y económicamente viable para una región donde la demanda de agua es de 265.000 $m^3$/d, que supera estántadares estatales y federales sobre calidad de agua para el consumo humano. También ha permitido que el condado de Orange sea autosuficiente en el abastecimiento de agua potable, ha minimizando la dependencia de fuentes externas, la sobreexplotación del acuífero y la intrusión marina; además ha contribuido a la reducción de la salinidad de la cuenca, dado que en el año 1998 se presentaba valores de TDS superiores a 500mg/L en más del 50% de la cuenca, valor máximo permitido por la EPA, posteriormente estos valores descendieron a 100 mg/L.

## 5.2. RESTAURACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

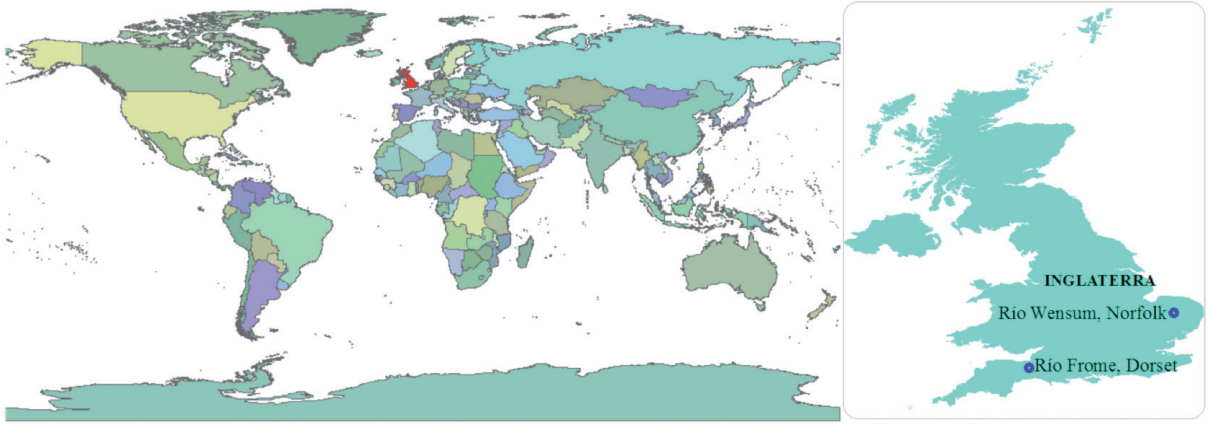
La restauración de las riberas de las cuencas hidrográficas contribuye a la estabilidad de los regímenes hidrológicos y mejora de la cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas, además, contribuye de manera directa a la prevención de avenidas e inundaciones y a la conservación de la biodiversidad y fauna. Sin embargo, actualmente, son muchas las cuencas hidrográficas en el mundo que se encuentran sometidas a diferentes presiones, que requieren indudablemente planes y medidas encaminadas al cuidado y protección del recurso, donde se promueva la reducción de la contaminación, buenas prácticas mineras, agrícolas y de ganadería, planificación en la expansión urbana e industrial, garantizando caudales ecológicos y estructuras necesarias que permitan el correcto funcionamiento hidrológico de los cauces, todo con un único objetivo, el manejo integral de las cuencas hidrográficas, con visiones a largo plazo, es decir, con planeación y practicas sostenibles, que solucionen problemas actuales y contribuyan al cuidado, conservación y disponibilidad del recurso para las futuras generaciones.

Los casos de estudio analizados fueron desarrollados en Inglaterra, y son además considerados Sitios de Especial Interés Científico (SSSI), dada su gran diversidad de fauna y flora.

### 5.2.1. RIO WENSUM, INGLATERRA

El río Wensum, está ubicado al este de Inglaterra, tiene una longitud de 78 km y un área de cuenca de 650 $km^2$, dentro de la cual su elevación máxima es de 95 m.s.n.m. Es un río meándrico cuyo recorrido inicia en *South Raynham* en *Norfolk*, atraviesa la ciudad de *Norwich* y desemboca en el río *Yare* al costado Sureste de la ciudad. Los principales afluentes de este cauce son el río *Tat*, *Langor Drain*, *Guist Drain*, *Wendling Beck* or *Dereham Stream*, *Penny Spot Beck*, *Blackwater*, *Swannington Beck* y el río *Tud*. Es un río que se caracteriza por su gran diversidad de fauna y es considerado en Inglaterra como Sitio de Especial Interés Científico (SSSI), es además es uno de los 16 ríos de Inglaterra catalogado como Área Europea de Especial Conservación (SAC); adicionalmente, de acuerdo al Plan de Acción para la Diversidad del Reino Unido (BAP), es considerado como un río de hábitat prioritario y de gran importancia europea por dos especies de peces (lamprea de arroyo y cabeza de toro). Sin embargo, el río no cumplía con lo establecido en la Directiva Marco del Agua (DMA) Europea, dado que presenta problemas asociados a modificaciones realizadas en el pasado.

*Figura 8. Ubicación geográfica de los ríos Wensum y Frome. (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*



La mayoría de estos cambios tuvieron lugar entre los años 1200 D.C. y 1900 D.C., dado que históricamente las fábricas de molienda, almacenaban el agua en cotas altas, para posteriormente utilizarla en el movimiento de turbinas y ruedas hidráulicas. En total eran 14 estructuras de acero fundido a lo largo del río y aunque, el último de los molinos dejo de funcionar en el año 1960, desde esta fecha algunas fábricas utilizaban esclusas, las cuales impedían el flujo natural del río, es decir, reduciendo la velocidad del flujo y generando grandes depósitos de sedimentos. Otros cambios relevantes, se producían en las zonas inundables, donde se instalaron redes de canales, las cuales afectaron considerablemente los niveles del río, también se detectaron zonas afectadas por el pastoreo y el pisoteo de ganado y en la parte alta de la cuenca, los procesos de agricultura generaban escurrimientos de sedimentos y nutrientes.

Otra de las problemáticas, era la de los vertederos inadecuados, altos niveles de fosfatos y significativos cambios en la geomorfología del cauce, ocasionados principalmente por dragados histórico como por ejemplo la zona de *Bintree Mill*, donde el río ha tenido fuertes cambios geomorfológicos, es decir, algunas secciones del río son muy anchas y otras zonas demasiado profunda, estos cambios geomorfológicos suman aproximadamente un 35% de la longitud total del río, resaltando incluso lugares, donde se presentan más de 5m de ancho de acuerdo a su estado natural, determinando de manera general que tan solo el 20% del cauce no presentaba modificaciones, como por ejemplo "*las partes del curso inferior del drenaje Langor y secciones del Wensum entre Lenwade Mill y Attlebridge Hall y aguas abajo de Taverham Mill*" (SEAR et al., 2006).

Una encuesta realizada en 2002 indicó el mal estado ecológico del río, y un aumento significativo en la contaminación y la sedimentación, esta última, generada como consecuencia de inadecuados funcionamientos hidrológicos del cauce. Seguidamente en 2004, la Universidad de *Southampton* realizó una evaluación geomorfológica del río con mapas y detalles, dividiendo el río en 41 tramos para una mayor facilidad en el análisis. En 2005 la Agencia de medio ambiente y "*Natural England*" determinaron directrices encaminadas a la restauración de las condiciones geomorfológicas y físicas favorables del río. El proyecto de restauración inició en 2006 y se denominó "*Estrategia de Restauración del Río Wensum*" (NATURAL ENGLAND, 2009), fue liderado por la Agencia de Medio Ambiente y otras organizaciones como: Natural England, Alianza para el Manejo del Agua, Terratenientes Ribereños, propietarios de suelos ribereños y pescadores de la región. Su objetivo era *"La restauración del río de manera sostenible con el fin de satisfacer necesidades de la población, permitiendo una mejor calidad del recurso hídrico, reduciendo el riesgo de inundaciones, entre otros servicios"* (NATURAL ENGLAND, 2009). Lo anterior con el fin de generar beneficios al funcionamiento del régimen hidrológico de manera natural, control de inundaciones en la ciudad de *Norwich*, manejo integral del recurso hídrico y además convertirse en un proyecto piloto para desarrollar nuevas restauraciones en cuencas con similares condiciones.

