



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
Curso 2024-2025**

**MODELACIÓN NÚMÉRICA DEL ACUÍFERO
INTERFLUVIAL PECES-DUERNA (LEÓN)**

GIUSSEPE MASSONE GREZ

**TUTORAS DEL TRABAJO: CAROLINA GUARDIOLA ALBERT
LUCIA DE STEFANO**



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
Curso 2024-2025**

**NUMERICAL MODELING OF THE PECES-
DUERNA INTERFLUVE AQUIFER (LEÓN)**

GIUSSEPE MASSONE GREZ

**TUTORAS DEL TRABAJO: CAROLINA GUARDIOLA ALBERT
LUCIA DE STEFANO**

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Giussepe Massone Grez

con NIE Z1062746J, estudiante de Máster de Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2024-2025, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado Modelación numérica del acuífero interfluvial Peces-Duerná (León). y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Carolina Guardiola Albert y Lucia De Stefano

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 13 de enero de 2025

Fdo.:

Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)

Yo, Giuseppe Massone Grez

Con DNI/NIE/PASAPORTE:

Z1062746J

declaro de manera responsable que el/la presente:

- Trabajo de Fin de Grado (TFG)
- Trabajo de Fin de Máster (TFM)
- Tesis Doctoral

Titulado/a

Modelación numérica del acuífero interfluvial Peces-Duerna (León).

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid a 13.01.2025



RESUMEN

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) representan estrategias inspiradas en procesos naturales para mejorar la gestión del agua. Estas soluciones, que buscan aumentar la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, mitigar riesgos como sequías e inundaciones, y fortalecer la biodiversidad y la resiliencia, incluyen prácticas tradicionales como los sistemas de recarga artificial de acuíferos mediante canales de infiltración. Este trabajo se desarrolla en la comarca leonesa de La Valduerna, específicamente en el interfluvio entre los ríos Peces y Duerna, donde se emplean zayas para fomentar la recarga del acuífero y optimizar el uso del agua.

Este trabajo aborda el desarrollo de un modelo numérico para el análisis y gestión del acuífero interfluvial Peces-Duerna, situado en la comarca de La Valduerna, León. El acuífero, caracterizado por su dependencia de la recarga natural y la intervención humana mediante zayas (canales artificiales tradicionales), enfrenta desafíos relacionados con la disponibilidad hídrica y el impacto del cambio climático en una región predominantemente agrícola.

El objetivo principal del TFM es construir un modelo matemático de flujo de aguas subterráneas empleando la última versión del software MODFLOW, con el fin de evaluar la dinámica del acuífero y proporcionar herramientas para la toma de decisiones en su gestión. Este modelo incluye simulaciones en régimen permanente y transitorio entre 2010 y 2020, calibrado con datos piezométricos recopilados en un ensayo controlado de recarga artificial en marzo del 2020.

La metodología incluyó tres etapas principales: recopilación de datos climáticos e hidrogeológicos, modelado matemático de flujo subterráneo y simulación de escenarios de gestión. Los resultados obtenidos permitieron cuantificar la recarga por infiltración de lluvia, los balances hídricos y los efectos de la intervención con zayas en la recarga. Se estimó que las zayas incrementan la recarga del acuífero en aproximadamente 1 hm³/año, lo que representa un aumento del 40% respecto a la recarga natural. Además, se simuló la extensión del periodo de uso de las zayas y la construcción de una nueva zaya, mostrando un aumento en el almacenamiento hídrico promedio del 0.5 hm³/año.

El modelo también permitió calcular el tiempo de renovación del acuífero (9.2 años) y el tiempo de tránsito de partículas de agua (43.8 años), proporcionando una visión integral de su dinámica y respuesta ante distintos escenarios. Los resultados evidencian que las zayas actúan como una SbN para enfrentar desafíos asociados a la variabilidad climática y la presión sobre los recursos hídricos.

