

**ESTIMACIÓN DE LA TASA DE  
RECARGA DEL ACUÍFERO  
ALUVIAL “JARAMA-TAJUÑA”  
MEDIANTE MODELO RENATA**

**ESTIMATION OF THE RECHARGE  
OF THE ALLUVIAL ACUIFER  
“JARAMA-TAJUÑA” USING RENATA  
MODEL**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:  
D<sup>a</sup> MARÍA PUENTE NIETO**

**Dirigido por:  
Dr. FRANCISCO CARREÑO CONDE**

**Alcalá de Henares, a 06 de Junio de 2022**



# Índice

1. Resumen .....	1
2. Introducción .....	2
3. Objetivos.....	4
4. Zona de estudio.....	4
4.1 Localización .....	4
4.2 Geología.....	6
4.3 Hidrogeología.....	8
4.4 Usos del suelo.....	9
4.5 Climatología .....	10
4.6 Problemática ambiental.....	11
5. Marco legislativo .....	13
5.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	14
5.1.1 Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y saneamiento ..	14
5.1.2 Objetivo 13: Acciones urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos.....	15
6. Metodología y discusión .....	16
6.1. Inserción y modificación de series temporales.....	16
6.1.1 Precipitación .....	17
6.1.2 Temperatura .....	18
6.1.3 Evapotranspiración Potencial .....	18
6.2 Definición de sectores.....	23
6.2.2.1. Capacidad de almacenamiento .....	24
6.2.2.2. Umbral de escorrentía y Número de curva .....	24
6.3 Realización de cálculos.....	26
7. Resultados y discusión .....	27
7.1. Recarga calculada.....	31
8. Conclusiones .....	33
9. Bibliografía.....	34
10. Anexos.....	36

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio: Acuífero Aluvial "Jarama-Tajuña".	5
<b>Figura 2.</b> Mapa geológico de la zona de estudio.	6
<b>Figura 3.</b> Usos del suelo.	9
<b>Figura 4.</b> Mapa de vulnerabilidad ( Hoja 45 ( Madrid) mapa hidrogeológico de España 1:200.000). Fuente: IGME.	12
<b>Figura 5.</b> Precipitaciones anuales en las estaciones de la zona de estudio.	17
<b>Figura 6.</b> Curva generalizada del coeficiente del cultivo (FAO, 2006).	20
<b>Figura 7.</b> Sectores identificados en el modelo RENATA: a) Sector climático; b) sector suelo; c) sector riego; d) intersecciones	23
<b>Figura 8.</b> Mapa de pendientes del acuífero aluvial "Jarama-Tajuña"	26
<b>Figura 9.</b> ETP en sectores sin riego	27
<b>Figura 10.</b> ETP en sectores con dotaciones de riego	28
<b>Figura 11.</b> Volumen mensual de variables climáticas. (Datos Anexo II)	29
<b>Figura 12.</b> Volúmenes de INF y LLU calculados a través del modelo RENATA (Datos Anexo II)	30
<b>Figura 13.</b> Volumen por retorno de regadío (Datos Anexo II)	30
<b>Figura 14.</b> Tasa de recarga del acuífero para una CC del 18% (Datos Anexo V)	31
<b>Figura 15.</b> Tasa de recarga del acuífero para una CC del 40% (Datos Anexo IV)	32

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Valores estadísticos de las series diarias de precipitación.	17
<b>Tabla 2.</b> Valores estadísticos de las series diarias de temperatura.	18
<b>Tabla 3.</b> Cultivos según coberturas de suelo con duración etapas de crecimiento y coeficientes de cultivo (FAO, 2006).	21
<b>Tabla 4.</b> Datos para el cálculo Sector suelo.	25

## **Índice de acrónimos**

CC: Capacidad de campo

CHT: Confederación Hidrográfica del Tajo

DMA: Directiva Marco del agua

DPH: Dominio público hidráulico

ETP: Evapotranspiración potencial

ETR: Evapotranspiración potencial

IGME: Instituto Geológico y Minero de España

LLU: Lluvia útil

MAS: Masas de agua subterránea

NC: Número de curva

ODS: Objetivos desarrollo sostenible

ONU: Organización Naciones Unidas

PRS: Parque Regional Sureste

Po: Umbral de escorrentía

RENATA: Recarga Natural de Acuíferos

UE: Unión Europea

ZNS: Zona no saturada



## 1. Resumen

En el presente estudio se ha calculado la tasa de recarga natural del acuífero aluvial “Jarama-Tajuña” ubicado en una cuenca sedimentaria de la Vega del Jarama (Madrid). Se han empleado series diarias de temperatura, precipitación y dotaciones de riego para realizar una simulación de los datos mediante el modelo Recarga Natural de Acuíferos (RENATA). Este programa fue desarrollado en conjunto por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación de Alicante para calcular que cantidad de agua procedente de la precipitación y el riego llegan al acuífero por infiltración.

Los resultados del modelo fueron calculados en base a series climáticas correspondientes al periodo de tiempo entre enero 2010 y diciembre 2017. En el primero de los escenarios, se estableció una capacidad de campo (CC) de 18%, obteniendo un volumen anual de recarga de 15.6 hm<sup>3</sup>/año y un total de 124.8 hm<sup>3</sup>. El segundo, se empleó una CC de 40% obteniendo una recarga media anual de 8.68 hm<sup>3</sup>/año y un total de 69.40 hm<sup>3</sup>. Haciendo patente que se reduce la capacidad de agua disponible en el suelo a mayores valores de CC.

Este trabajo se encuadra con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), concretamente el número 6 que establece que se debe “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento” y el número 13 “acciones urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”.

**Palabras Clave:** Recarga, RENATA, ODS, acuífero, capacidad de campo

## 2. Introducción

El agua es un recurso natural indispensable tanto para la vida como para el desarrollo industrial y agrícola. La hidrosfera presenta únicamente un 2.5% de agua dulce, distribuida en una variedad de entornos, incluidos los casquetes polares, ríos, lagos, biomasa y aguas subterráneas. Sin embargo, el agua de los ríos representa solo el 0.006% frente al 30.1% de las aguas subterráneas (Gleeson et al., 2016). Por ese motivo, el agua subterránea es un recurso natural muy valioso y un elemento clave del ciclo hidrológico. Su contribución al flujo de los ríos asegura su caudal incluso en ausencia de las precipitaciones. La tasa de aportación al caudal es muy variable, dependiendo en gran medida de la geología y el clima, en España se ha estimado en un 30% (Herraiz, 2009).

Debido al crecimiento demográfico, ligado al desarrollo tecnológico, la demanda de agua está aumentando de forma continuada. Por ello, en las últimas décadas ha aumentado la explotación del recurso subterráneo a lo largo del mundo estableciéndose como una de las principales fuentes de agua dulce. Hasta hace unos años el agua subterránea se empleaba mayoritariamente como agua potable, alrededor del 75% de la población de la Unión Europea (UE) depende de ellas para el abastecimiento (Sahuquillo et al., 2009), por otro lado, es un recurso esencial para la industria y la agricultura de regadío. En la agricultura representa el 43% del agua total empleada para el regadío (Tweed et al., 2018).

Es un recurso renovable, no obstante en regiones áridas y semiáridas del Mediterráneo, con lluvias periódicas y períodos prolongados de sequía, la recarga de las masas de agua subterránea (MAS) se ve limitada a la infiltración durante inundaciones periódicas: por escorrentía y por las descargas de ríos y arroyos a los acuíferos (Mostaza et al., 2018).

Acorde a la FAO, a finales del siglo XXI, la agricultura empleaba el 70 % del total de agua utilizada en el mundo y se estima que aumentará un 14 % para 2030. En concreto en Europa, este consumo supone una media de un tercio del suministro de agua (EEA, 2012). Sumado a ello, la producción agrícola crece de año en año, resultando en un aumento en la cantidad de agua empleada para la agricultura.



El consumo elevado de agua en un país de la región mediterránea donde se prevé un aumento significativo de la sequía, agudizado por el cambio climático, ha llevado a España a situarse en el quinto puesto de países europeos con mayor estrés hídrico (Bixio et al., 2006). Según Fernández-Ruíz (2012), en España se estima que se extraen más de 6.000 hm<sup>3</sup> /año de agua de los acuíferos para diversos usos.

La conjunción de estos factores pone en manifiesto la importancia teórica y práctica de la estimación de la tasa de recarga de las MAS, pudiendo establecer unos caudales máximos de explotación sostenible del acuífero. Asociado a este interés, está presente también el incremento de la demanda y una disminución de este recurso, así como una disminución de su calidad.

Para comprender los procesos fisicoquímicos de las MAS es necesario la realización de estudios hidrogeológicos para poder realizar una explotación sostenible de los recursos hídricos. Con una planificación apropiada basada en el valor estratégico de los recursos se evita el agotamiento de las reservas y las consecuencias económicas y ecológicas. Para ello, es imprescindible cuantificar los recursos de entrada al acuífero.

La recarga natural es el volumen de agua que entra en un acuífero durante un periodo de tiempo a causa de la infiltración de agua (Custodio, 1998) aumentando las reservas de agua. La recarga se debe principalmente a la infiltración del agua de lluvia, por aguas superficiales y transferencias entre acuíferos, siendo la recarga por lluvia la principal. Las interacciones entre el clima, la geología, la morfología, las condiciones del suelo y la vegetación determinan los procesos de recarga, estas condiciones son más susceptibles en regiones áridas o semiáridas (Ruiz, 2003). Su estimación es fundamental para el análisis de los sistemas hidrogeológicos, proporciona información esencial para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos como parte de una adecuada planificación hidrológica.

### **3. Objetivos**

El objetivo de este trabajo es evaluar la recarga de agua procedente de la infiltración directa del agua de lluvia y de los retornos de regadío en la masa de agua subterránea (MAS) “Aluviales: Jarama-Tajuña” (Código: 030.007), situado en la cuenca del río Jarama, mediante la aplicación del modelo numérico Recarga Natural de Acuíferos (RENATA) desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Para ello, se llevaron a cabo los siguientes objetivos:

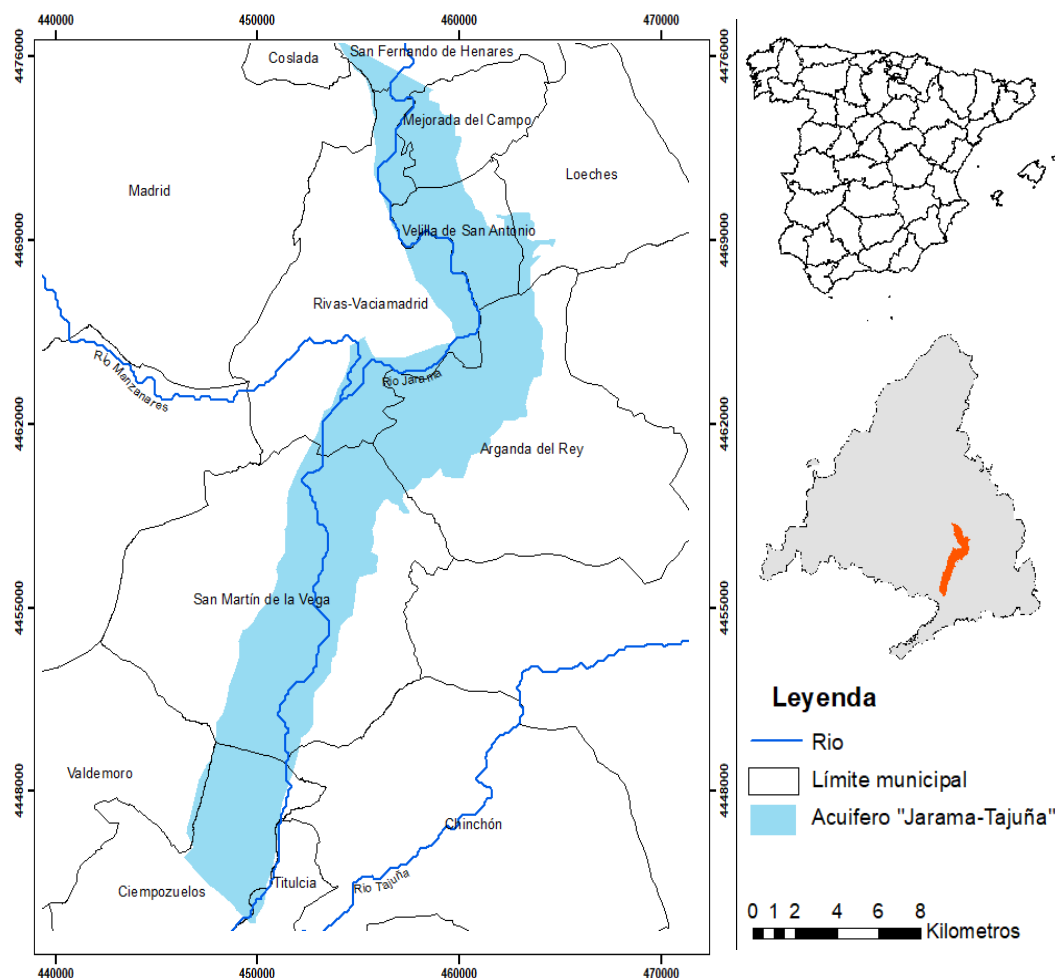
- Recogida y tratamiento de datos de temperatura, pluviométrico y riego del área de estudio.
- Realizar un análisis de diferentes variables obtenidas mediante el modelo: lluvia útil, escorrentía, infiltración y retorno de regadío.
- Estimar el volumen anual de recarga potencial de la MAS.
- Analizar la variabilidad de la recarga con distintos valores de CC.