La recuperación proyectó la recuperación de 70,1 kilómetros del río, desde aguas arriba de la ciudad de *Norwich* en *Hellesdon Mill*, cerca de su nacimiento en *Pear Tree Corner*, hasta los tramos aguas abajo del *Dren Langor* y el *Dren Guist*. Adoptando las siguientes acciones:

1. Los niveles aguas abajo de las estructuras de acero fundido oscilaban entre "*0,1 en Fakenham a 1,36m en Elsing"* (SEAR et al., 2006), por ende fue necesario un trabajo estructural limitado para garantizar mejorar estas condiciones en 18 kilómetros.

2. Mejorar los fondos del canal y las bermas, es decir, una redistribución de sedimentos.

3. Reducción o supresión de estructuras, entre ellos el retiro de 14 molinos.

4. En la parte superior del rio, se requirió la reconexión de 8 kilómetros del río al cauce original.

5. Reducción del ensanchamiento del cauce, es decir, reducción de las secciones en aquellos tramos afectados por dragados significativos, restaurando estas zonas con camas de gravas y conectándolas nuevamente a las zonas de inundación, también se propuso la mejorar de la sinuosidad, es decir, reconstrucción de meandros, Recuperación de las riberas mediante la plantación de árboles y formar bermas de vegetación y la creación de sitios estratégicos vallados para el cruce del ganado.

6. Dentro del proyecto también se recomiendan cambios en la gestión del agua para que el río funcione de forma más natural.

7. Para enfrentar los problemas de calidad de agua, se implementaron plantas de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de fosfatos, estas plantas fueron: "*Fakenham, Dereham y otras obras menores en la zona de captación"* (SEAR et al., 2006); también se implementaron planes para reducir los impactos generados por la extracción de agua inadecuada y respecto a la escorrentía generada por la agricultura, se realizaron proyectos enfocados a mejorar las prácticas agrícolas.

En mayo de 2014 el río fue galardonado con el premio "*England River Prize*" (WENSUM ALLIANCE, 2014), el cual fue entregado por La Asociación de la Restauración del río, WWF-Reino Unido, La Agencia de Medio Ambiente y la Fundación Internacional del río, dado que a la fecha el proyecto ha recuperado 12 de los 70,1 kilómetros propuestos inicialmente.

### 5.2.2. RIO FROME, INGLATERRA

El río Frome está ubicado al sur de Inglaterra, tiene una longitud de 50 kilómetros aproximadamente y un área total de cuenca de 454 km$^2$, con un caudal promedio de 6 m$^3$/s. Su recorrido va desde *Dorset Downs* en *Evershot*, atravesando por *Maiden Newton*, *Dorchester*, *West Stafford* y *Woodsford* y desemboca en el puerto de *Poole*, en el canal *Wareham*. El tramo comprendido entre *Dorchester* y *Wareham*, es considerado como Sitio de Especial Interés Científico (SSSI), en virtud de la vida silvestre, destacable flora acuática, variedad de invertebrados poco

conocidos y además un lugar con una variedad de especies de interés particular en Europa.

En este cauce se destaca gran variedad de fauna y flora. Sin embargo, de acuerdo a una evaluación realizada por "Natural England" en 2009, se mostró que el río no cumplía con los estántadares de calidad y objetivos de conservación, es decir, se encontraba en condiciones desfavorables. Las razones que llevaron a este deterioro son principalmente cambios geomorfológicos tanto al cauce como en las riberas, como por ejemplo la reducción de la longitud del río con la eliminación de meandros, lo cual llevo a generar flujos laminares con notables reducciones de las velocidades del flujo y por ende generando zonas vulnerables a depósitos de sedimentación e inundaciones; otro de los factores se asocian con los dragados históricos, los cuales han generado sectores con zonas más profundas y viceversa, como consecuencia de vertederos y esclusas construidos en el pasado, añadiendo también presiones generadas por inadecuadas prácticas agrícolas.

El objetivo del plan de restauración de río Frome fue "*desarrollar conjuntamente una recuperación acompañada de la ecología y la geomorfología, teniendo en cuenta además que la recuperación conlleve hacia un sistema natural, capaz de adaptarse y responder a los cambios futuros con una gestión sostenible en tiempo y espacio, suficiente para soportar las presiones de cambio climático, prevenir inundaciones y garantizar un suministro de agua a los pobladores de la región"* (NATURAL ENGLAND et al, 2011), dado que serán cada vez más persistentes las presiones extremas futuras y prepararse para que fenómenos como altos volúmenes de agua (avalanchas), mayor sedimentación por escorrentía superficial no afecten las condiciones naturales del cauce y por ende no pongan en peligro aspectos importantes como la cantidad y calidad del recurso disponible.

Las organizaciones encargadas de colaborar con las mejoras en estos ríos, fueron la Agencia de Medio Ambiente, *Natural England*, *Dorset Wildlife Trust*, *Frome*, *Piddle,* Asociación *West Dorset*, clubes de pesca, terratenientes y la comunidad agrícola de la región.

El río fue dividido en 30 secciones, con el fin de garantizar un control y supervisión detallada, dentro de estas secciones, siete están relacionadas directamente con el río y las demás están relacionadas con zonas aledañas al cauce. Se planteó la recuperación de 50 kilómetros del cauce y dentro de las practicas a desarrollar están: evitar las descargas de residuos sólidos y aguas residuales, restablecimiento del cauce natural, es decir, en zonas altas del río, rellenar con gravas limpias, guijarros y cantos rodados, teniendo en cuenta una proporción mínima de sedimentos, mientras que en zonas bajas estos rellenos deben ser una capa de sedimentos muy finos, es decir, con pocos sedimentos gruesos, restablecer antiguos meandros, también se planteó mejorar los hábitats característicos para la vida silvestre, recuperación de riberas con vegetación riparia con el fin de garantizar estabilidad en los bancos y mejorar las condiciones de ribera, mejorando igualmente la calidad de los humedales conectados al río, también reducir el estrechamiento del canal en zonas para mejorar las condiciones de flujo, reperfilar los bancos con el fin de mejorar las condiciones de laderas y permitir unas mejores condiciones a la fauna ubicada en ella, también se propuso como medidas estructurales, la eliminación o reducción de estructuras presentes en el río y así restaurar profundidades del cauce y mejorar velocidades de flujo, manejo adecuado de la ganadería, con lo cual se evita el deterioro de los bancos y el aumento de la contaminación.

Las prioridades del proyecto eran la de cumplir con el objetivo de conservación que el Gobierno de Inglaterra se había fijado, según el Acuerdo de Servicio Público (PSA) y es el de contribuir a restaurar el 95% de SSSI de Inglaterra y devolver a "Condiciones favorables" estos cauces para el 2010, aunque según la evaluación del estado ecológico del río, realizada por "*Natural England"* en 2010, el río aún se encontraba en condiciones desfavorables, es por ello que se tuvo en cuenta que a nivel europeo, para el año 2015, se debe lograr el buen estado ecológico de todas las masas de agua, paralelamente garantizando que se "*promueva un uso sostenible del agua basado en la protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles*" (DMA, 2015).

La primera fase del proyecto, consta de acciones que se considera no tienen obstáculos para su implementación antes de 2015 (por ej. reforestación, recuperación de bancos), que coincide con el final del primer ciclo planteado en la DMA y dentro del plan se espera que el río Frome cumpla con el "Buen Estado Ecológico", mientras que una segunda fase fue proyectada para después de 2015, dado que se consideran acciones que no se pueden completar dentro del plazo previsto inicialmente (por ej. evaluación de llanuras de inundación), es decir, antes de 2015. Las acciones a desarrollar a corto, mediano y largo plazo priorizan acciones de manejo adaptativo a corto plazo, secuencia de trabajos de aguas arriba a aguas abajo y entregas de soluciones a diferentes escalas de tiempo (ej. Construcciones).