Este estudio confirma la utilidad de la modelación numérica como herramienta de gestión, permitiendo analizar opciones para optimizar el uso del agua y prevenir su sobreexplotación, con implicaciones directas para la sostenibilidad agrícola y ambiental de la comarca de La Valduerna

AGRADECIMIENTOS

Siempre estará en primer lugar mi núcleo familiar, mi mayor agradecimiento a mi padre y madre, son el pilar para cumplir mis objetivos. También en memoria de Matías, todos mis logros son en conjunto.

Nadie dijo que hacer un posgrado lejos de casa sería fácil, pero en este camino conocí gente maravillosa que hizo más ameno todo este proceso, muchas gracias a todos mis colegas, amigos y profesores. Agradecer también a los investigadores del IGME, en especial a Carolina, por su paciencia y buena disposición con mi trabajo.

El presente trabajo es una contribución al proyecto WaSHa, que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos que contribuyan a implementar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030).

Contenido

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo principal	2
1.1.1 Objetivos Específicos	2
Capítulo 2. ZONA DE ESTUDIO	3
2.1 Clima	3
2.2 Geología	4
2.2.1 Geología Local	7
2.3 Hidrología	7
2.4 Hidrogeología	8
Capítulo 3. METODOLOGÍA.....	10
3.1 Primera etapa	10
3.2 Segunda etapa	14
3.3 Tercera etapa	16
Capítulo 4. Resultados	17
4.1 Cálculo de la recarga por infiltración de lluvia	17
4.2 Modelo matemático numérico de flujo subterráneo	19
4.2.1 Discretización y propiedades del modelo.....	19
4.2.2 Condiciones de contorno	19
4.2.3 Régimen permanente	22
4.2.4 Régimen transitorio	24
4.2.5 Estimación del periodo de renovación de agua en el acuífero	32
4.2.6 Tiempo de tránsito en el acuífero	32
Capítulo 5. DISCUSIÓN	33
Capítulo 6. CONCLUSIONES.....	37
Referencias.....	38

Índice de figuras

Figura 1. Delimitación del acuífero interfluvial Peces-Duerna.....	3
Figura 2. Climograma para la zona de estudio generado con los datos del periodo hidrológico 2010-2011 al 2019-2020 obtenidos en puntos interpolados por la AEMET.....	4
Figura 3 Mapa geológico modificado de hoja 231 (La Bañeza) y 193 (Astorga) del MAGNA..	6
Figura 4. Mapa de la zona de estudio con ubicación de los principales ríos y localidades importantes.	8