Estas técnicas son esenciales para el desarrollo de un plan de gestión sostenible del agua, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y en consonancia con los efectos del Cambio Climático.

### **4. Zona de estudio**

#### **4.1 Localización**

La zona de estudio (Figura 1) está situada al sureste de la Comunidad de Madrid, una de las áreas más densamente pobladas de España con más de 6 millones de personas entre la capital y el área metropolitana. En las últimas décadas, Madrid ha experimentado un aumento de las zonas urbanas al norte y al sur de la comunidad. La agricultura se ha desarrollado especialmente en el sureste, en las llanuras aluviales de los principales afluentes del río Jarama, en especial los ríos Henares y Tajuña (Mostaza et al., 2018). Destaca el acuífero aluvial “Aluviales: Jarama-Tajuña” (Código: 030.007), perteneciente a la cuenca hidrográfica del río Tajo y es gestionada por la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT).



**Figura 1.** Localización del área de estudio: Acuífero Aluvial "Jarama-Tajuña".

Cuenta con una superficie aproximada de 207 km<sup>2</sup> (Mostaza et al., 2018) y se extiende desde la confluencia de los ríos Jarama y Henares, cercano al municipio de San Fernando de Henares, hasta cruce del río Jarama por el municipio de Titulcia. Incluye áreas de los municipios de Coslada, Madrid, San Fernando de Henares, Velilla de San Antonio, Mejorada del Campo, Arganda del Rey, Rivas-Vaciamadrid, San Martín de la Vega, Ciempozuelos y Titulcia.

El área de estudio se sitúa en el Parque Regional del Sureste (PRS), declarado en 1994 por la Asamblea de Madrid. Bañado por las aguas de los ríos Manzanares y Jarama, el agua es el elemento común y dominante del parque. En este emplazamiento se localizan diversas lagunas, gran parte de ellas artificiales, formadas a partir de graveras abandonadas. Es en estos ecosistemas acuáticos donde la fauna, y especialmente las aves, hallan lugares adecuados para su reproducción y cría.

## 4.2 Geología

La geología de la zona de estudio (Figura 2) está determinada por un sustrato constituido por materiales terciarios de la cuenca continental del río Tajo, en la zona de transición entre facies detríticas intermedias y facies centrales (carbonatadas y evaporíticas) (Uribebarrea et al., 2003). Las formas y materiales de relieve del periodo Cuaternario se sitúan sobre los materiales de las facies intermedias (margas, calizas, yesos) a ambos lados del valle. Durante el cuaternario se formaron sobre la cuenca terciaria una serie de terrazas aluviales, como consecuencia de las sucesivas crecidas de los ríos Tajo, Jarama, Manzanares, Henares y Tajuña constituyendo la principal unidad geomorfológica de la zona (Silva et al., 1988).

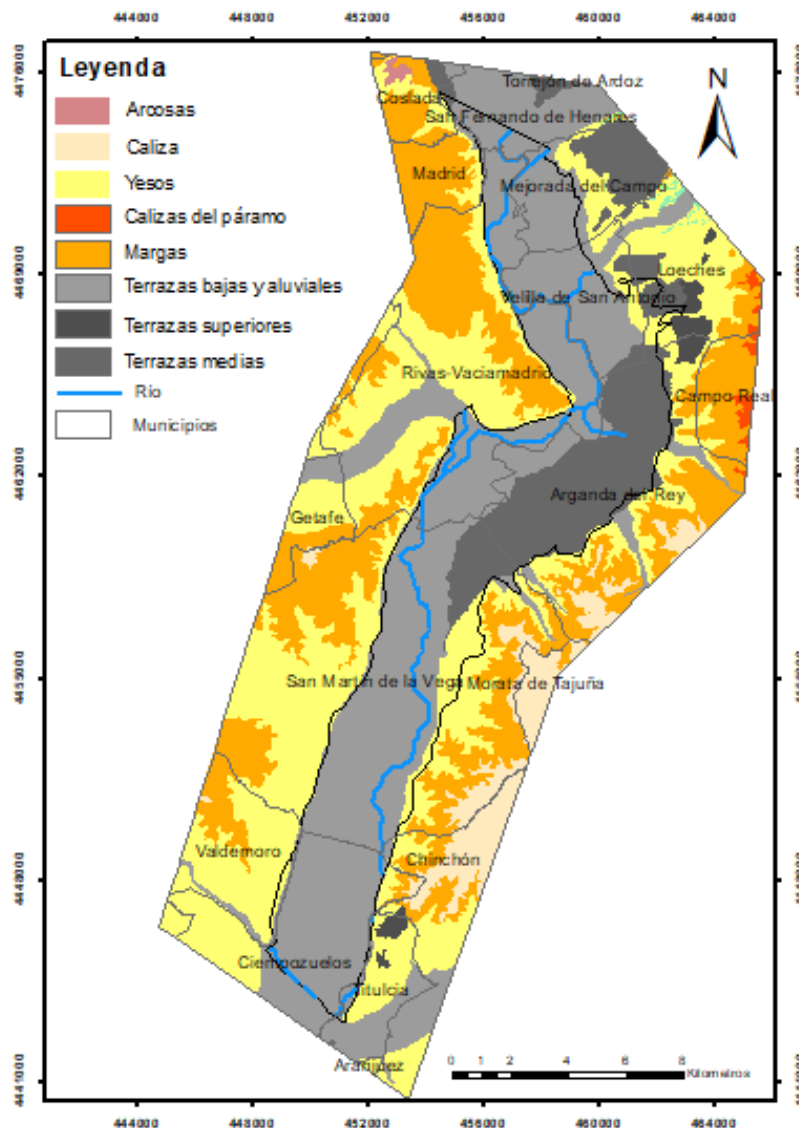


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio.

Estos materiales terciarios aparecen a ambos lados del acuífero en cuatro unidades distintivas. La primera de ellas, facies evaporíticas basales, compuestas por yesos de 100 y 150 metros de espesor, son característicos de los farallones de la depresión del río Jarama. Estos materiales se encuentran en el subsuelo formando la base de los depósitos aluviales del río Jarama (Roblas & García-Avilés, 1997). En segundo lugar, las facies evaporíticas intermedias consisten principalmente en materiales margosos, superpuestos al lecho de yeso y tienen una estratificación horizontal. Sobre estas, se sitúan los conglomerados formados por gravas y arenas, el cual reposa en discordancia erosiva sobre las margas. Esta unidad tiene una representación mínima dentro de la zona de estudio. Finalmente, las calizas de carácter lacustre y con espesores inferiores a los 40m (Montoya, 2011).

Las Vegas y vertientes son las dos unidades geográficas características de la zona. La primera abarca el área del valle y la segunda se ubica en el borde de éste, creando un relieve suave donde los únicos accidentes topográficos se ocasionan por las pendientes que marcan el límite entre las dos unidades. Los materiales cuaternarios por los que discurre el río están compuesto principalmente por sedimentos de origen fluvial (materiales detríticos).

Estos sedimentos se agrupan en tres unidades diferenciadas, denominados bajas, medias y superiores, según su posición física respecto al río. El conjunto bajo incluye sedimentos actuales del río, sedimentos de fondo de valle, llanuras de inundación y terrazas del río Jarama. Es una terraza de poco espesor, pero de gran extensión, empeladas para los cultivos agrícolas. Las terrazas medias se sitúan entre 15 y 30 m por encima del río. Por último, el conjunto superior abarca los niveles de terrazas más elevadas, entre 40 y 120 m, sobre el cauce del río. Son terrazas separadas entre sí por materiales terciarios.

### **4.3 Hidrogeología**

La MAS está formada por materiales del Cuaternario procedente de la dinámica fluvial de los ríos Jarama y Tajuña. La capacidad de los materiales para transmitir y retener el agua depende de su porosidad y permeabilidad, es decir, del tamaño de los poros y grietas y la continuidad entre ellos, en definitiva, de su textura y estructura. Los materiales granulares (gravas y arenas) tienen la capacidad de retención del agua, determinada por el porcentaje de espacios libres para el flujo entre ellos. En formaciones carbonatadas (calizas, dolomías y algunas margas calcáreas) la permeabilidad está relacionada directamente con las fracturas, que se expanden por disolución a lo largo del tiempo. Los materiales arcillosos están formados por partículas muy finas son impermeables.

Por las razones expuestas anteriormente, se trata de un acuífero libre con recarga por infiltración de la lluvia, pero también por el retorno del agua empleada en los sistemas de riego (especialmente en el mes de agosto) y los aportes naturales de la escorrentía superficial de los ríos Jarama y Tajuña (Arauzo et al., 2008). El acuífero se encuentra conectado hidráulicamente con el río Jarama a lo largo de 45 km del curso fluvial (Mostaza et al., 2018) y posee una permeabilidad alta o muy alta (Ministerio de Medio Ambiente, medio rural y marino).

De acuerdo con sus características geomorfológicas, las llanuras aluviales de inundación son empleadas para la agricultura, obteniendo cultivos con una elevada productividad. Por ello, el agua subterránea constituye un importante recurso. El nivel freático se encuentra próximo, presenta una profundidad máxima de 5 m (Carreño et al., 2014; Arauzo et al., 2008). Este hecho, junto a la elevada permeabilidad hace que el acuífero sea vulnerable a la contaminación de origen agrario, en particular a los nitratos presentes en los fertilizantes.

## 4.4 Usos del suelo

La estructura física de esta zona está definida por la topografía y los ríos que lo surcan y modelan, originando zonas de llanuras aluviales de gran interés para la actividad humana. Los cambios demográficos, tecnológicos y socioeconómicos han resultado en diferentes usos del suelo (Figura 3): usos urbanos, agrícolas e industriales, en particular actividades extractivas (áridos, arenas y finos) y la existencia de zonas protegidas como el Parque Regional del Sureste.

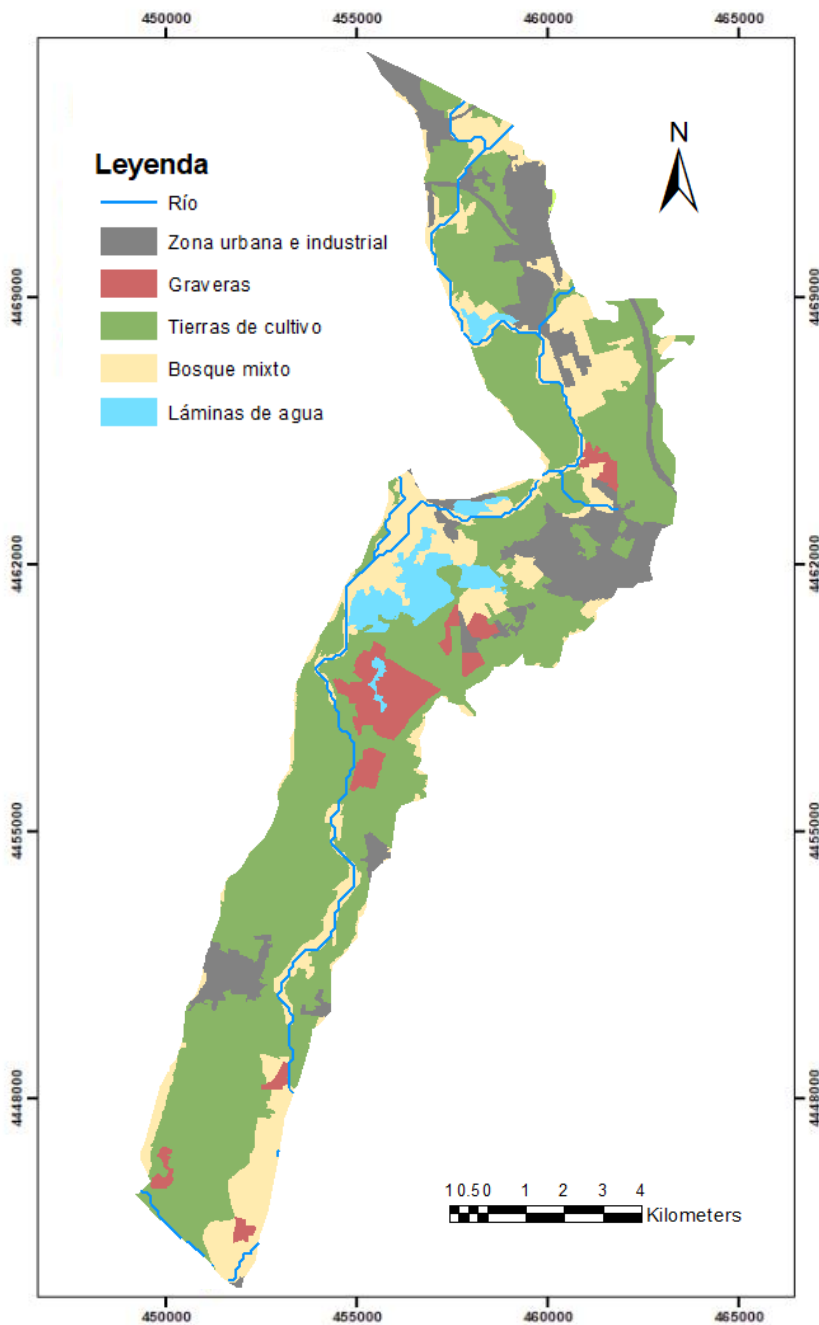


Figura 3. Usos del suelo.