## 5.3. REDUCCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las pérdidas de agua en las redes de distribución, son un problema que afecta a pequeñas y grandes ciudades y que según estadísticas, "*una tasa de fugas del 50% es frecuente en los sistemas de distribución urbanos, en donde desde 250 a 500 millones de m³ de agua potable se pierden en muchas mega ciudades cada año, con este volumen se podría abastecer de agua potable a entre 10 y 20 millones de personas más en cada gran ciudad"* (ONU, 1992), y teniendo en cuenta además que "*la población urbana mundial crezca a 6.300 millones de personas en el año 2050 (en el año 2009 era de 3.400 millones)"* (UNESCO, 2012). Es por ello evidente que las principales demandas de agua en el mundo van a producirse en las ciudades, las cuales deben estar preparadas para preservar y distribuir el recurso hídrico de una manera eficiente y sostenible.

Dentro de esta problemática, también se derivan impedimentos para gestionar el recurso de manera eficiente, como por ejemplo las pérdidas de agua en las redes y por ende pérdidas económicas, aumento de la vulnerabilidad por intrusión de contaminantes en las redes, reducción de las presiones y una mayor demanda de agua para lograr compensar los volúmenes que desaparecen.

Pero, las fugas de agua en los sistemas de distribución se consideran inevitables, dado que la vida útil de una tubería oscila

entre 15 y 100 años, dependiendo del material, razón por la cual, se requieren estrategias innovadoras que garanticen la detección de fugas de una manera eficiente, un mantenimiento continuo, bajos costes en las reparaciones y/o reemplazos de las tuberías, tiempos razonables en las reparaciones y con el fin de tener un mayor y mejor control de las redes se deben implementar sistemas de zonificación o sectorización. Estas estrategias deben propender a mejorar la calidad y cantidad del agua disponible, minimizar la sobreexplotación de nuevos recursos hídricos y evitar al máximo que un recurso que cumple con todos los estándares de calidad para uso doméstico y en el cual se ha invertido tiempo, infraestructura y recursos, desaparezca de manera inesperada y que paradójicamente existan millones de personas sin acceso a un servicio digno para sobrevivir.

### 5.3.1. CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

La ciudad de México es la capital de los Estados Unidos Mexicanos y es el principal centro urbano, económico, financiero y cultural del país. Está ubicada a una altitud de aproximadamente 2.200 m.s.n.m y en promedio las precipitaciones anuales son de 750 mm.

La ciudad de México tiene una población de 8,8 millones de habitantes e incluyendo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) la población asciende a los 21 millones de habitantes y se prevé que para el año 2020 sean 25 millones, tal como se muestra en la figura 10. Por lo tanto, considerándose además una de las regiones más pobladas del mundo. La ciudad de México, es un ejemplo claro del reto al cual tienen que enfrentarse grandes ciudades en el mundo, con tendencias al crecimiento demográfico para cubrir las demandas generadas, pero no solo se enfrenta a un incremento de la población, sino que también tiene una baja disponibilidad de recursos hídricos y por ende una mayor tendencia a la sobreexplotación, aspecto que se observa en el acuífero que subyace a la cuenca de México, el cual tiene una recarga de 1.387,2 $Mm^3$/año y el volumen extraído asciende a 1.694,6 $Mm^3$/año, es decir, *"se está generando una sobreexplotación de 307,4 $Mm^3$ cada año"* (SACMEX, 2012). El coste es 256,37$/$m^3$ Pesos Mexicanos, es decir, unos 0,46 €/$m^3$ aproximadamente.

*Figura 9. Ubicación geográfica de Ciudad de México, México (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*

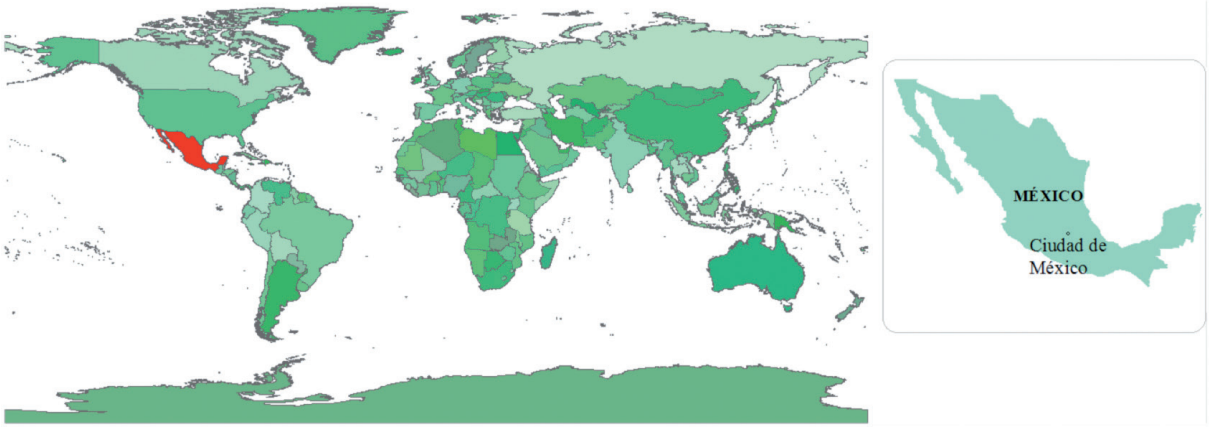
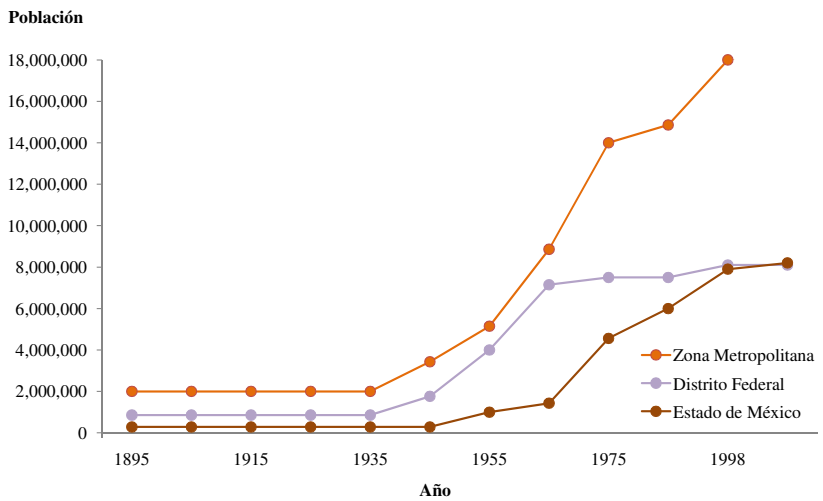



*Figura 10. Crecimiento demográfico en Ciudad de México (Adaptado de SACMEX, 2012)*



En 2011 el caudal promedio era de "*31,9 m³/s*" (GDF et. al., 2012), es decir, 2.756.160 m³/d, donde un 41% de la demanda fue cubierto por el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), mientras el río Lerma aportó el 13%, el sistema de Cutzamala cubrió un 28% de la demanda total y el restante 18% fue cubierto por manantiales, el río Magdalena y otras fuentes ubicadas al norte y oriente de la ciudad.

El sistema de abastecimiento cuenta con 13.811 kilómetro de red aproximadamente, "*357 tanques de almacenamiento, 268 plantas de bombeo, 49 plantas potabilizadoras, 976 pozos y 69 manantiales*". (GDF et. al., 2012).

Otro de las problemáticas a la cual tiene que enfrentarse esta gran ciudad, es a las pérdidas de agua en las redes de distribución donde "*las fugas en la red son del orden del 35%*" (SACMEX, 2012) y cuyo origen radica principalmente en el mal estado de las tuberías que en muchos casos ya han cumplido y sobrepasado su vida útil y a los hundimientos desde 6 a 30 cm/año provocados principalmente por la sobreexplotación del acuífero, los cuales producen grandes cambios en la topografía que por consiguiente repercuten en las infraestructuras hidráulicas, como por ejemplo en el alineamiento, generando contrapendientes y en el peor de los casos, fractura de las tuberías.

Teniendo en cuenta las problemáticas antes descritas, incrementar la dotación de agua potable y mejorar la calidad se convirtieron en prioridad para El Gobierno del Distrito Federal, que por medio del Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACMEX) formuló el Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos (PGIRH), en el cual se plantea una mejora en la distribución de agua potable, mediante la detección y reparación de fugas, apoyado en la sectorización de la red de distribución y la construcción y rehabilitación de redes.