Figura 5. Esquema hidrogeológico de la zona de estudio y ubicación del acuífero en estudio (acuífero superficial en la figura). Obtenido de CHD, 2021.	9
Figura 6. Esquemmatización de la metodología empleada este Trabajo de Fin de Máster.	10
Figura 7. Esquema de la producción de lluvia útil e incremento de la reserva a partir de la precipitación. Fuente tomado de Aljibe Consultores, 2013.	13
Figura 8. Distribución espacial de pozos de extracción inventariados.	15
Figura 9. Comparativa los valores interpolados por AEMET y de los medidos en la estación meteorológica de Quintana del Marco en el año hidrológico 2019-2020.	17
Figura 10. Comparativa los valores interpolados por AEMET y de los medidos en la estación meteorológica de Hospital de Órbigo en el año hidrológico 2019-2020.	17
Figura 11. Gráfica comparativa con los distintos valores de capacidad de retención de agua en el suelo utilizados desde los años 1952 a 2020.	18
Figura 12. Discretización espacial realizada para el modelo.	19
Figura 13. Representación visual de las condiciones de contorno relacionadas al paquete RIV. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.	20
Figura 14. Representación de la zonificación en la zona de estudio para la recarga por infiltración por lluvia (polígonos de color rojo) y ubicación de las zayas (líneas de color púrpura). Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.	21
Figura 15. Representación espacial de los pozos de extracción en la zona de estudio. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.	22
Figura 16. Mapa de los resultados piezométricos obtenidos en régimen permanente.	23
Figura 17. Distribución espacial de los piezómetros con medidas realizadas durante el año 2020 en la zona de estudio. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.	24
Figura 18. Gráficos comparativos de valores simulados versus valores medidos para los 4 días de ensayo.	25
Figura 19. Mapa piezométrico para la simulación del 15.03.2020.	26
Figura 20. Mapa piezométrico para la simulación del 30.01.2020.	26
Figura 21. Mapa piezométrico para la simulación del 30.03.2020.	27
Figura 22. Mapa piezométrico para la simulación del 27.09.2020.	27
Figura 23. Representación con los cambios del nivel piezométrico (unidades de medida en m) para el ensayo de recarga artificial controlada realizado entre el 15.03.2020 y el 30.03.2020. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.	28
Figura 24. Gráfica de resultados para las entradas al sistema del balance hídrico en régimen transitorio.	29
Figura 25. Gráfica de resultados para las salidas al sistema del balance hídrico en régimen transitorio.	30
Figura 26. Gráfica de resultados de entrada neta al acuífero desde los ríos en régimen transitorio.	31
Figura 27. Gráfica de resultados de la variación anual del almacenamiento neto vs curva de desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media.	31
Figura 28. Representación de la trayectoria subterránea de partículas de agua en el acuífero, con colores más fríos partiendo de 0 días a colores más cálidos hasta de hasta	

16000 días. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.....32

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros utilizados en la modelación para la condición de contorno RIV.	20
Tabla 2. Balance hídrico obtenido para la simulación en régimen permanente.	23
Tabla 3. Resumen resultados de entradas y salidas en régimen transitorio.	29
Tabla 4. Tabla comparativa de los resultados de la simulación transitoria y el escenario de gestión 1 simulado.	34
Tabla 5. Tabla comparativa de los resultados de la simulación transitoria y el escenario de gestión 2 simulado.	35

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para la gestión del agua abarcan una serie de acciones y procesos que imitan los sistemas de la naturaleza con el objetivo de mejorar la disponibilidad y calidad del agua, reducir los riesgos de desastres relacionados con el agua (como sequías e inundaciones), y promover el bienestar humano, los servicios ecosistmicos, la resiliencia y la biodiversidad (TNC y MITECO, 2019). Un ejemplo de SbN son los sistemas ancestrales de recarga artificial de acuíferos que utilizan canales de infiltración. El ámbito geográfico de estudio de este trabajo se sitúa en la comarca leonesa de La Valduerna, en el interfluvio entre los ríos Peces y Duerna, donde se realiza recarga artificial mediante infiltración en zayas. Las zayas consisten en unos canales excavados en el terreno, normalmente sobre arenas, gravas y arcillas, con longitudes comprendidas entre 2 y 6km y secciones medias de 1.2 m de ancho por 70 cm de profundidad. Las capacidades de transporte de las zayas permiten la circulación de caudales entre 100 y 250 l/s. Antes de la temporada de riego, el 1 de abril se desvía el agua del río Duerna trasvasándola al río Peces mediante las zayas, normalmente hasta junio, ya que la mayoría de los años el río no lleva caudal suficiente para activar las zayas durante los meses de julio y agosto. Parte del agua se infiltra desde las zayas al acuífero sobre el que está la zona de riego mientras que la otra parte se vierte en el río Peces, que es un río perdedor. El agua recarga en el acuífero desde las zayas y desde el río Peces, además de los retornos de riego, permiten que el agua esté disponible para poder extraerla mediante pozos excavados a mano, al final de la temporada de riego, cuando ya no es posible derivar el agua dese el río Duerna (de la Losa Román et al. 2024).