La agricultura es el uso más extendido de las llanuras aluviales, en la MAS existen hasta 316 sondeos destinados al riego que extraen aproximadamente 21.09 hm<sup>3</sup>/año de agua (Mostaza et al., 2018).

No obstante, la MAS presenta un alto riesgo de contaminación a causa de la escasa profundidad del nivel freático y la elevada permeabilidad del suelo. Esto conduce a una mala condición química del agua debido a las áreas de cultivo sobrefertilizadas y la consiguiente infiltración de agua con alto contenido de nitratos en el suelo.

Históricamente la zona ha sustentado una elevada actividad minera (áridos, arenas y finos) para el abastecimiento de materiales de construcción debido a la expansión del área metropolitana de Madrid y su entorno. En la actualidad, esta actividad es uno de los usos más extendidos, aunque genera una degradación el medio natural, concretamente hay áreas en las que esta actividad ha conducido a la eliminación de la ZNS del acuífero, exponiendo el nivel freático (Roblas & García, 1997). Posteriormente, los huecos de graveras que han sido abandonadas se han rellenado de agua y han formado lagunas artificiales.

#### **4.5 Climatología**

La zona de estudio se encuentra dentro de la región climática definida como Mediterráneo Templado. Las variables climáticas clave son: la precipitación media anual comprendida entre 440 y 490 mm y una evapotranspiración media anual que oscila entre 700 y 776 mm, especialmente durante los meses de verano. La temperatura media anual se sitúa en torno a los 13-14 °C, pero esta zona se caracteriza por unas marcadas variabilidades estacionales, en verano de 22 a 25 °C y en invierno de unos 6 °C.

En este tipo de regiones las aguas subterráneas constituyen un recurso vital, por lo que adquiere el valor de recurso estratégico. Por otra parte, esta región es un ejemplo de alta vulnerabilidad al cambio climático mostrando cambios significativos en la reducción de las precipitaciones debido al aumento de las temperaturas medias.



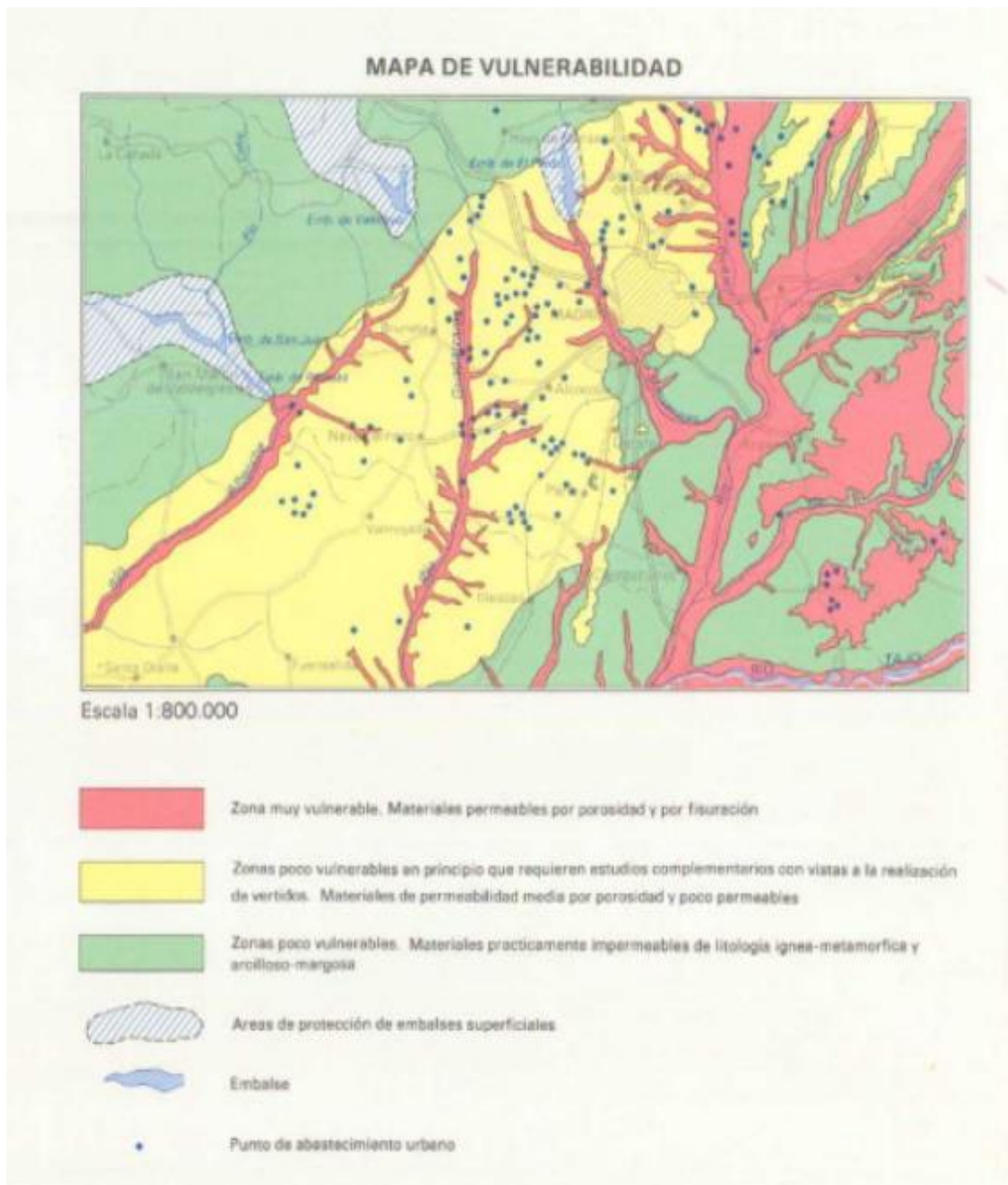
## 4. 6 Problemática ambiental

Los recursos hídricos son un elemento importante en el medio ambiente, la descarga de los acuíferos abastece los ríos, lagunas y zonas húmedas, todas ellas áreas con ecosistemas importantes que necesitan protección y conservación. No obstante, se trata de un recurso frágil tanto cualitativa como cuantitativamente. La explotación de los acuíferos por encima de su capacidad conduce a un desarrollo insostenible.

La Directiva 91/676/CEE regula la protección de las aguas frente a la contaminación por nitratos de origen agrícola. En esta Directiva, se define por Zona Vulnerable un área en la que la escorrentía o filtración afecte o pueda afectar a la contaminación del agua por los nitratos derivados de los fertilizantes, en la que la contaminación del agua incluya aguas con un contenido de nitratos superior a 50 mg/l (Arauzo et al., 2008).

El Mapa Hidrogeológico de España (Figura 4) establece que el acuífero aluvial presenta una mayor vulnerabilidad, debido a la alta permeabilidad y el nivel freático a menos de 5 m de profundidad. El impacto de la contaminación puede llegar a ser muy alta y de difícil solución. La contaminación puede ser difusa o puntual, la primera se origina a causa de la actividad agrícola, la economía de la vega está basada en ella, el uso de fertilizantes presentes en la en el agua de riego, ha llevado a la contaminación de la MAS por nitrógeno (CHT, 2018) y los segundos por los vertidos de origen industrial y urbano.

Otra actividad que genera impactos es la extracción de áridos, produce el afloramiento del nivel freático debido a la extracción por debajo de este, traduciéndose en un descenso de los caudales extraíbles de los pozos de explotación. El afloramiento del nivel freático incrementa el riesgo de contaminación de las MAS debido al vertido de residuos. Las extracciones realizadas por encima del nivel freático aproximan la zona no saturada al acuífero, generando una disminución del material que sirve como protección para las aguas subterráneas frente a la contaminación superficial.



**Figura 4.** Mapa de vulnerabilidad ( Hoja 45 ( Madrid) mapa hidrogeológico de España 1:200.000). Fuente: IGME.

Por estas razones, el acuífero es de poco interés para el abastecimiento, exceptuando situaciones de emergencia, se emplea mayoritariamente para el riego y usos industriales (Mostaza et al., 2016).

## 5. Marco legislativo

En la Unión Europea (UE) las aguas están sometidas a una presión cada vez mayor, traduciéndose en un aumento constante de su demanda, por consiguiente, surge la necesidad de tomar medidas para proteger las aguas tanto cuantitativa como cualitativamente y así asegurar su sostenibilidad.

A finales de 1970 comenzó en la UE un marco regulador para las aguas subterráneas con la adopción de la Directiva 80/68/CE, relativa a la protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación causada por ciertas sustancias peligrosas. Posteriormente, la Comisión Europea presentó un marco para una política europea en materia de aguas, dando paso a la adopción de la Directiva 2000/60/CE, también conocida como Directiva Marco del Agua (DMA) adoptada en octubre de 2000.

La DMA permite el establecimiento de unos objetivos ambientales uniformes entre todos los estados miembros para las masas de aguas (aguas superficiales, aguas de transición, aguas costeras y aguas subterráneas). Según artículo 2 del anexo II, los estados miembros realizarán una caracterización de las masas de agua subterránea. Para poder realizar dicha caracterización deberá de haber “datos suficientes para calcular la tasa media anual de recarga global a largo plazo”.

En España, las aguas subterráneas se incluyeron en el dominio público hidráulico (DPH) a través de la Ley de Aguas de 1985 estableciendo un uso racional y eficiente de las mismas, reforzando así su relevancia dentro de la política de recursos hídricos españoles.

La DMA fue incorporada al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 907/2007, por el que se aprueba el Reglamento de Planificación Hidrográfica, teniendo como objetivos generales conseguir el buen estado y la apropiada protección del dominio público hidráulico y de las aguas. También establece el contenido obligatorio de los planes hidrológicos de cuenca, “entre los que se incluirán mapas con los límites y localización de las masas de agua superficial y de las masas de agua subterránea, así como un inventario de los recursos superficiales y subterráneos, con sus regímenes hidrológicos y las

características básicas de calidad de las aguas, además de redes de control establecidas para el seguimiento del estado de las aguas superficiales, de las aguas subterráneas y de las zonas protegidas y los resultados de este control”.

Por otro lado, el Real Decreto 1514/2009 regula la protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación y degradación, disponiendo que “las aguas subterráneas constituyen un recurso natural dotado de un significado valor estratégico, cuya protección reviste especial interés para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos de ellas dependientes y para el abastecimiento de agua potable” y que “es por ello que las masas de agua subterránea utilizadas para la extracción de agua potable, o que se pretendan utilizar con esa finalidad en el futuro”.

## **5.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible**

En 2015, las Naciones Unidas (ONU) aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Fue firmado por 193 países, entre ellos España, como una acción global, comprometiéndose con los 17 objetivos ODS promoviendo la transformación del paradigma del desarrollo basado en la explotación de recursos naturales como si fueran ilimitados. Estos objetivos están interrelacionados y buscan principalmente lograr objetivos específicos, como la sostenibilidad social, económica y ambiental. Se han identificado dos objetivos de desarrollo sostenible relacionados con el presente estudio: el objetivo 6 y el 13.

### **5.1.1 Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y saneamiento**

Los recursos y acceso al agua afectan a más del 40% de la población mundial, se espera que esta alarmante cifra aumente a medida que se intensifiquen los efectos del cambio climático. El sistema de saneamiento ha mejorado, no obstante, el estrés hídrico, el aumento de la desertificación y las sequías han acentuado la disminución del suministro de agua.

Para mitigar los efectos del cambio climático y garantizar el acceso a agua potable es necesario proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el

agua. Según la ONU alrededor del 70% de toda el agua extraída de los ríos, lagos y acuíferos es empleada para el riego.

El acceso a agua, saneamiento e higiene es un derecho humano, a pesar de ello, millones de personas en todo el mundo carecen de este recurso, en especial en los países en vías de desarrollo. La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial y se espera que aumente. En la actualidad, más de 1700 millones de personas viven en las cuencas de los ríos donde el uso del agua supera la recarga (Martin & Blazhevskaja, 2015).

### **5.1.2 Objetivo 13: Acciones urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos**

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero han aumentado casi un 50% desde 1990, provocando cambios duraderos en el sistema climático. La pérdida económica anual promedio de los desastres relacionados con el clima es de cientos de miles de millones de dólares. Por otro lado, entre 1880 y 2012, la temperatura mundial promedio aumentó en 0.85°C, ocasionando la disminución de producción de cereales de aproximadamente el 5%. La producción mundial de maíz, trigo y otros cultivos importantes se ha desplomado debido al clima más cálido.

Singularmente, las emisiones aumentaron más rápido entre 2000 y 2010 que en cualquier período de las últimas tres décadas.

Con las concentraciones y emisiones actuales de gases de efecto invernadero, las temperaturas globales podrían aumentar en más de 1.5 °C para finales de este siglo en comparación con 1850-1900.

En el contexto climático actual, las sequías son cada vez más recurrentes, las precipitaciones son irregulares y los recursos hídricos son cada vez más escasos. Debido a los efectos derivados del cambio climático, el panorama a medio-largo plazo en el arco del mediterráneo, es desfavorable. En este contexto las reservas estratégicas de agua son especialmente importantes en escenarios de sequía (Sauto, 2020).