En "*el año 2004 fue iniciado el proyecto de sectorización de la red*" (SACMEX, 2012), estrategia que ha permitido delimitar y separar zonas de redes primarias y secundarias, con el fin de tener un mayor control del agua que se pierde en las tuberías y las presiones en las diferentes líneas. Actualmente, la Ciudad de México cuenta con siete macrosectores, dentro de los cuales hay 336 sectores de la red de distribución secundaria, lo cual permite tener un mayor control de las pérdidas generadas durante la distribución, una distribución más homogénea y eficiente de los caudales y un control de las presiones, dado que en zonas donde se superen los 3 kg/cm² ó 30 metros de columna de agua, se instalan válvulas reductoras de presión automáticas, con lo cual también se evita la roturas de las tuberías.

Dentro de las técnicas utilizadas para modernizar y rehabilitar las redes de distribución, se ha utilizado un método denominado "*reventamiento de tuberías, el cual es un método que no considera zanja*" (GDF et. al., 2012), y minimiza los volúmenes de excavación y molestias a los usuarios, estas tecnologías permiten además el reemplazo de tubería de materiales rígidos como el asbesto cemento, por materiales plásticos flexibles como el polietileno de alta densidad (PEAD), un material adecuado para las condiciones geológicas del subsuelo de una ciudad con alta vulnerabilidad a sismos y hundimientos. Los resultados de la construcción y rehabilitación de tuberías para el periodo 2007 – 2011, se muestran en la figura 11, donde se evidencia que en el año 2011, 852 kilómetros de tubería quedaron en condiciones óptimas de funcionamiento, de los cuales 791 km de red de agua fueron rehabilitados y 61 kilómetros de red fueron construidos. Sin embargo, desde el 1998 a 2012, "se han rehabilitado 1,519 Km de redes". (GDF et. al., 2012).

De acuerdo a los resultados obtenidos, se ha demostrado que en la Ciudad de México, la rehabilitación de tuberías con sistemas no convencionales ha generado grandes beneficios en cuanto a sobrecostes socioeconómicos que conlleva el reemplazo de tuberías en zanja abierta, se han evitado sobrecostes en la apertura de zanja y excavaciones, además se han minimizado los problemas de interferencias con otras redes de servicios públicos y lo más importante de todo es tener la garantía que al rehabilitar las tuberías existente, están tendrán una vida útil duradera, que los tiempos de intervención son mínimos, es decir, los tiempos son inferiores a los requeridos cuando la rehabilitación se realiza con zanja abierta, reduciendo a la vez los problemas en vías con altos volúmenes de tránsito, sectores comerciales, o sectores en donde hacer una intervención con zanja abierta sería impensable.

*Figura 11. Construcción y rehabilitación de tuberías 2007- 2011 (Adaptado de SACMEX, 2012).*

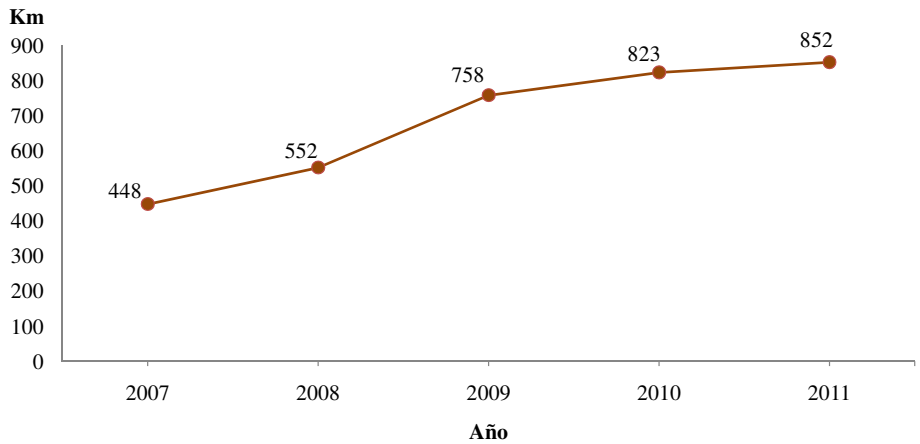


*Figura 12. Ubicación geográfica de Madrid, España (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*

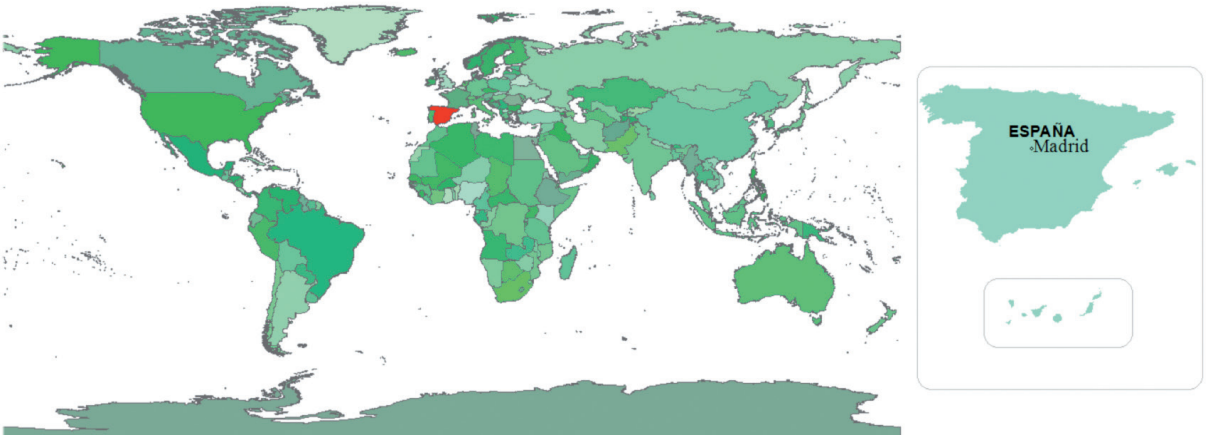
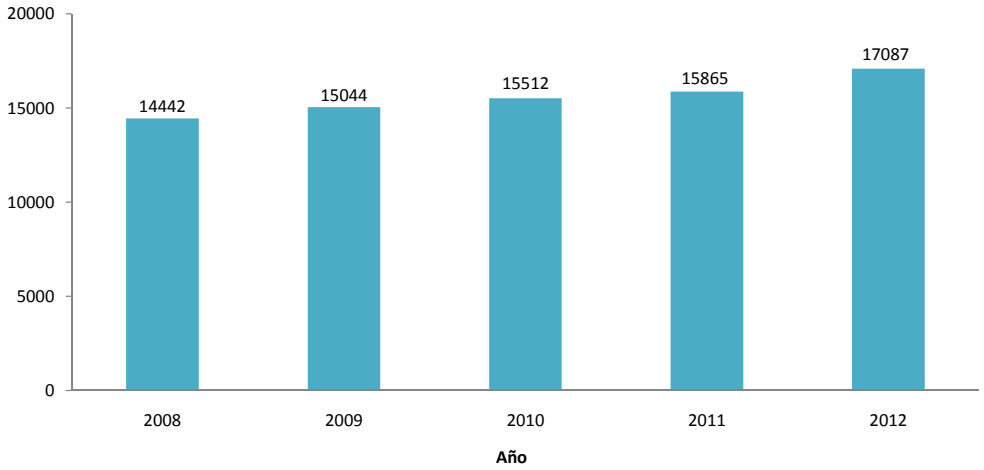



*Figura 13. Red de distribución - Comunidad de Madrid. (CANAL ISABEL II GESTIÓN, 2012)*




### 5.3.2. MADRID, ESPAÑA

Madrid, es la capital de España y de la comunidad de Madrid. Se ubica geográficamente en el centro de la Península Ibérica con una altitud de 660 m.s.n.m, es una zona donde "las *precipitaciones anuales medias (438 mm) son muy inferiores a la evapotranspiración potencial (937 mm), y por lo tanto el déficit hídrico anual asciende a los 499,7 mm*" (ÁREA DE GOBIERNO DE MEDIO AMBIENTE Y SERVICIOS A LA CIUDAD, 2013), razón por la cual, se deben garantizar grandes reservas con el fin de minimizar impactos de escases en épocas de verano.