El presente Trabajo de Finde Máster (TFM) se enfoca en cuantificar los recursos medios, las reservas y recarga artificial en la zona de estudio. Para ello se plantea realizar un análisis cuantitativo del flujo de aguas subterráneas mediante el desarrollo y utilización de un modelo matemático utilizando el software MODFLOW. Los modelos numéricos de flujo de aguas subterráneas ayudan a resolver lo que no se puede observar o medir exhaustivamente: la distribución del nivel freático en el espacio y el tiempo, los balances de agua, o las tasas y trayectorias de flujo. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015). Para poder evaluar los balances del acuífero e introducirlos como datos en el modelo numérico será necesario evaluar la recarga por infiltración de la lluvia, que se calculará utilizando un balance del agua en el suelo con el programa TRASERO (Aljibe Consultores, 2013)

El objetivo final de esta cuantificación es conseguir una herramienta de apoyo a la gestión de agua, tanto superficial como subterránea, en la zona de La Valduerna. Se debe tener en cuenta que la zona de estudio es tradicional de regadío y la gestión sostenible del agua es clave tanto para los usuarios del agua como para sus gestores. Es más, se sabe que existe una discusión entre los regantes y la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), ya que los agricultores proponen alargar el tiempo de funcionamiento de las zayas adelantando el inicio de su apertura a enero. También existe la posibilidad de construir zayas adicionales, ya que el número de estas era mucho mayor a mediados del siglo XX. Gracias a las herramientas de modelado se pueden simular estos escenarios de gestión, y en función de los resultados, se puede tener una primera aproximación de sus efectos para el acuífero.

Para calibrar el modelo numérico con datos reales se utilizará un ensayo de infiltración realizado en marzo del 2020, que permite evaluar el rendimiento de las zayas en el acuífero Peces-Duerna mediante una prueba controlada de recarga artificial del acuífero aluvial. Las comunidades de regantes abrieron las compuertas antes de la fecha estipulada normalmente

por la CHD, dejando correr por las zayas los flujos de agua autorizados durante un lapso de 15 días. Durante esos 15 días se midió el caudal derivado desde el Duerna a las zayas y el caudal que vertieron las zayas en el río Peces. La diferencia entre el caudal de entrada y salida de cada zaya permitió determinar el volumen de agua recargado en cada zaya. Además, parte del caudal vertido en el río Peces acabó infiltrándose en el acuífero.

1.1 Objetivo principal

El objetivo principal es desarrollar una herramienta de apoyo de gestión del agua mediante la construcción de un modelo matemático para cuantificar los recursos medios, las reservas y la recarga artificial que se realiza mediante infiltración en zayas en la zona de la Valduerna. Dicha herramienta será utilizada para analizar diferentes escenarios de gestión del acuífero. Además, en el futuro podrá usarse para evaluar acciones que permiten paliar los efectos del cambio climático y para la toma de decisiones frente a cambios en los usos de los recursos hídricos.

1.1.1 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son los de:

- I. Elaborar un modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.
- II. Desarrollar un modelo numérico de flujo en estado estacionario y transitorio para el periodo entre los años hidrológicos 2010-2011 y 2019-2020. El modelo deberá corroborar el modelo conceptual y los datos observados, piezometría medida durante el ensayo de infiltración realizado en 2020.
- III. Evaluar los recursos disponibles en el acuífero.
- IV. Realizar simulaciones de escenarios que faciliten la toma de decisiones para una gestión sostenible del agua en la zona de estudio.

Capítulo 2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende un área de unos 44 km² y se ubica en el norte de la provincia de León, España (Figura 1). Esta ubicación proporciona una diversidad de paisajes que incluyen en su mayoría áreas de regadío gracias a su terreno muy fértil pero también las hay de secano, favorecidas por la presencia de varios cursos fluviales.