## **6. Metodología y discusión**

El modelo numérico RENATA es una herramienta informática desarrollada por la Diputación de Alicante y el IGME, está diseñada para el cálculo de la recarga de acuíferos a partir de procesos del suelo (IGME). El objeto de estudio es el acuífero detrítico “Aluviales Jarama-Tajuña” (Código 031.007), situado al Sureste de la Comunidad de Madrid. La recarga principal del sistema proviene de la infiltración directa de las aguas pluviales y, en menor medida, del retorno del riego agrario y de la infiltración de escorrentía de los cauces superficiales.

Antes de iniciar RENATA (DPA-IGME, 2012) es necesario determinar la delimitación geométrica del acuífero, del mismo modo se categorizan los diversos usos del suelo (Figura 3). Durante este proceso, se determina el tamaño de la malla, empleando coordenadas UTM, en este caso se ha empleado 100 filas y 100 columnas. En el área sujeta a estudio se definen parámetros relacionados con la hidrometeorología, los suelos y los cultivos empleados en la zona de estudio. El intervalo temporal para el que se efectuó la estimación de recarga es el comprendido entre el 1 de enero de 2010 y el 12 de diciembre de 2017. Las tres etapas a seguir para la obtención de los resultados mediante RENATA son:

1. Inserción y modificación de series temporales
2. Definición de sectores
3. Realización de cálculos

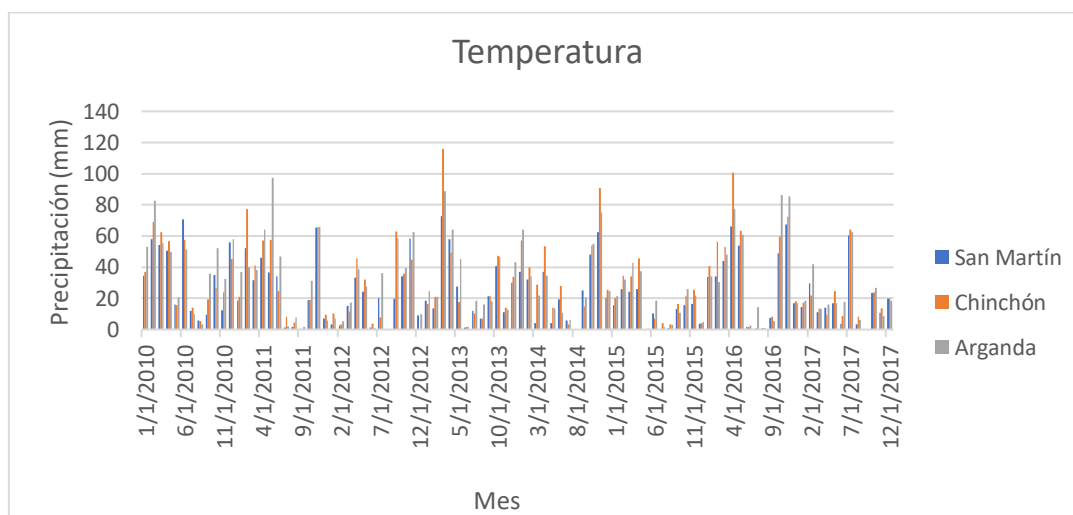
### **6.1. Inserción y modificación de series temporales**

Como se mencionó anteriormente, la recarga por lluvia es el sistema más común de entrada de agua al acuífero. De esta agua, hay que descontar la parte que es empleada por la vegetación y la parte retenida por la superficie del suelo, dejando solo la precipitación útil, dividida entre la escorrentía superficial y la infiltración (Alcalá, 2005).

El desarrollo metodológico involucrado en este estudio ha requerido la definición de series de datos meteorológicos a escala diaria. Las estaciones meteorológicas seleccionadas se encuentran dentro de la zona de estudio o en el área de influencia del acuífero.

## 6.1.1 Precipitación

Las series pluviométricas se han obtenido de las estaciones climáticas del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), obteniendo valores medios diarios de precipitación para tres estaciones: San Martín de la Vega, Chinchón y Arganda (Figura 5).



**Figura 5.** Precipitaciones anuales en las estaciones de la zona de estudio.

Como se puede observar en la figura 5, los valores máximos de precipitaciones en las tres estaciones se dan en los años 2010, 2014 y 2016 con precipitaciones acumuladas de 433 mm, 409 mm y 475 mm respectivamente, los mínimos se dan en el 2012, 2015 y 2017 con valores de 258 mm, 216 mm y 225mm. Las precipitaciones anuales se muestran en la Tabla 1, siendo las estaciones de Chinchón y Arganda aquellas que registran las precipitaciones anuales más altas. En cuanto a la distribución temporal, hay una clara diferencia, se producen mayores precipitaciones en los meses de invierno que en los meses de verano, cuando la precipitación llega a ser nula.

**Tabla 1.** Valores estadísticos de las series diarias de precipitación.

Estación	Máximo diario	Mínimo diario
San Martín de la Vega	32.7	0
Chinchón	53.6	0
Arganda	47.8	0

## 6.1.2 Temperatura

Los datos referidos a esta variable tanto la temperatura mínima, medias y máximas se han obtenido de la base de datos del SIAR, medidas en las mismas estaciones meteorológicas que los datos de precipitación. Los valores estadísticos referidos a la temperatura media anual se recogen en la Tabla 2. Hay una gran variabilidad con temperaturas máximas de 43°C y mínimas de -10.5°C.

**Tabla 2.** Valores estadísticos de las series diarias de temperatura.

Estación	Media diaria	Máximo diario	Mínimo diario
San Martín de la Vega	14.1	41.2	-12.4
Chinchón	14.3	43.0	-12.3
Arganda	15.0	42.2	-10.5

## 6.1.3 Evapotranspiración Potencial

Se define la evapotranspiración potencial (ETP) como la cantidad de agua que puede volver a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas cuando la capacidad hídrica de suelo está completa y el desarrollo vegetal es óptimo (IGME, 2012; Alegría Calvo, 2013). El programa dispone de cuatro métodos para estimar esta variable: Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle para la evaporación de referencia y Blaney-Criddle, para la evaporación de cultivo. No obstante, en este estudio la obtención de la ETP ha conjugado dos métodos, haciendo una diferenciación entre los sectores sin riego y por otro lado aquellos sectores con cultivos de regadío.

### 6.1.3.1 Evapotranspiración en sectores sin riego

Para las zonas que no presentan riego se ha aplicado el método de Hargreaves que considera las series de temperatura mínima y máxima, a diferencia del método Thornwaite que únicamente considera una serie de temperatura.



El método Hargreaves desarrollado por Hargreaves y Samani (1985) calcula la ETP a partir de series de temperatura empleando la siguiente ecuación:

$$ETP_i = 0,0135(t_i + 17,78)R_s \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde,

**ETP<sub>i</sub>**: Evapotranspiración potencial diaria (mm).

**t<sub>i</sub>**: Temperatura media diaria (°C).

**R<sub>s</sub>**: Radiación solar incidente diaria (mm/d).

La radiación solar incidente se obtiene mediante la expresión de Samani:

$$R_s = R_o K T (t_i^{max} - t_i^{min})^{0.5} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde,

**R<sub>o</sub>**: Radiación solar extraterrestre diaria. Es la que se recibe sobre una superficie localizada en el límite atmosférico superior (MJulios/m<sup>2</sup>/día)

**KT**: Coeficiente empírico que depende de la presión atmosférica. Se emplea un KT=0,162 para zonas del interior y un KT=0,19 para zonas costeras

**t<sub>i</sub><sup>max</sup>**: Temperatura diaria máxima (°C)

**t<sub>i</sub><sup>min</sup>**: Temperatura diaria mínima (°C)

Para el cálculo de radiación solar extraterrestre se calcula por la siguiente fórmula:

$$R_o = 37,59 d_{t-s} (0,01745 w \text{ sen}(\varnothing) \text{ sen}(d) + \cos(\varnothing) \cos(d) \text{ sen}(w)) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde,

**D<sub>t-s</sub>**: distancia relativa entre el Sol y la Tierra, siendo:

$$d_{t-s} = 1 + 0,033 \cos(2\pi n / 365) \quad (\text{Ec.4})$$

**n**: Días del año, empezando desde el 1 de enero

**w**: Ángulo horario

**d**: Declinación solar (°)

**Ø**: Latitud (°)

### 6.1.3.2 Evapotranspiración en sectores con riego

Los métodos de cálculo de ETP que se han descrito anteriormente tienen en cuenta únicamente las condiciones climáticas. Sin embargo, el programa permite calcular la ETP de la cosecha según el método Blaney-Criddle, introduciendo un coeficiente característico propio del cultivo, aplicando la siguiente expresión:

$$ETC_i = ETP_i K C_j \quad (\text{Ec.5})$$

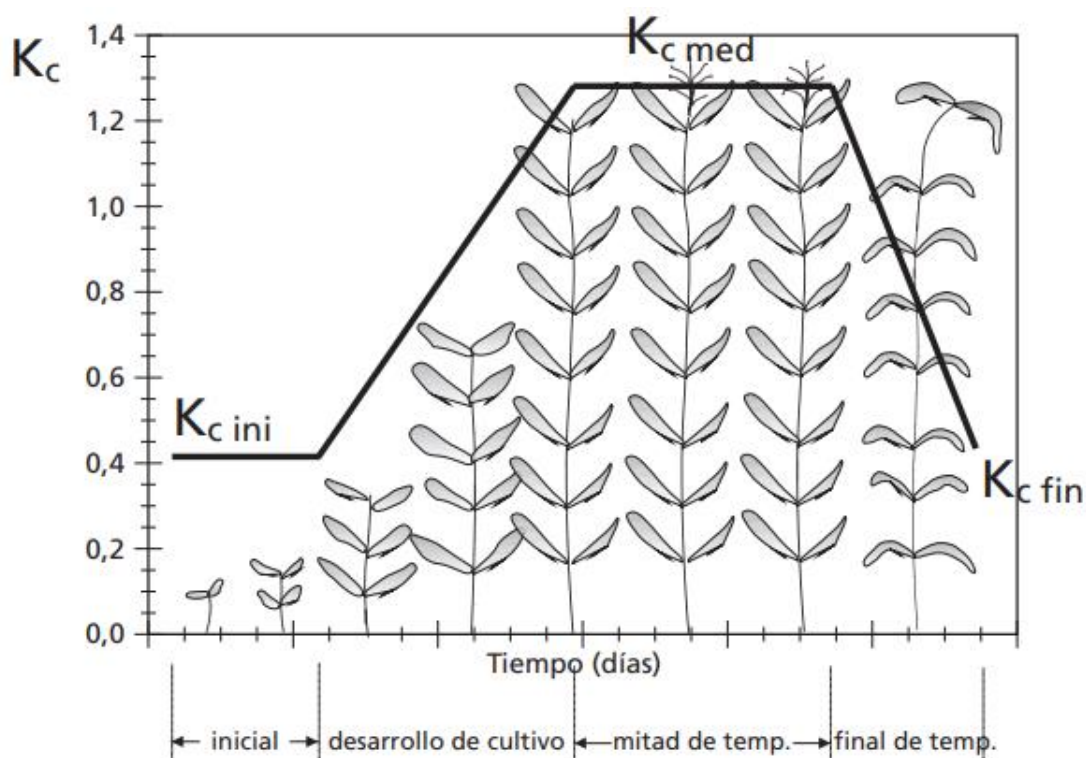
Donde,

**ETC<sub>i</sub>**: evapotranspiración del cultivo (mm)

**ETP<sub>i</sub>**: evapotranspiración potencial según el clima (mm)

**KC<sub>j</sub>**: coeficiente de cultivo. Para cada cultivo se consideran tres coeficientes: durante el periodo de crecimiento inicial (j=ini), durante el periodo de crecimiento medio (j=med) y durante periodo de crecimiento final (j=fin).

Hay tres factores de cultivo que caracterizan las cuatro etapas del desarrollo de la planta: inicial, de desarrollo, de mitad de temporada y de final de temporada (Figura 6).



**Figura 6.** Curva generalizada del coeficiente del cultivo (FAO, 2006).

Para calcular la ETP de cada periodo, es necesario establecer la duración de cada una de las etapas durante el año, y el día y mes de inicio del periodo vegetativo. La tabla 3 muestra los tres tipos de cultivos evaluados y los parámetros facilitados por el programa, duración de los periodos vegetativos de algunas plantas y valores de KC.

**Tabla 3.** Cultivos según coberturas de suelo con duración etapas de crecimiento y coeficientes de cultivo (FAO, 2006).