Dado que cuenta con limitados recursos hídricos, también se enfrenta a un crecimiento demográfico, dado que "*la población en 2013 era de 6.845.879 habitantes y según proyecciones, se prevé que para el año 2017 serán 7.211.497 de habitantes*" (INE, 2012) y otro factor importante es que sus redes de distribución en su mayoría ya han cumplido su vida, dado que comenzaron a construirse desde el año 1851.

La entidad encargada de la gestión integral del recurso hídrico en la Comunidad de Madrid es la sociedad Canal de Isabel II Gestión. De acuerdo a la figura 13, actualmente son 17.087 kilómetros de red y el "*coste unitario del agua en el año 2011, se situó en 1,06 €/m³*" (INE, 2012).

Dentro de las prácticas adoptadas para ser más eficiente en cuanto a la distribución del recurso hídrico esta la sectorización y rehabilitación de redes. La sectorización es una gestión que se viene realizando desde el año 2005 y cuyo objetivo ha sido la de distribuir de manera eficiente las redes y tener un mejor control sobre la gestión y operación de la infraestructura.

La red de distribución, está actualmente dividida en 49 zonas de las cuales16 pertenecen a la Comunidad de Madrid y "*el diseño de la sectorización realizado se puede dividir en tres fases principales: recopilación y análisis de la información existente, modelización hidráulica y propuesta de sectorización*" (FFIA, 2009). En una primera fase, se recopiló y analizó la información mediante herramientas SIG, análisis de incidencias, es decir, abandono y roturas de tuberías, estudios de consumo de acuerdo a cada actividad y zona, diseño de una sectorización actual y la proyección con diferentes crecimientos urbanísticos, ingreso de información de caudales y presiones, obtenida con instru-

mentación fija telecontrolada, con lo cual se permite tener en tiempo real el comportamiento de las diferentes infraestructuras hidráulicas. Seguidamente se realizó una modelización hidráulica, donde se reflejan las curvas de comportamiento de las demandas durante las 24 horas, y finalmente, se obtuvo el modelo de sectorización.

Respecto a la rehabilitación de redes, cuyo objetivo primordial era el de reducir las pérdidas reales, es decir, aquellas ocasionadas por fugas, roturas y averías en las redes de distribución, se destaca que en 2003 el porcentaje de pérdidas en las redes de distribución era de 14.1%, lo cual era equivalente a un volumen de 90 $Hm^3$, ya en el año 2007 se generaron pérdidas del 9,6%, es decir, 25 L/Hab-día y para el año 2011 estas pérdidas se redujeron a 6,6%, equivalentes a 16 L/Hab-día, es decir, desde el año 2003 al año 2011 hubo una reducción de pérdidas del 46,8%. El volumen total de agua abastecida en la Comunidad de Madrid en 2011 fue de 465 $Hm^3$, es decir, 192 L/Hab-día y se prevé que para 2020 una demanda de 730 $Hm^3$.

Pero, estas rehabilitaciones no solo estuvieron enfocadas a reducir las pérdidas, también ha se ha puesto como misión la reducción de impactos sociales y ambientales, razón por la cual desde noviembre de 2010, el Canal de Isabel II, La Asociación Española de Abastecimiento de Agua, entre otros organismos y entidades firmaron "la carta de la ciudad sin zanja", la cual promueve el uso de tecnologías sin zanja *o trenchless tecnology (*TT), aptas para la rehabilitación de redes de abastecimiento sin obras superficiales, promoviendo la protección y mejora del medio ambiente. Estas tecnologías sin zanja, permiten que la ciudad sea más transitable, que los tiempos de intervención se reduzcan de manera considerable y es por ello que se puede decir, que son tecnologías que satisfacen las necesidades actuales y no compromete las capacidades de las futuras generaciones, además son "*aprobadas por la ONU como tecnologías ecológicamente racionales y medioambientalmente sostenibles"* (IbSST, 2012).

Son tecnologías eficientes, dado que minimizan el ruido generado por los equipos de excavación, reducen la contaminación por ruido y polvo, evitan los desvíos del tránsito y los atascos generados normalmente cuando se producen intervenciones con zanja y su procedimiento es menos complejo que las intervenciones convencionales, también se aprovecha el alineamiento de las tuberías existentes, con lo cual se garantiza un refuerzo estructural a la nueva tubería instalada.

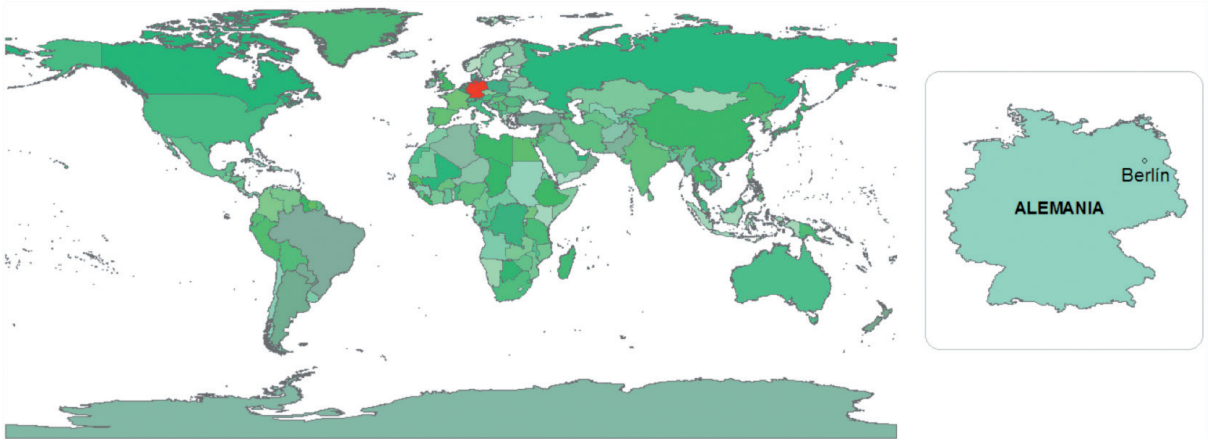
El proceso de intervención de manera general es el siguiente: inicialmente, se realiza una limpieza de la tubería existente, mediante agua a presión o rascador mecánico, seguidamente se realiza el diagnóstico de la red, mediante la inspección con Cámaras con Circuito Cerrado de Televisión (CCTV), permitiendo conocer en tipo real el estado hidráulico, operativo, constructivo y estructural de la tubería y a partir de ello determinar qué tipo de intervención (mantenimiento o rehabilitación), con lo cual se permite decidir si la tubería requiere una reparación puntual o una rehabilitación completa, después de hacer la intervención de acuerdo a los procesos específicos de cada tecnología, se realiza nuevamente una inspección con CCTV para garantizar que su instalación se haya realizado de manera correcta, seguidamente, se hace un lavado de la tubería y una puesta en funcionamiento.

La experiencia de Madrid con relación a la reducción de fugas en las redes de distribución es destacable y replicable en cualquier otra ciudad, pues mediante una claro y preciso proceso de sectorización y una planificación estratégica en la rehabilitación, utilizando tecnologías innovadoras, ha logrado reducir de una manera considerable las fugas, con lo cual también se evita sobreexplotación del acuífero y de las fuentes superficiales y se convierte en un ejemplo evidente y palpable de ciudad sostenible.

### 5.3.3. BERLÍN, ALEMANIA

Es la capital y ciudad más grande de Alemania, se ubica en el centro de Europa y tiene aproximado 3,5 millones de habitantes. La altitud media es de 34 m.s.n.m. y las precipitaciones anuales son en promedio de 570 mm, considerándose además una ciudad con grandes ventajas hídricas, dado que cuenta con tres ríos, el río *Spree*, *Havel* y *Dahme* y además cuenta con una gran oferta hídrica subterránea.