Cultivo	Inicial	Desarrollo cultivo	Mitad de tiempo	Final de temporada	Total	Fecha siembra	Región
Maíz	30	40	50	30	150	Abril	España
		<b>Kc inicial</b>	<b>Kc med</b>	<b>Kc final</b>		<b>Altura máx</b>	
		1.20	0.50	2		2m	
Olivos	20	90	60	90	270	Marzo	Mediterráneo
		<b>Kc inicial</b>	<b>Kc med</b>	<b>Kc final</b>		<b>Altura máx</b>	
		0.65	0.70	0.70		3-5m	
Lechuga	20	30	15	10	75	Abril	Mediterráneo
		<b>Kc inicial</b>	<b>Kc med</b>	<b>Kc final</b>		<b>Altura máx</b>	
		-	1	0.95		0.3	

### 6.1.3.3. Lluvia útil y evapotranspiración real

La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que verdaderamente vuelve a la atmósfera. Su valor depende de su disponibilidad, ya sea en forma de lluvia o como agua almacenada en el suelo. El límite superior de ETR está determinado por la ETP. Por otro lado, la lluvia útil (LLU), denominada también como lluvia eficaz o excedente, corresponde a la suma de agua que escurre superficialmente y la que se infiltra. Para determinar la ETR y LLU se aplica la siguiente expresión:

$$P_i = ETR_i + LLU_i + \Delta R \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

**P<sub>i</sub>**: precipitación (mm)

**ΔR**: incremento de la reserva de agua en el suelo utilizable por las plantas (mm)

**ETR**: evapotranspiración real

**LLU**: lluvia útil

Se realiza el balance con las siguientes premisas:

- La ETR<sub>i</sub> es igual o menor a la ETP<sub>i</sub>
- El suelo no puede almacenar más de una cierta cantidad de agua que se denomina capacidad de campo (CC) la cual es función del tipo y espesor del suelo mismo.
- Siempre que se disponga de agua, precipitación más la almacenada en el suelo, es prioritario primero cubrir las necesidades de ETR<sub>i</sub> hasta su límite (ETP<sub>i</sub>) y posteriormente aumentar el almacenamiento de agua en el suelo hasta su límite (CC).
- El exceso de agua tras cubrir las demandas de ETP<sub>i</sub> y CC, integra la LLU<sub>i</sub>.

Además, la aplicación incluye una variación del método de balance de Thronthwaite desarrollado por Girard. Esta variante consiste en que se considera que el excedente de agua de lluvia se almacena en el suelo de dos formas:

- Si el agua acumulada en el periodo anterior (R<sub>i-1</sub>), es menor que el valor R<sub>MIN</sub> el exceso de precipitación (EX<sub>i</sub> = P<sub>i</sub> - ETR<sub>i</sub>) se acumula en su totalidad.
- Si R<sub>i-1</sub> se encuentra entre R<sub>MIN</sub> y R<sub>MAX</sub>, ( R<sub>MAX</sub> equivale a la CC), EX<sub>i</sub> se divide entre una fracción empleada a aumentar la reserva del suelo y otra a LLU, se realiza según la siguiente expresión:

$$LLU_i = \max(R_{i-1} + P_i - R_{MAX}, 0) + \Delta R \frac{(2RBA_i + \Delta R_i)}{2(R_{MAX} - R_{MIN})} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

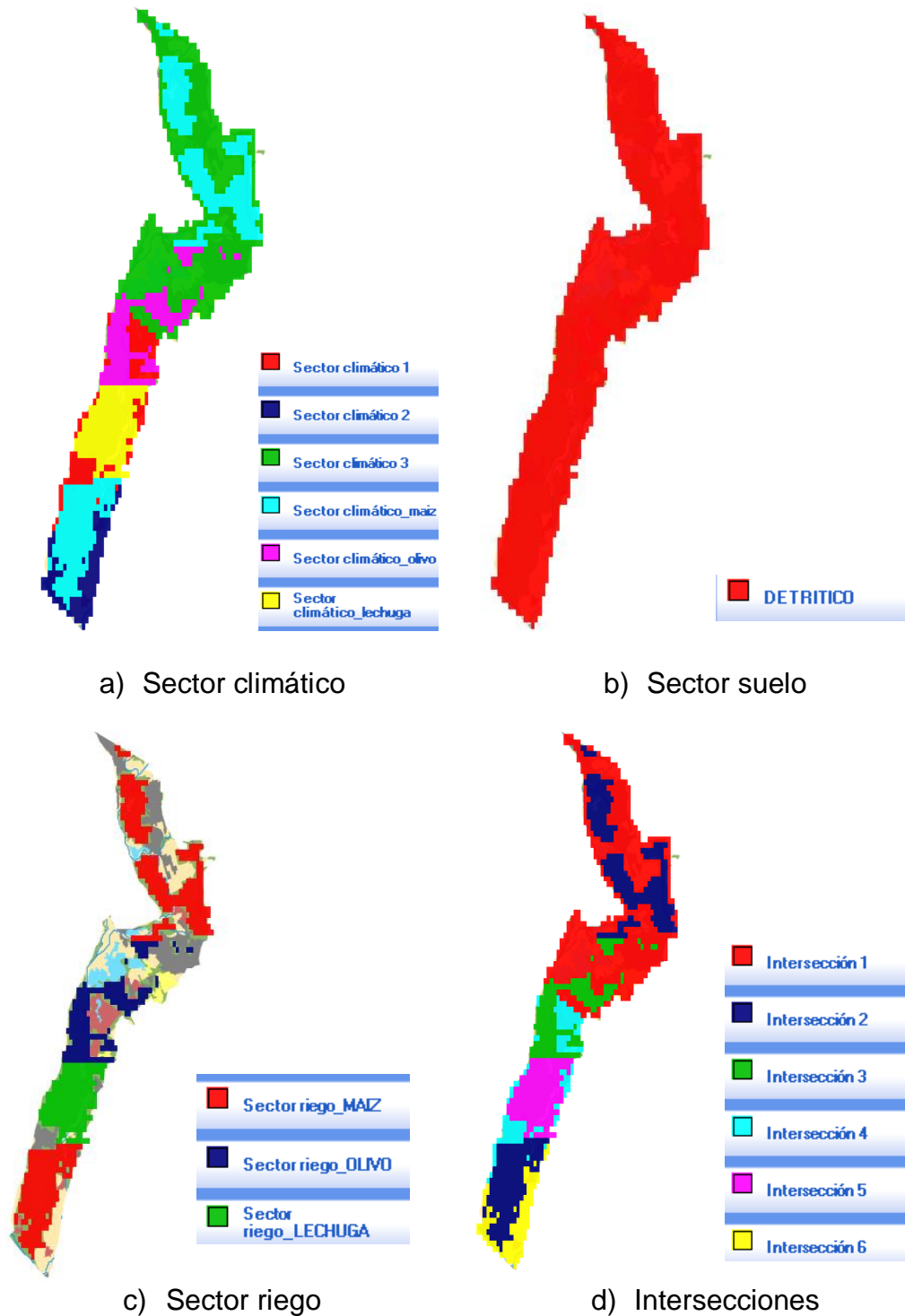
$$RBA_i = \max(R_{MIN}, R_{i-1}) - R_{MIN} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$RHA_i = \min((R_{i-1}, P_i), R_{MAX}) - R_{MIN} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\Delta R = \max(0, (RHA_i - RBA_i)) \quad (\text{Ec. 10})$$

## 6.2 Definición de sectores

Los valores obtenidos en el modelo de recarga dependen de la serie de datos utilizada. Los sectores necesarios para ejecutar el programa se describen a continuación.



**Figura 7.** Sectores identificados en el modelo RENATA: a) Sector climático; b) sector suelo; c) sector riego; d) intersecciones

### **6.2.1. Sector climático**

Una vez insertados los datos climáticos descritos anteriormente, se identifican los sectores climáticos (Figura 7a). Una vez ubicados en el modelo los puntos de las estaciones meteorológicas se proceden al cálculo de los Polígonos Thiessen, delimitando el área de influencia de cada una de las estaciones. La primera definición de sectores hay que modificarla para eliminar aquellas superficies fuera del acuífero en las que no se va a producir la recarga. Posteriormente, es necesario aplicar la delimitación espacial de los polígonos de Thiessen de las estaciones seleccionadas y de las áreas de cultivo de irrigadas, a cada sector se le asigna la serie de precipitación y de ETP o ETc más cercana a ella.

### **6.2.2. Sector suelo**

En el sector suelo (Figura 7b) se establecen parámetros de retención de agua del suelo, en áreas con litologías similares. Se definen por sus límites, y aplicando parámetros para estimar la infiltración directa de agua de lluvia. Para ello, se deben establecer los límites inferior y superior de la Capacidad de Almacenamiento, Umbral de Escorrentía ( $P_o$ ) y número de curva según uso del suelo (NC).

#### **6.2.2.1. Capacidad de almacenamiento**

La capacidad de almacenamiento o la capacidad de campo es el contenido de agua que retiene un suelo después de ser saturado con agua, se valora por el porcentaje de agua en suelo seco. Es un parámetro que establece la máxima cantidad de agua que puede retener el suelo saturado después de 48 horas de drenaje.

#### **6.2.2.2. Umbral de escorrentía y Número de curva**

Otra de las variables a cuantificar es la escorrentía superficial que se define como la cantidad de precipitación a partir de la cual el suelo no puede absorber más agua y discurre por la superficie, depende de la humedad inicial del suelo, el uso del suelo, el tipo de suelo y la pendiente (Andreo et al., 2007).

El valor de  $P_o$  se relaciona con el número de curva (NC), mediante la siguiente expresión:

$$P_o = \frac{5080}{NC} - 50.80 \quad (\text{Ec. 6})$$

El valor NC varía entre 0 a 100, el valor 0 corresponde a un suelo con una conductividad hidráulica infinita para un terreno completamente impermeable, es decir, valores altos de NC corresponden con un mayor porcentaje de escorrentía superficial tras un episodio de lluvia (Andreo et al., 2007).

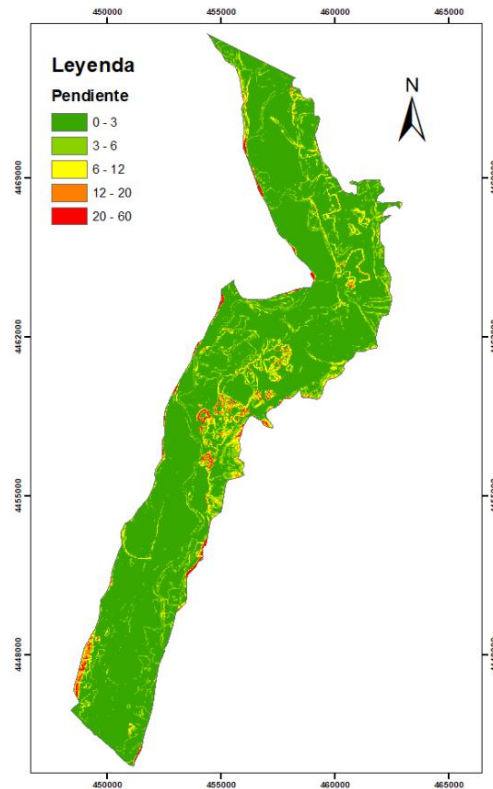
Los coeficientes están tabulados, a partir de los cuales se establece el valor de Po, son los siguientes:

- a) Tipo de suelo: según su permeabilidad se dividen los suelos en cuatro grupos de mayor a menor capacidad de infiltración (A, B, C y D).
- b) La cubierta vegetal: se define por el tipo de vegetación o cultivo, o si se trata de un terreno en barbecho o urbanizado.
- c) Condiciones hidrológicas: principalmente la pendiente que incide en el proceso de infiltración.

Para establecer los valores de Po y NC primero hay que establecer la pendiente de la zona de estudio. Para ello se ha elaborado un mapa de pendientes mediante las capas MDT del IGME (Figura 8), observando que el rango de inclinación en la zona es inferior al 3%. Posteriormente, atendiendo a los coeficientes tabulados del Anexo 1 y aplicando la pendiente calculada se establecen los valores de Po y NC.

**Tabla 4.** Datos para el cálculo Sector suelo

Sector suelo	Detrítico
Tipo de suelo	Permeable
Pendiente	<3%
Límite superior de la capacidad de campo	40
Límite inferior de la capacidad de campo	18
Umbral de escorrentía (Po)	10
Número de curva (NC)	91



**Figura 8.** Mapa de pendientes del acuífero aluvial "Jarama-Tajuña"

### 6.2.3. Sector riego

El aporte de agua proveniente del regadío es una forma de recarga artificial provocada por los cultivos de la zona de estudio (Figura 7c). Para establecer los distintos sectores de riego, se han seleccionado los tres tipos de cultivos de la zona de estudio: maíz, lechuga y olivos. Una vez establecidos los sectores, teniendo en cuenta el estudio realizado por Villarroya (2008), se ha considerado un retorno de riego del 20%.

### 6.3 Realización de cálculos

Finalmente se ha realizado la intersección de los sectores clima, suelo y riego, para obtener la recarga de cada intersección. Estos cálculos proporcionan los valores de evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, lluvia útil, infiltración y escorrentía. Los resultados obtenidos se presentan como una serie temporal relativa a las intersecciones resultantes.

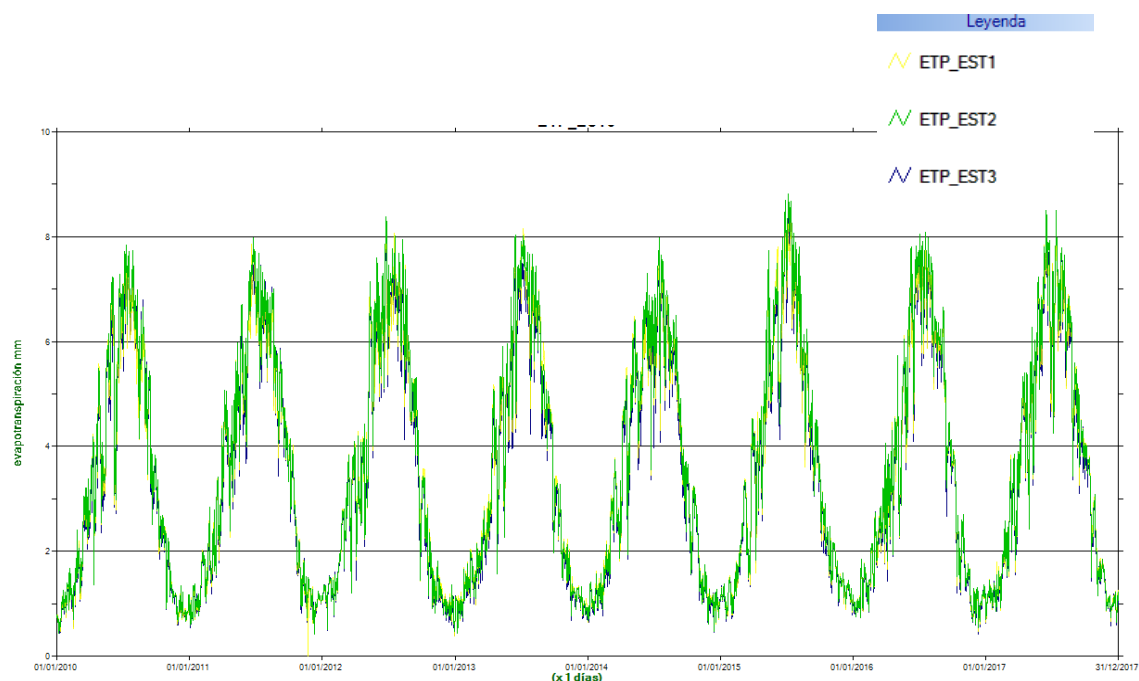
Después de realizar los cálculos, los resultados obtenidos se muestran en valores mensuales o anuales. Alternativamente, el programa permite mostrarlos grafica o numéricamente.



## 7. Resultados y discusión

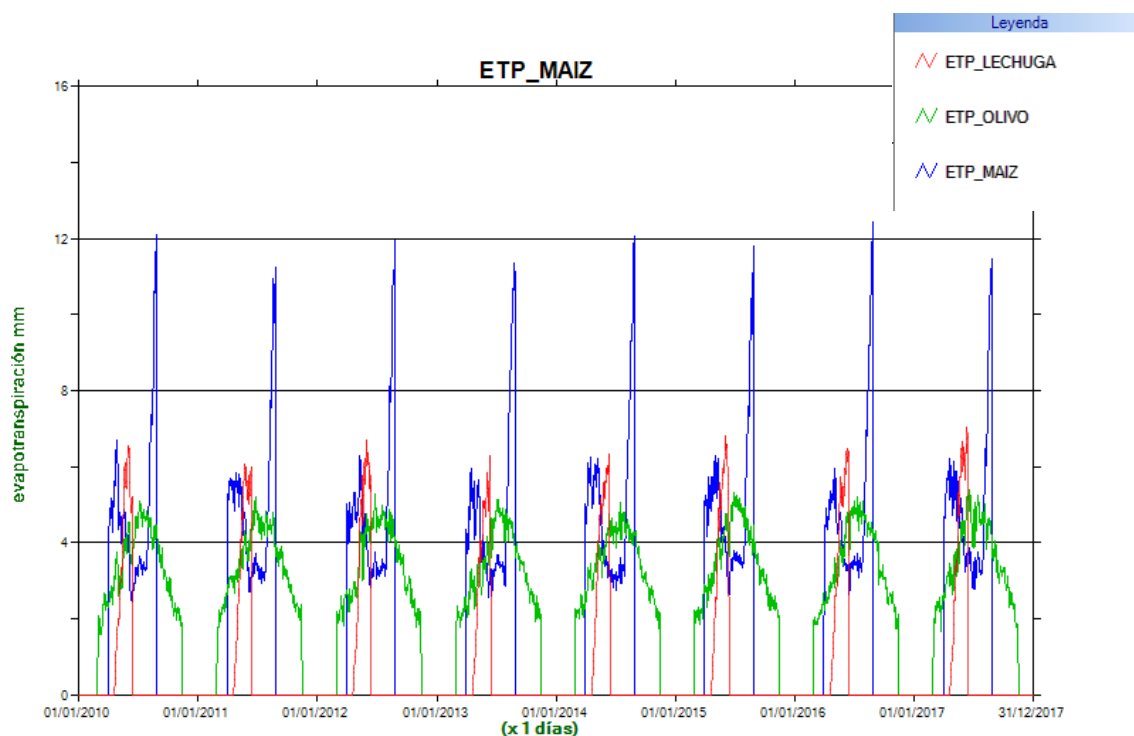
El presente apartado tiene como finalidad realizar el análisis de los datos obtenidos en la realización del modelo. Como ya se ha comentado anteriormente, la precipitación en la zona de estudio presenta una variación significativa a lo largo del año, con precipitaciones elevadas en los meses de otoño e invierno. La mayor precipitación anual se presentó en 2010 y 2016 respectivamente, y los mínimos en 2012, 2015 y 2017. Asimismo, se observan los valores de temperatura más elevados en verano, registrándose la más alta en Chinchón en agosto de 2012 con 43°C y la más baja con -12,4°C en febrero de 2012.

Las series de ETP se obtuvieron empelando el método Hargreaves para los sectores climáticos no agrícolas (Figura 9) y el método de Braney-Criddle para los sectores con cultivos (Figura 10). Los valores obtenidos son cíclicos, para los sectores sin cultivos se muestran picos altos entre 2015-2017. Esto se debe a las condiciones meteorológicas, estos años corresponden a períodos cálidos, registrándose mayores temperaturas. Por otro lado, el valor mínimo obtenido es de 0.38mm mientras que el máximo es de 8.82mm, la media de las tres estaciones es de 3.55mm y una media anual de 1297.62mm.



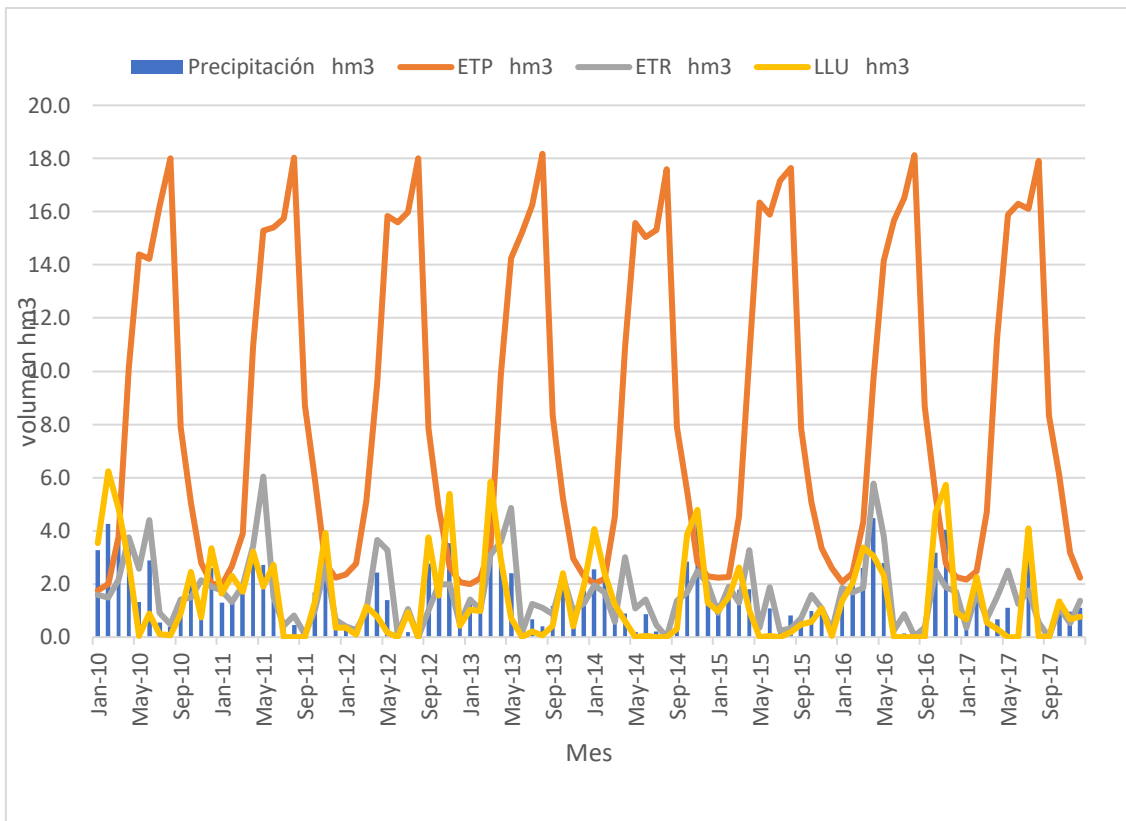
**Figura 9.** ETP en sectores sin riego

En cambio, para los sectores con riego se muestra una ETP diferenciada entre los tipos de cultivo. La ETP para el maíz presenta los valores más elevados con un máximo de 12.42 mm y una media anual de 735.67mm. En el caso de la lechuga, los intervalos son más efímeros, con un máximo de 7.01 mm y una media anual de 894.44mm. Por último, el olivo presenta un ETP más repartido en el tiempo, con un máximo de 5.39mm y una media anual de 221.11mm.



**Figura 10.** ETP en sectores con dotaciones de riego

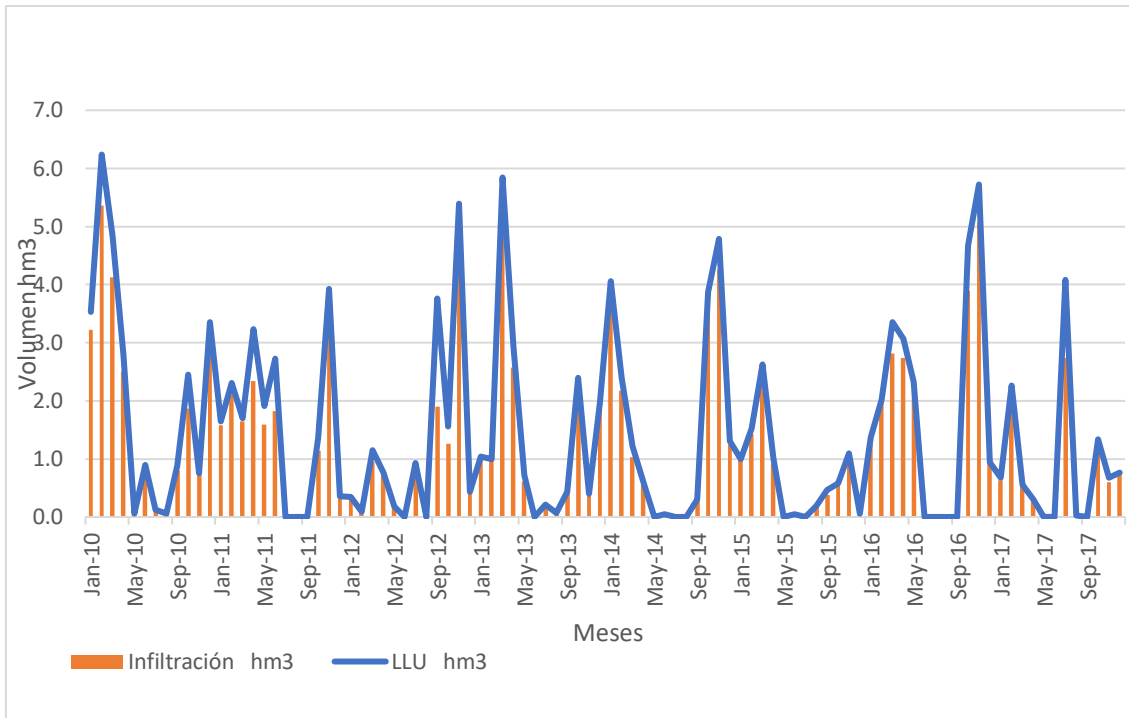
Una vez se dispone de los datos de precipitación y de ETP para los sectores con riego y sin riego se calculan los parámetros de LLU y la ETR. La figura 11 muestra la comparación entre estas variables, cabe señalar que la ETP es un ciclo que alcanza su punto máximo en junio, julio y agosto (verano), destacando un pico muy acusado en este último mes, y cayendo a los puntos más bajos en noviembre, diciembre, enero y febrero (otoño e invierno). Por otro lado, la LLU y la Precipitación muestran tendencias similares, no obstante, los valores bajos de LLU coinciden con los picos de ETP esto se debe a que están inversamente relacionadas.