*Figura 14. Ubicación geográfica de Berlín, Alemania (Adaptado de DIVA-SIG, 2014)*



La ciudad se abastece con agua subterránea, primero porque la recarga del acuífero se realiza de manera natural por infiltración de precipitaciones y segundo porque existe un proceso natural de purificación del agua al pasar de la superficie por las diferentes capas geológicas, aportando al agua minerales excepcionales para el consumo humano.

La longitud de tubería de agua potable es de 7.840 kilómetros, con diámetros que varían desde los 8 a 140 cm, tiene 650.000 hidrantes, 650 pozos con profundidades de hasta 140 metros. La demanda de agua para consumo humano, industria y comercio asciende a unos 546.000 $m^3/d$, y el coste es de 1.69 €/$m^3$ para el año 2014.

La construcción del metro de Berlín hace más de 100 años, obligó a planificar e instalar las redes de acueducto muy profundas, lo anterior teniendo como consideración que las vías de gran tamaño tienen prioridad sobre las de menos tamaño. Sin embargo, la mayoría de las tuberías ya han cumplido su vida útil, razón por la cual presentan grandes problemas y además el Gobierno de Berlín promulgó una reglamentación para la protección de los árboles, dado que Berlín es una de las ciudades alemanas con mayor cantidad de árboles y las redes de distribución atraviesan justo bajo los árboles, lo cual impedía realizar un reemplazo de tuberías a zanja abierta, razón por la cual se debieron desarrollar varios métodos de construcción que minimizaran las vibraciones y aperturas de zanja.

Dado lo anterior, y con el objetivo de ofrecer un agua limpia, utilizando tecnologías modernas, ecológicas, y sostenibles socialmente, a partir de los años 1980, se inició la rehabilitación de tuberías de presión, minimizando las vibraciones y evitando extraer las tuberías deterioradas existentes. Estas tecnologías se denominaron tecnologías *trenchless* o tecnologías sin zanja.

Otra de las estrategias utilizadas para reducir las pérdidas en las redes de presión, ha sido un servicio de reparación día y noche, lo cual hace aún más eficiente la gestión y las reparaciones de menor daño de manera inmediata y las fugas que no se detectan de manera visual, son analizadas mediante amplificadores que detectan de acuerdo a la presión, material, longitud y diámetro de la tubería el lugar exacto de la fuga.

Adicionalmente, y dadas las condiciones geológicas de la región, el agua potable no requiere un tratamiento previo antes de su distribución, es decir, no se agregan aditivos químicos, dado que existen una purificación natural y aunque esta agua contiene hierro y magnesio, minerales no perjudiciales para la salud, estos son reducidos antes de la distribución y después de las reparaciones y antes de poner en servicio la red, se hace de manera preventiva un proceso de desinfección utilizada Dióxido de Cloro, evitando que exista algún tipo de contaminante para en la tubería y llegue a los usuarios. Adicionalmente, en la ubicación de cada uno de los pozos de extracción, se han establecido áreas de conservación, zonas que suman un aproximado de 230 $km^2$ (Berlín tiene una extensión de 890 $km^2$), con el fin de ejercer un exhaustivo control y cuidado de las zonas de extracción.

*Tabla 1. Composición del agua de Berlín*

| | Valores medidos (mg/L) | Valores limites (mg/L) | Ingesta diaria recomendada (mg/L) |
|---|---|---|---|
| Calcio | 94 a 147 | — | 800 |
| Hierro | <0,03 | 0,2 | 14 |
| Potasio | 2,09 a 8,02 | — | 1 |
| Magnesio | 8,4 a 15,8 | — | 300 |
| Sodio | 23 a 68 | 200 | — |
| Cloruros | 37 a 98 | 250 | — |

*Fuente: Adaptado de BWB.*

Adicionalmente, y con el fin de garantizar una calidad óptima del agua potable, se realiza un completo monitoreo en tiempo real de más de 2.500 parámetros químicos y biológicos. Este análisis se realiza en el suelo, en los pozos, en las obras, en las líneas de distribución y en los puntos finales o de consumo, dentro de los cuales se encuentra el análisis de elementos esenciales como se muestran en la tabla 1.

Actualmente, se instalan tuberías hasta de 3.000 mm de diámetro, y paralelamente, se cuenta con tres salas de control (*Leitwasserwerke Friedrich Hagen*, *Tegel* y *Beelitzhof*), donde se ejerce una estricta supervisión a las redes de abastecimiento, teniendo en cuenta además que "*la presión y el flujo de agua potable está regulada y controlada constantemente en numerosos puntos de la red de tuberías*" (BWB, 2014).

Dado el exhaustivo y riguroso mantenimiento que se le hace a las redes de distribución, tan solo "*In Berlin versickern lediglich zwei Prozent des Wassers aus den Rohren*" (BWB, 2014), es decir, que tan solo un 2% del total del agua distribuida en las redes se desaparece, lo que hace de esta una gestión sostenible y ejemplo a nivel mundial.

## 6. OTROS ASPECTOS

Las infraestructuras y gestiones sostenibles para la potabilización y distribución de agua potable deben tener en cuenta intrínsecamente dos aspectos importantes, el primero de ellos es la gestión integral del riesgo, una visión futurista, donde no solo que realice un balance transversal de la oferta y la demanda, sino que también debe existir una resiliencia ante las presiones naturales, socio- naturales y antropogénicas que se presentan en muchas regiones del mundo y que puedan afectar en mayor o menor medida la potabilización y distribución del recurso hídrico. El segundo aspecto importante es la salud pública, dado que suministrar agua que cumpla con estándares de calidad y que minimice los índices morbilidad y mortalidad de seres humanos debe ser una prioridad desde cualquier infraestructura o gestión.

### 6.1. GESTIÓN DEL RIESGO

Las infraestructuras de potabilización y distribución de agua potable, se enfrentan durante su vida útil a presiones naturales (sismos, erupciones volcánicas, tsunamis, huracanes e

inundaciones), socio naturales (movimientos en masa, avenidas torrenciales, sequias, incendios forestales y erosión costera) y antropogénicas (contaminación, acciones violentas, interrupción del fluido eléctrico, colapso en la infraestructura de los sistemas de prestación y fallas tecnológicas) que sumadas a vulnerabilidades físicas, sociales, institucionales, económicas y ambientales generan grandes desequilibrios en los sistemas, que aumentan los riesgo y disminuyen la posibilidad de gestionar de manera adecuada el recurso. En tal sentido, se tendrán que generar y promover estrategias encaminadas a la gestión del riesgo, que incluyan acciones para disminuirlo, es decir, que permitan conocer mejor los riesgos a los cuales se enfrentan los diferentes sistemas, proyectando planes de emergencia y contingencia que garanticen acciones oportunas y eficientes para garantizar de manera continua el abastecimiento de agua.

### 6.2. SALUD PÚBLICA

Existe una relación evidente entre las infraestructuras de potabilización y distribución de agua potable con la salud pública, dado que, la falta de infraestructuras adecuadas de abastecimiento de agua, conduce a enfermedades como el cólera, la diarrea, el paludismo, la leishmaniasis y la esquistomsomisis; produce además que "*más de 2,2 millones de personas, en su mayoría en países en desarrollo, mueren cada año a causa de enfermedades relacionadas con la baja calidad del agua...*" (ONU, 1992).

Se considera además, que las poblaciones infantil es la más afectadas al consumir agua en condiciones inadecuada, y que los índices de morbilidad y mortalidad infantil, son sustancialmente más bajos para los niños con acceso al agua de calidad teniendo en cuenta que: "*water and sanitation infrastructure lowers the odds of children under-5 to suffering from diarrhea by 7-17%, and reduces the mortality risk for these children by about 5-20%*" (BM, 2010).

Es decir, adecuadas infraestructuras y gestiones para el suministro de agua, no solo satisfacen las necesidades básicas diarias de una población, sino que conllevan a mejorar de manera considerable aspectos sociales, económicos, ambientales, reducción de enfermedades infecciosas, protección de la salud y desarrollo de las sociedades. Sin embargo es importante considerar, que "*la Protección de la salud pública, es una tarea que no sólo requerirá suministrar agua potable libre de gérmenes patógenos, sino también luchar contra los vectores de enfermedades en el medio acuático*" (ONU, 2013).