**Figura 11.** Volumen mensual de variables climáticas. (Datos Anexo II)

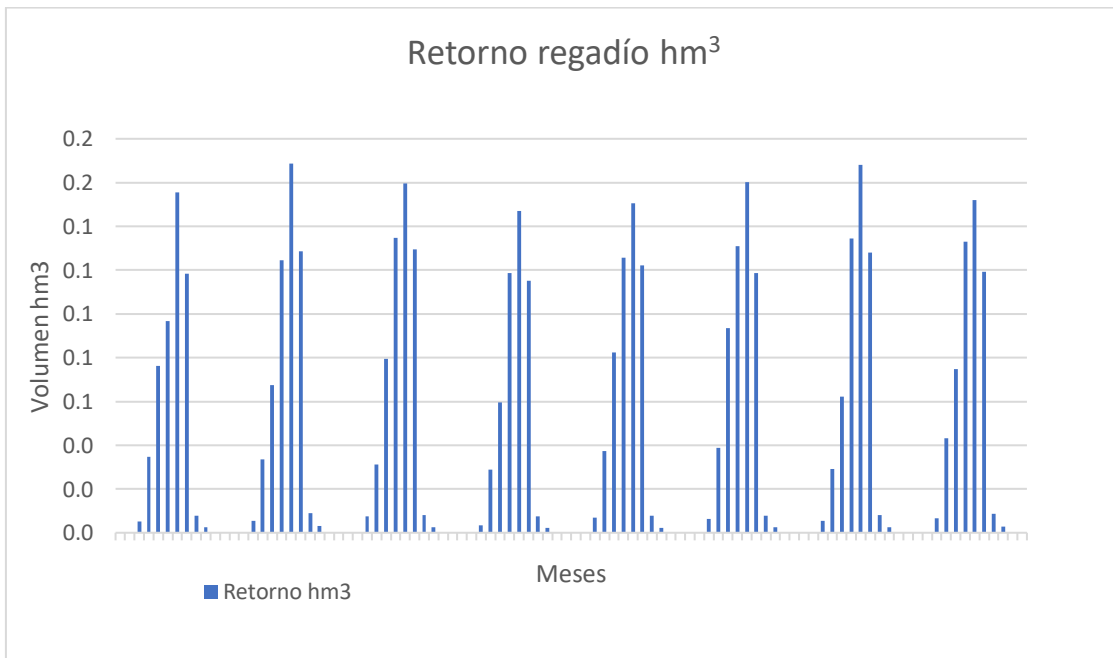
Por otro lado, la escorrentía y la infiltración se calculan en base a la LLU como se describe en el apartado 4.2.2. Para separar la escorrentía superficial de la infiltración, el modelo RENATA emplea el método del “Soil Conservation Service”, también conocido como el método del número de curva. La escorrentía superficial se ha estimado teniendo en cuenta fundamentalmente la pendiente, la litología y la capacidad de campo. Los valores obtenidos alcanzan un volumen medio anual de 2.2 hm<sup>3</sup> frente al 15.1 hm<sup>3</sup> de la infiltración. Esto se debe a que los valores de lluvia útil son menores o muy cercanos a los valores de  $P_o$ .

Como se muestra en la Figura 12, se produce una elevada infiltración entre los meses de noviembre y abril, en especial en los años 2010, 2013 y 2016 que además corresponden con los años en los que se registran mayores precipitaciones.



**Figura 12.** Volúmenes de INF y LLU calculados a través del modelo RENATA (Datos Anexo II)

El retorno por regadío (Figura 13) representa un volumen adicional de recarga cifrado en 0.5 hm<sup>3</sup>/año, siendo bajos en comparación con la infiltración. Este aporte se produce únicamente entre los meses de abril y agosto, correspondiendo con los meses de crecimiento de los cultivos.

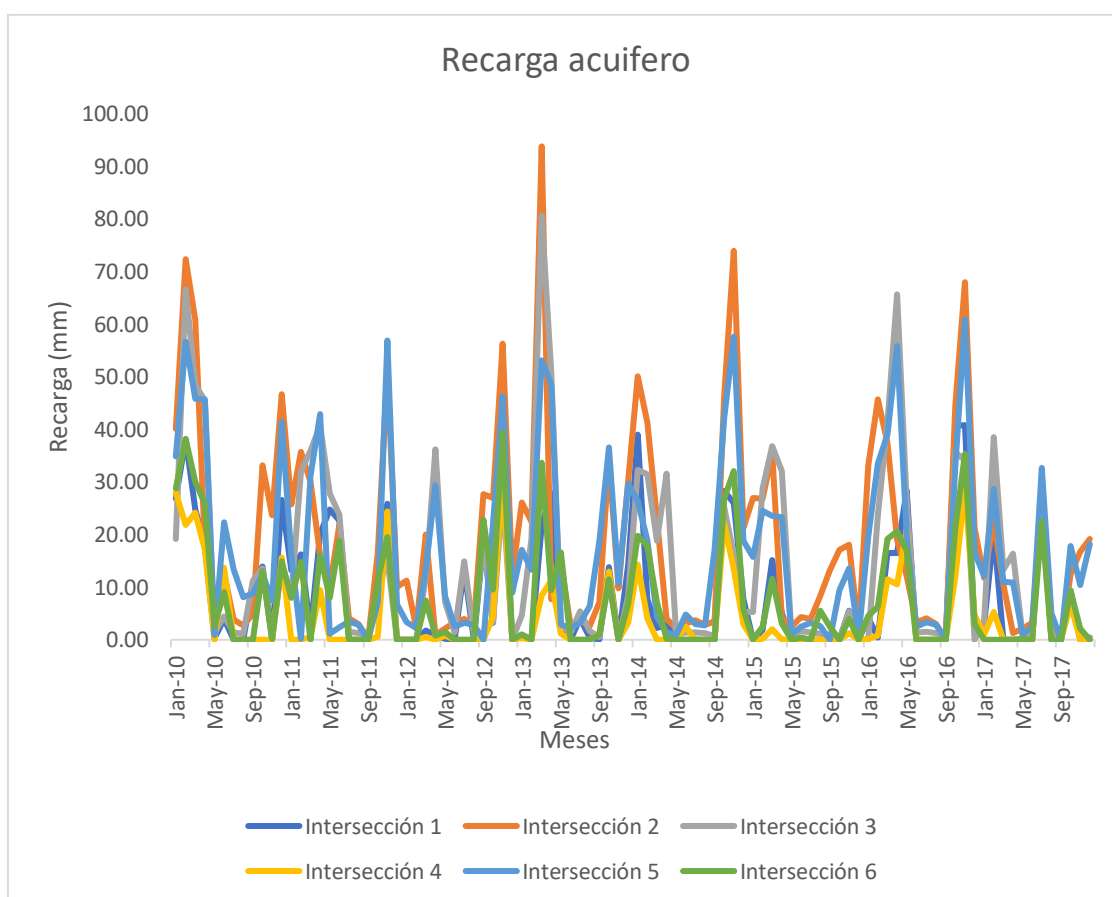


**Figura 13.** Volumen por retorno de regadío (Datos Anexo II)

## 7.1. Recarga calculada

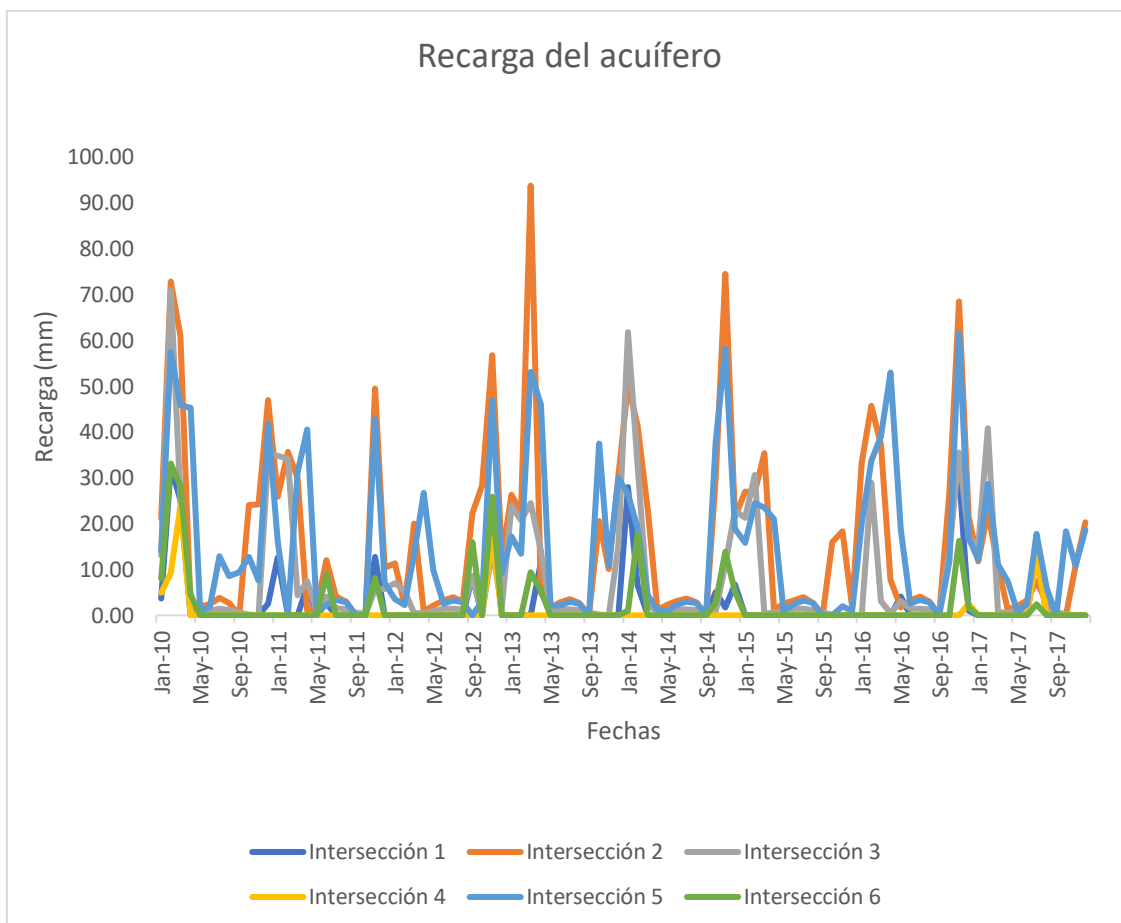
Empleando las series diarias de las variables descritas en el apartado anterior, se ha procedido a calcular la recarga natural del acuífero aluvial “Jarama-Tajuña”. Dada la alta variabilidad edafológica en la zona, se ha calculado la tasa de recarga para dos condiciones de la zona de estudio: por un lado, se ha considerado una capacidad de campo de 18% (SECS., 2017); y por otro lado, un suelo con una capacidad de campo del 40%, como una simulación de éste valor inducido por una mejora en las prácticas agrícolas.

Del análisis realizado para el primer escenario (Figura 14), la recarga media anual total se sitúa en 15.6 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 15.1 hm<sup>3</sup>/año proceden de la infiltración directa del agua de lluvia y 0.5 hm<sup>3</sup>/año del retorno de regadío, en total en el periodo entre 2010-2017 la recarga total es de 124.8 hm<sup>3</sup>.



**Figura 14.** Tasa de recarga del acuífero para una CC del 18% (Datos Anexo IV)

Por otro lado, empleando un CC de 40% (Figura 15) se ha obtenido una recarga media anual total de 8.68 hm<sup>3</sup>/año, siendo 8.22 hm<sup>3</sup>/año de la infiltración y 0.46 hm<sup>3</sup>/año del retorno de regadío, la recarga total en el periodo entre 2010-2017 es de 69.40 hm<sup>3</sup>.



**Figura 15.** Tasa de recarga del acuífero para una CC del 40% (Datos Anexo III)

En ambos escenarios se puede observar que en las intersecciones que presentan regadío, intersección uno, tres y cinco, los aportes de recarga son más elevados, debido a las dotaciones de riego, siendo el sector con cultivo de maíz el que presenta los picos más altos. Así, la recarga está directamente relacionado con los usos agrícolas, por lo que cualquier cambio en los patrones de riego y cultivo implica una variación en la tasa de recarga.

## 8. Conclusiones

La tasa de recarga natural del acuífero es una variable clave para delimitar un caudal de explotación y caracterizar el estado de la MAS, logrando así una adecuada gestión del agua subterránea. En este trabajo se ha evaluado el acuífero aluvial “Jarama-Tajuña” mediante el modelo RENATA y ha permitido establecer las siguientes conclusiones:

- Los resultados muestran coherencia con el balance hídrico de la zona de estudio. Los valores obtenidos de precipitación e infiltración ponen de manifiesto que la principal fuente de agua para la recarga es el agua de lluvia (96%) y en menor medida las aportaciones por el riego (4%). Por ello, un cambio de cultivo que requieran un mayor aporte o un uso excesivo de agua para regadío supondrían un aumento en la recarga.
- Aplicando la metodología desarrollada en el estudio y para el periodo de tiempo considerado 2010-2017, la recarga total del acuífero es de 124. 8 hm<sup>3</sup>. Las zonas en las que se produce una mayor recarga son las intersecciones que presentan zonas de cultivo y el mayor aporte corresponde al cultivo de maíz.
- La realización de dos escenarios empleando dos CC, el primero con un 18% y el segundo con un 40% pone en manifiesto que a mayores valores de CC el suelo almacena más agua, produciendo menos agua de recarga

## 9. Bibliografía

- Alcalá, FJ (2005) “Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico” Departament d'enginyeria del terreny, cartografia i geofísica” Universitat Politècnica de Catalunya.
- Alegría Calvo, M. A. (2013). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO.
- Andreo, B., Vías, J. M., Mejías, M., Ballesteros, B. J., & Marín, A. I. (2007). Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero jurásico de El Maestrazgo (Castellón, NE España). Los acuíferos costeros: retos y soluciones. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y aguas subterráneas, (23), 893-902.
- Arauzo, M., Martínez-Bastida, JJ, & Valladolid, M. (2008). Contaminación por nitrógeno en el sistema “río-acuífero aluvial” de la cuenca del Jarama (Comunidad de Madrid, España) ¿Origen agrícola o urbano? *Limnética* , 27 (2), 195–210.
- Bixio, D., Thoeve, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T. y Melin, T. (2006). Reutilización de aguas residuales en Europa. *Desalinización* , 187 (1–3), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.070>.
- Carreño, F, Martínez, SG, Ramos, JL, Martínez, RF, & Mabeth-Montoya Colonia, A. (2014). “Construcción de un geomodelo 3D para la gestión de recursos hídricos: caso de estudio en el Parque Regional de los cursos bajos de los ríos Manzanares y Jarama (Madrid, España)”. *Ciencias ambientales de la tierra* , 71 (1), 61-66.
- CHT (2018). “Estado químico de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo (2011/2015)”.
- Custodio, E. (1998). “Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre”. *Boletín Geológico y Minero*, 109 (4), 329-346.
- EEA (2012). El agua en la agricultura. European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente).
- Fernández Sánchez, J.A., (1998). Incidencia de la sobreexplotación y salinización de los acuíferos en el abastecimiento de poblaciones.