Las gestiones ante esta problemática, requiere de un cooperación entre entidades del estado y entidades gestoras del recurso hídrico, donde se integren soluciones para la protección de las fuentes hídricas de abastecimiento y un manejo adecuado de residuos sólidos y aguas residuales, promoviendo gestiones acompañada si es necesario de infraestructuras que contribuyan al cuidado y protección de las masas de agua y por ende a un cuidado y protección de la salud de las personas.

## 7. CONCLUSIONES

El agua es uno de los recursos más importantes del mundo, es vida y desarrollo. Sin embargo, las demandas de agua crecen de manera desproporcionada, generándose de manera paralela grandes presiones naturales, socio-naturales y antropogénicas sobre el recurso hídrico, situaciones que afectan de manera directa la oferta de agua y obligan a proyectar estrategias no convencionales e innovadoras que generen soluciones eficientes, sostenibles y que garanticen un manejo integral del recurso, donde los principales objetivos sean ofrecer agua en condiciones óptimas, es decir, de calidad, volúmenes adecuados y sobre todo que promuevan el cuidado y protección de las cuencas hidrográficas, es decir, que sean estrategias amigables con el medio ambiente.

Este trabajo de investigación ha mostrado la experiencia de algunas regiones en el mundo que han optado por soluciones sostenible para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, promoviendo una gestión integral, reduciendo la contaminación y planteándose perspectivas que contribuyan a mejorar la calidad y cantidad de agua disponible, es por ello que mediante tres estrategias se concluye la experiencia de estas regiones, las cuales pueden ser replicables en ciudades con similares problemáticas, lo cual se convertiría en un buen comienzo para un futuro más sostenible, donde la equidad en cuanto al recurso hídrico sea un factor de desarrollo para una vida más digna.

La primera estrategia es la recuperación y reutilización de aguas residuales, experiencia que en comunidades como: Windhoek la capital de Namibia en África, Singapur en Asia y el condado de Orange, California en Estados Unidos, han demostrado que es una práctica que mejora las condiciones naturales del medio ambiente, dado que son aguas tratadas y reutilizadas en la misma zona donde se producen, lo cual disminuye costes de infraestructuras para el transporte y requiere bajos consumos de energía; además conllevan de manera directa a mejorar la calidad de masas de agua subterránea y superficial, reduce la sobreexplotación; convirtiéndose en una alternativa económicamente viable y sostenible para pequeñas y grandes comunidades que presenten situaciones de estrés hídrico o que su ubicación geográfica le impida obtener con facilidad agua de fuentes convencionales.

Otras de las grandes ventajas de la recuperación y reutilización de aguas residuales, es la disponibilidad constante, es decir, que la oferta no dependerá de fenómenos hidroclimatológicos y las variaciones en los volúmenes tratados no serán muy drásticas. Respecto a la calidad, siempre existirá la facilidad para ajustar el agua según los usos demandados, dado que las exigencias en el tratamiento serán mayores o menores y por ende se verán reflejados en los costes.

La segunda estrategia está encaminada a dar una solución sostenible a las fuentes superficiales de agua e incluso se han demostrado grandes cambios en cuanto a calidad y cantidad del recurso hídrico, es restauración de cuencas hidrográficas que de acuerdo a experiencias en los ríos Wensum y Frome en Inglaterra, se ha demostrado que planteamientos claros, coherentes y bien planificados, garantizan un acceso a un recurso de calidad y contribuyen además al desarrollo integral de las comunidades e intrínsecamente al cuidado y protección del medio ambien-

te, devolviendo las condiciones óptimas a los cauce. Dentro de los factores que integran esta estrategia está la reforestación, dado que se reduce la contaminación por dióxido de carbono ($CO_2$) y aumenta el oxígeno, también se destaca la implementación de prácticas legales de minería, ganadería y agricultura las cuales contribuyen de manera directa con la recuperación y conservación de estos espacios. Es una estrategia con ventajas cuantificables en cuanto a una mejor calidad de las aguas y una reducción de coste en tratamientos convencionales (reducción de sedimentos y contaminación antropogénica).

Finalmente, la tercera y última estrategia está relacionada con la sostenibilidad en ciudades y está encaminada a reducir las fugas en las redes de distribución, dado que una ciudad sostenible, es aquella que pueda garantizar un acceso al agua potable de calidad y cantidades optimas y es quizás ahora uno de los retos más importantes para las grandes y pequeñas ciudades, dado que son las urbes los lugares donde actualmente se concentra la mayor parte de la población y de acuerdo a las tendencias de los próximos años, se proyectan grandes crecimientos urbanos. Es por ello que una buena gestión del recurso hídrico, y la implementación de avanzadas tecnologías en la detección temprana de las fugas y soluciones sostenibles en la rehabilitación de redes, evitando sobrecostes (excavación, rellenos de material, tiempos de instalación, reposición de pavimentos, asfaltos y aceras) y afectaciones socioeconómicas a la población y al comercio, se reducirán de manera considerable las pérdidas de agua en las redes y garantizarán un recurso vital para el futuro y desarrollo de las ciudades, descartando la gestión de nuevas fuentes de aguas sin primero reducir el porcentaje de perdidas generado por el mal estado de las tuberías.

Dentro de los métodos para detectar fugas se encuentran: CCTV, equipos sónicos de detección de fugas, la sectorización. Mientras que en la rehabilitación de tuberías, las tecnologías sin zanja, contribuyen al cuidado y protección del medio ambiente, evitando la contaminación, problemas con otras redes de servicios y minimizando las afecciones al tráfico y el comercio, ofreciendo de una manera general una solución sostenible para las ciudades.

De acuerdo a estas tres estrategias planteadas, es claro que se requieren infraestructuras y gestiones sostenibles para la potabilización y distribución del agua, que garantice un recurso en iguales o mejores condiciones para las futuras generaciones, que aseguren una sostenibilidad económica, ambiental y social de las regiones, que reduzcan la sobreexplotación y la presiones antropogénicas ejercidas sobre el recurso, que sean estrategias sostenibles en tiempo y en el espacio, que garanticen la cantidad y calidad de agua que los seres humanos requieren para su supervivencia, deben ser además estrategias que contemplen costos razonables a largo plazo, bajos consumos de energía, operaciones y mantenimientos sencillos y que perduren en el tiempo y sean amigables con el medio ambiente.

Finalmente, se concluye mediante un comparativo de tarifas en seis casos de los ocho caso analizados, que las tarifas de agua recuperada y reutilizada para el consumo humano son inferiores a las tarifas donde el agua es captada de fuentes convencionales.

*Tabla 2. Comparativo de tarifa por m³ de agua potable en casos de estudio*

| Ciudad | Origen del recurso | Tarifa (€/m³) |
|---|---|---|
| Windhoek, Namibia | Recuperación y reutilización | 0,75 a 2,30 |
| Singapur, Asia | Recuperación y reutilización | 0,70 |
| Orange, California (2011) | Recuperación y reutilización | 0,15 |
| Madrid, España | Agua superficial y subterránea | 1,06 |
| Ciudad de México, México | Agua superficial y subterránea | 0,46 |
| Berlín, Alemania (2014) | Agua subterránea | 1,69 |

## 8. GLOSARIO

**Afluente:** curso de agua (arroyos o río secundarios), también llamado tributario que desembocan en un río principal.

**Agua potable:** aquella que puede ser consumida sin restricciones, es decir, que cumple con todos los requisitos organolépticos (olor, sabor, y percepción visual), físicos, químicos y microbiologías sin presentar riesgos para la salud humana.

**Aguas residuales domésticas:** son las aguas generadas por los habitantes, es decir, es la producida en los hogares.

**Anti-incrustante:** es un compuesto químico, que previene incrustaciones inorgánicas, metales y coloide en las membranas y reduce además el ensuciamiento.

**Carbón en polvo activado (PAC):** es un tratamiento útil para deficiencias en sabor y color del agua, funciona rápida y eficazmente, pero está limitado a depuraciones de menor escala que la GAC.

**Carbón Granular Activado (GAC):** partículas de aproximadamente un milímetro de diámetro, equivalente a diez o cien veces el tamaño de las partículas de carbón en polvo. Tienen una capacidad de adsorción de compuestos orgánicos solubles, nitrógeno, sulfuro y metales pesados.