- Gleeson, T., Befus, K.M., S.Jasechko, E. Luijendijk, M. Bayani-Cardenas, (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience* 9: 161–167.
- Herraiz, A. S. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 97-114.
- IGME-DPA (2012). Programa para el cálculo de la recarga a los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo (RENATA). Calibración mediante modelos de flujo.
- Martin, & Blazhevskaja, V. (2015). Agua y saneamiento. Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.
- Montoya Colonia, AM (2011). Modelo geológico 3D del sector I del acuífero detrítico del tramo bajo del Jarama. Biblioteca digital Universidad de Alcalá.
- Mostaza, D., Carreño F., Iepure S., (2016). Análisis del efecto de la extracción de agua para riego de un acuífero aluvial. Caso de estudio: Masa de Agua Subterránea (030.007) Aluviales: Jarama-Tajuña y Finca Experimental La Isla (IMIDRA, Arganda del Rey – Madrid). Comunicaciones CONAMA 2016.
- Mostaza, D., Carreño-Conde, F., Rasines-Ladero, R., & Iepure, S. (2018). Hydrogeochemical characterization of a shallow alluvial aquifer: 1 baseline for groundwater quality assessment and resource management. *The Science of the Total Environment*, 639, 1110–1125.
- Roblas, N. y García Avilés, J. (1997) Valoración ambiental y caracterización de los ecosistemas acuáticos leníticos del Parque Regional en torno a los ejes de los cursos bajos de los ríos Manzanares y Jarama. 128 pp.
- Ruiz, J. M. (2003). Utilización del balance de cloruros en la zona no saturada en la estimación de la recarga natural a un acuífero detrítico. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*, 6, 403-408.
- Sahuquillo, A., Custodio, E., & Llamas, M. R. (2009). La gestión de las aguas subterráneas. *Tecnología del agua*, 305, 60-67.
- Tweed, S., Celle-Jeanton, H., Cabot, L., Huneau, F., De Montety, V., Nicolau, N., Travi, Y., Babic, M., Aquilina, L., Vergnaud-Ayraud, V., & Leblanc, M. (2018). Impact of irrigated agriculture on groundwater resources in a temperate humid region. *The Science of the Total Environment*, 613–614, 1302–1316.
- Villarroya, F., Senderos, AJ y Alcázar, M. (2008). Las «minas de agua» de Ciempozuelos (Madrid). *Geogaceta*, N° 44 . 175–178.

## 10. Anexos

### Anexo I: Valores orientativos del parámetro Po (mm) en función de algunas características del terreno y del uso

Uso del suelo	Pendiente	Sustrato			
		A	B	C	D
Cereales de invierno	>=3%	32	19	12	10
	<3%	35	22	14	12
Rotación de cultivos pobres	>=3%	29	17	11	8
	<3%	30	19	14	10
Rotación de cultivos densos	>=3%	43	23	14	11
	<3%	47	25	16	14
Pradera Pobre	>=3%	24	14	8	6
	<3%	60	25	12	7
Pradera Media	>=3%	53	23	14	9
	<3%	79	35	17	10
Pradera Buena	>=3%	70	34	18	14
	<3%	124	55	23	14
Plantaciones regulares	>=3%	62	26	15	10
Aprovechamiento forestal pobre	<3%	76	34	19	14
Plantaciones regulares aprovechamiento forestal medio	>=3%	79	34	19	14
	<3%	94	43	23	15
Masa forestal clara	Indistinto	60	24	14	10
Masa forestal media	Indistinto	76	34	34	16
Masa forestal espesa	Indistinto	90	47	31	23
Masa forestal muy espesa	Indistinto	124	65	43	34
Permeable	>=3%	3			
	<3%	5			
Impermeable	>=3%	2			
	<3%	4			

## Anexo II : Volúmenes mensuales variables climáticas (cc18)

Fecha	Precipitación hm3	ETP hm3	ETR hm3	LLU hm3	Infiltración hm3	Escorrentía hm3	Retorno hm3
ene-10	3.3	1.8	1.6	3.5	3.2	0.3	0
feb-10	4.3	2	1.5	6.2	5.4	0.9	0
mar-10	3.6	3.8	2.2	4.8	4.1	0.7	0
abr-10	3.5	10.1	3.8	2.8	2.5	0.3	0
may-10	1.3	14.4	2.6	0.1	0.1	0	0.1
jun-10	2.9	14.2	4.4	0.9	0.9	0	0.1
jul-10	0.5	16.2	0.9	0.1	0.1	0	0.2
ago-10	0.4	18	0.5	0.1	0.1	0	0.1
sep-10	0.9	7.9	1.4	0.9	0.8	0.1	0
oct-10	2	5.1	1.5	2.4	1.9	0.6	0
nov-10	1	2.8	2.1	0.7	0.7	0	0
dic-10	2.6	2	1.9	3.3	3.2	0.1	0
ene-11	1.3	1.9	1.7	1.6	1.6	0.1	0
feb-11	1.4	2.7	1.3	2.3	2.1	0.2	0
mar-11	1.7	3.9	1.9	1.7	1.6	0.1	0
abr-11	3	10.9	3.4	3.2	2.3	0.9	0
may-11	2.7	15.3	6	1.9	1.6	0.3	0.1
jun-11	1.8	15.4	1.5	2.7	1.8	0.9	0.1
jul-11	0.3	15.7	0.4	0	0	0	0.2
ago-11	0.5	18	0.8	0	0	0	0.1
sep-11	0	8.7	0.1	0	0	0	0
oct-11	1.7	5.9	1.1	1.4	1.1	0.2	0
nov-11	3.4	2.8	2.7	3.9	3.6	0.3	0
dic-11	0.5	2.2	0.6	0.4	0.4	0	0
ene-12	0.5	2.3	0.4	0.3	0.3	0	0
feb-12	0.1	2.8	0.3	0.1	0.1	0	0
mar-12	1.2	5.1	1	1.1	1	0.2	0
abr-12	2.4	9.6	3.7	0.8	0.8	0	0
may-12	1.4	15.8	3.3	0.2	0.2	0	0.1
jun-12	0	15.6	0.1	0	0	0	0.1
jul-12	0.2	16	1	0.9	0.7	0.2	0.2
ago-12	0	18	0	0	0	0	0.1
sep-12	2.8	7.8	1	3.8	1.9	1.9	0
oct-12	2	4.9	2	1.6	1.3	0.3	0
nov-12	3.5	2.6	2	5.4	4.3	1.1	0
dic-12	0.6	2.1	0.5	0.4	0.4	0	0
ene-13	1.3	2	1.4	1	1	0	0
feb-13	1.1	2.2	1	1	1	0	0
mar-13	4.9	3.4	3.1	5.8	5.3	0.6	0
abr-13	2.7	9.9	3.6	2.9	2.6	0.4	0
may-13	2.4	14.3	4.9	0.7	0.6	0.1	0.1

Fecha	Precipitación hm3	ETP hm3	ETR hm3	LLU hm3	Infiltración hm3	Escorrentía hm3	Retorno hm3
jul-13	0.7	16.2	1.2	0.2	0.2	0	0.1
ago-13	0.4	18.2	1.1	0.1	0.1	0	0.1
sep-13	1.2	8.3	0.9	0.4	0.4	0	0
oct-13	2.2	5.2	2.3	2.4	2.2	0.2	0
nov-13	0.6	3	1	0.4	0.4	0	0
dic-13	1.8	2.3	1.3	2	1.9	0.1	0
ene-14	2.6	2	1.9	4.1	3.9	0.2	0
feb-14	2.1	2.2	1.7	2.4	2.2	0.2	0
mar-14	1.1	4.5	0.6	1.2	1	0.2	0
abr-14	0.9	10.9	3	0.6	0.6	0	0
may-14	0.2	15.6	1.1	0	0	0	0.1
jun-14	0.9	15.1	1.4	0	0	0	0.1
jul-14	0.2	15.3	0.5	0	0	0	0.2
ago-14	0	17.6	0	0	0	0	0.1
sep-14	1.1	7.9	1.4	0.3	0.3	0	0
oct-14	2.8	5.5	1.7	3.9	3.5	0.3	0
nov-14	4.4	2.8	2.5	4.8	4.3	0.5	0
dic-14	1.2	2.3	2	1.3	1.2	0.1	0
ene-15	1.3	2.2	0.9	1	1	0	0
feb-15	1.6	2.3	1.9	1.5	1.4	0.1	0
mar-15	1.8	4.6	1.3	2.6	2.4	0.3	0
abr-15	1.8	10.5	3.3	1	0.9	0.1	0
may-15	0	16.3	0.3	0	0	0	0.1
jun-15	1.1	15.9	1.9	0	0	0	0.1
jul-15	0.2	17.2	0.2	0	0	0	0.2
ago-15	0.8	17.6	0.3	0.2	0.2	0	0.1
sep-15	0.7	7.8	0.7	0.5	0.4	0.1	0
oct-15	1	5.1	1.6	0.6	0.6	0	0
nov-15	1.1	3.3	1.1	1.1	1	0.1	0
dic-15	0.1	2.6	0.3	0.1	0.1	0	0
ene-16	1.6	2.1	1.9	1.4	1.3	0	0
feb-16	2.3	2.4	1.7	2	2	0.1	0
mar-16	2.6	4.3	1.8	3.4	2.8	0.5	0
abr-16	4.5	9.7	5.8	3.1	2.7	0.3	0
may-16	2.8	14.2	3.8	2.3	2.2	0.1	0.1
jun-16	0.2	15.7	0.3	0	0	0	0.1
jul-16	0.1	16.5	0.9	0	0	0	0.2
ago-16	0	18.1	0.1	0	0	0	0.1
sep-16	0.4	8.7	0.4	0	0	0	0
oct-16	3.2	5.3	2.5	4.7	3.9	0.8	0
nov-16	4	2.8	1.9	5.7	5.1	0.7	0
dic-16	1.1	2.3	1.7	0.9	0.9	0	0
ene-17	0.7	2.2	0.4	0.7	0.6	0	0

<b>Fecha</b>	<b>Precipitación hm3</b>	<b>ETP hm3</b>	<b>ETR hm3</b>	<b>LLU hm3</b>	<b>Infiltración hm3</b>	<b>Escorrentía hm3</b>	<b>Retorno hm3</b>
mar-17	0.6	4.7	0.7	0.6	0.6	0	0
abr-17	0.7	11.2	1.5	0.3	0.3	0	0
may-17	1.1	15.9	2.5	0	0	0	0.1
jun-17	0.4	16.3	1.3	0	0	0	0.1
jul-17	2.9	16.1	1.7	4.1	2.7	1.3	0.2
ago-17	0.4	17.9	0.6	0	0	0	0.1
sep-17	0	8.3	0	0	0	0	0
oct-17	1.4	6.1	1.1	1.3	1.1	0.2	0
nov-17	0.9	3.2	0.5	0.7	0.6	0.1	0
dic-17	1.1	2.2	1.4	0.8	0.8	0	0

### Anexo III: Cálculos por intersección CC40

Sector	ETP	ETR	LLU	Infiltración	Escorrentía	Retorno de riego
	hm3/año	hm3/año	hm3/año	hm3/año	hm3/año	hm3/año
Intersección 1	52.928	13.84	1.456	1.34	0.116	
Intersección 2	19.545	4.04	5.466	4.928	0.539	0.349
Intersección 3	9.688	2.886	1.054	0.982	0.072	0.071
Intersección 4	14.246	2.684	0.11	0.096	0.014	
Intersección 5	2.46	0.748	2.029	1.869	0.16	0.101
Intersección 6	9.148	2.251	0.204	0.18	0.024	
TOTAL	108.015	26.45	10.319	9.394	0.925	0.521

## Anexo IV: Cálculos por intersección CC18

Sector	ETP hm3/año	ETR hm3/año	LLU hm3/año	Infiltración hm3/año	Escorrentía hm3/año	Retorno de riego hm3/año
Intersección 1	59.33	11.63	5.52	4.72	0.8	
Intersección 2	22.93	3.4	7.84	6.84	0.99	0.41
Intersección 3	10.33	2.23	2.36	2.05	0.32	0.08
Intersección 4	11.36	1.72	0.51	0.46	0.04	
Intersección 5	2.81	0.54	2.66	2.44	0.23	0.12
Intersección 6	10.43	1.97	0.83	0.71	0.12	
TOTAL	117.19	21.5	19.71	17.22	2.49	0.61