**Contaminación del agua:** alteración de las características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas como resultado de procesos naturales o antropogénicas.

**Cuenca Hidrográfica:** es una unidad natural superficial, cuyos límites están definidos por una división geográfica del territorio.

**Efluente:** curso de agua, llamado también distributario, que se deriva o emana de un río, arroyo, estación, etc. de manera natural o artificial.

**Estado ecológico:** es la calidad de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, el cual se determina entre otros, a través de indicadores de calidad biológica, mediante valores que se fijan en condiciones ideales.

**Estrés hídrico:** es un fenómeno donde la demanda de agua es superior a la cantidad disponible con lo cual se generan grandes y graves presiones sobre el recurso.

**Filtración por carbón activado (BAC):** es un adsorbente utilizado con frecuencia en la eliminación de contaminantes orgánicos y compuestos que imparten sabor, color y olor al agua. Las dos formas más comunes son Carbón en polvo Activado (PAC) y Carbón Granular Activado (GAC).

**Influente:** agua residuales que son tratados en una estación depuradora y que luego son retornadas a las fuentes superficiales o reutilizadas.

**Luz Ultravioleta (UV):** método de desinfección, que permite destruir la cadena de ADN y la reproducción de microorganismos (virus, bacterias, hongos, algas, y protozoos), dado que al exponerlos a la radicación UV, ésta penetra la pared celular llegando hasta el núcleo donde se encuentra la información genética.

**Microfiltración (MF):** es una técnica que remueve partículas (sólidos en suspensión, protozoos y baterías) de tamaño superior a 0,1 – 1,0 µm.

**Modelización hidráulica:** es la reproducción, a escala reducida, de fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua.

**Nivel dinámico:** es la profundidad del agua subterránea durante la extracción, es decir, cuando la rapidez de llenado del pozo se equilibra con la del bombeo.

**Osmosis Inversa (RO):** es una tecnología donde una membrana semipermeable deja pasar el agua a presión de un lado con bajas concentraciones hacia un lado de mayores concentraciones, con lo cual se eliminan productos químicos disueltos, virus y productos farmacéuticos.

**Ozonización:** es una técnica de desinfección (eliminación de virus y bacterias) que permite la conversión de compuestos peligrosos en otros de menos agresividad. No genera sólidos disueltos adicionales, reduce los olores, no afecta el pH y aumenta la oxigenación de los efluentes.

**Potabilización:** proceso que se lleva a cabo sobre cualquier agua para transformarla en agua potable y apta para el consumo humano.

**Presiones Antropogénicas:** Son aquellas cuyo origen radica en la acción del hombre sobre los elementos de la naturaleza (aire, agua y tierra) o población y que por ende ponen en grave peligro al hombre, sus obras y su medio ambiente.

**Presiones naturales:** aquellas asociadas con la manifestación de un fenómeno de origen natural. Se clasifican de acuerdo con sus orígenes en terrestres o atmosféricos, permitiendo identificar, entre otras, amenazas geológicas y amenazas hidrometeorológicas.

**Presiones socio-naturales:** asociadas con fenómenos físicos cuya existencia, intensidad o recurrencia se relacionan con procesos de degradación ambiental o de intervención humana en los ecosistemas naturales, como por ejemplo la deforestación y degradación o deterioro de cuencas hidrográficas.

**Recurso hídrico:** lo integran las aguas renovables superficiales (aguas lluvias y deshielos que discurren alimentando arroyos, ríos, lagos y lagunas) y subterráneas (agua lluvia que se infiltra en los acuíferos).

**Redes de distribución de agua potable:** conjunto de tuberías que trabajan a presión y a partir de las cuales se bastecen a las viviendas.

**Regímenes hidrológicos:** variaciones del estado y características de una masa de agua que se repiten regularmente en el tiempo y en el espacio y que son cíclicas o estacionales.

**Sostenibilidad:** es satisfacer las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

**Tecnologías sin zanja:** técnicas cuyo objetivo es minimizar o eliminar la excavación superficial, reduciendo daños ambientales y minimizando costos asociados a movimiento de tierras.

**Ultrafiltración (UF):** es una técnica que permite separar microorganismos, virus y hasta macromoléculas del agua. Con un tamaño de poros que varían entre 0,1 – 0,005 µm.

**Uso indirecto de agua potable:** es agua recuperada y reutilizada en la reinyección a fuentes convencionales de abastecimiento (embalses y acuíferos), para su posterior uso.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

ÁREA DE GOBIERNO DE MEDIO AMBIENTE Y SERVICIOS A LA CIUDAD. 2013. *Plan Municipal de Gestión de la Demanda de Agua en la Ciudad de Madrid*, 17.

BM. 2010. *Water, Sanitation and Children's Health*. <Accesible en URL: http://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/1813-9450-5275>.

BWB. 2014. *Suministro de agua potable.* <Accesible en URL: http://www.bwb.de/content/language1/html/941.php>.

DEMOGRAPHIA. 2014. *Demographia world urban areas*. Illinois. <Accesible en URL: http://www.diva-gis.org>.

DIVA-SIG. 2014. *Download data by country*. <Accesible en URL: http://www.diva-gis.org>.

DMA. 2015. *Por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.*

FFIA. 2009. *Jornadas de Ingeniería de agua 2009.* Madrid. <Accesible en URL: http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/CP01rev.pdf>.

Gobierno del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente y SAMEX. 2012. *Programa de Gestión Integral de los recursos hídricos, visión 20 años.*

GWRS. 2014. *Etapas de purificación*. Condado de Orange. <Accesible en URL: http://gwrsystem.com>.

IbSST. 2012. X edición de la Firma de la Carta de la Ciudad Sin Zanja. Madrid. <Accesible en URL: http://www.ibstt.org/ultimas_noticias/tecma_Xedicion.pdf>.

INE. 2012. *Indicadores sobre el agua 1996-2011.*

LAZAROVA Valentina, Asano Takashi, Bahri Akiça Anderson John. 2013. *Milestones in water reuse – The Best Success Stories*. IWA publishing London New York. 53-62, 297-313, 351-355.

Natural England y Environment Agency, 2011. *River Frome Geomorphological Assessment & Rehabilitation Plan*.

Natural England, 2009. *River Wensum restoration strategy*.

OCWD. 2014. Condado de Orange. <Accesible en URL: http://www.ocwd.com>.

ONU. 1987. *Our Common Future*. Oslo. <Accesible en URL: http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>.

ONU. 2013. *Objetivos de Desarrollo del Milenio*. New York. <Accesible en URL:http://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/mdg-report-2013-spanish.pdf>.

ONU. 1992. *Programa 21*. Río de Janeiro. <Accesible en URL: http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21sptoc.htm>.

SACMEX. 2012. *El gran reto del agua en la ciudad de México. Pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo.*

Sear D.A., M. Newson, J.C. Old, C. Hill. 2006. *Geomorphological Appraisal of the River Wensum Special Area of Conservation*. English Nature Research Reports, No 685.

UE//ICLEI. 1994. *Carta de las Ciudades Europeas hacía la Sostenibilidad.*

UNESCO. 2003. *WWRD1-Water for People, Water for Life*. Paris. <Accesible en URL: http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001494/149406s.pdf#page=1>.

UNESCO. 2006. *WWRD2-Water a shared responsibility*. Paris. <Accesible en URL: http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001454/145405E.pdf#page=1>.

UNESCO. 2012. *WWRD4-Managing Water under Uncertainty and Risk*. Paris <Accesible en URL: http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>.

Watereum. 2014. *Ten Attributes of Effectively Managed Water Sector Utilities*. <Accesible en URL: http://www.watereum.org/resources/interactive-primer/ten-attributes >.

Wensum Alliance. 2014. *Río Wensum – Demonstration Test Catchment Project*. <Accesible en URL: http://www.wensumalliance.org.uk/newsletters/140508_England_River_Prize_Pressrelease_Wensum.pdf >.

proyectos 2014

editores
**Universidad de Alcalá**
**Universidad Rey Juan Carlos**

diseño y maquetación
**base 12 diseño y comunicación**

ISBN
**978-84-697-1453-9**