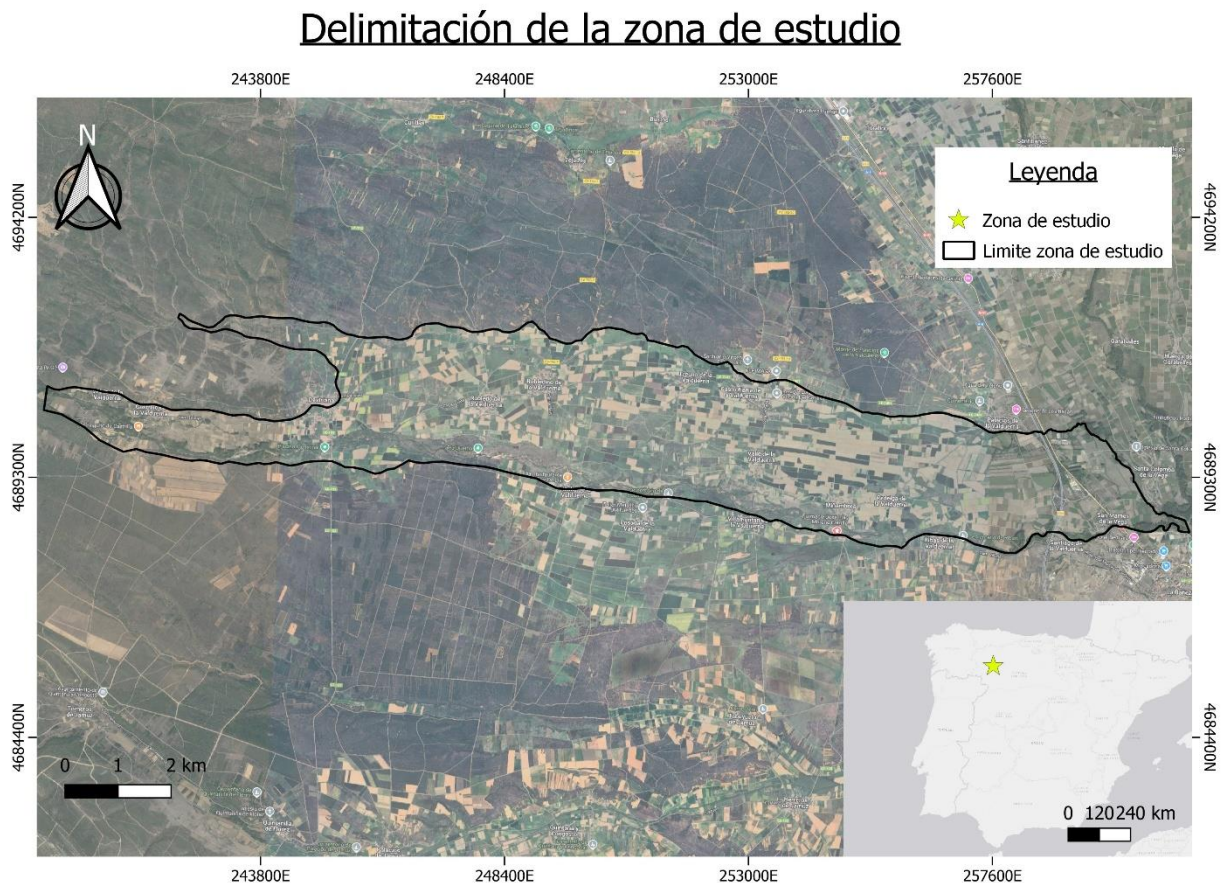


Figura 1. Delimitación del acuífero interfluvial Peces-Duerna.

2.1 Clima

La zona de estudio tiene un clima de tipo mediterráneo templado (Figura 2), con temperaturas medias entre 10 y 14° C, una precipitación anual entre 400 y 900 mm a lo largo de la zona de estudio, y un periodo seco de tres a cinco meses. Todo ello con matices más fríos y húmedos en la transición hacia la zona montañosa. (Rua Aller, 2012)

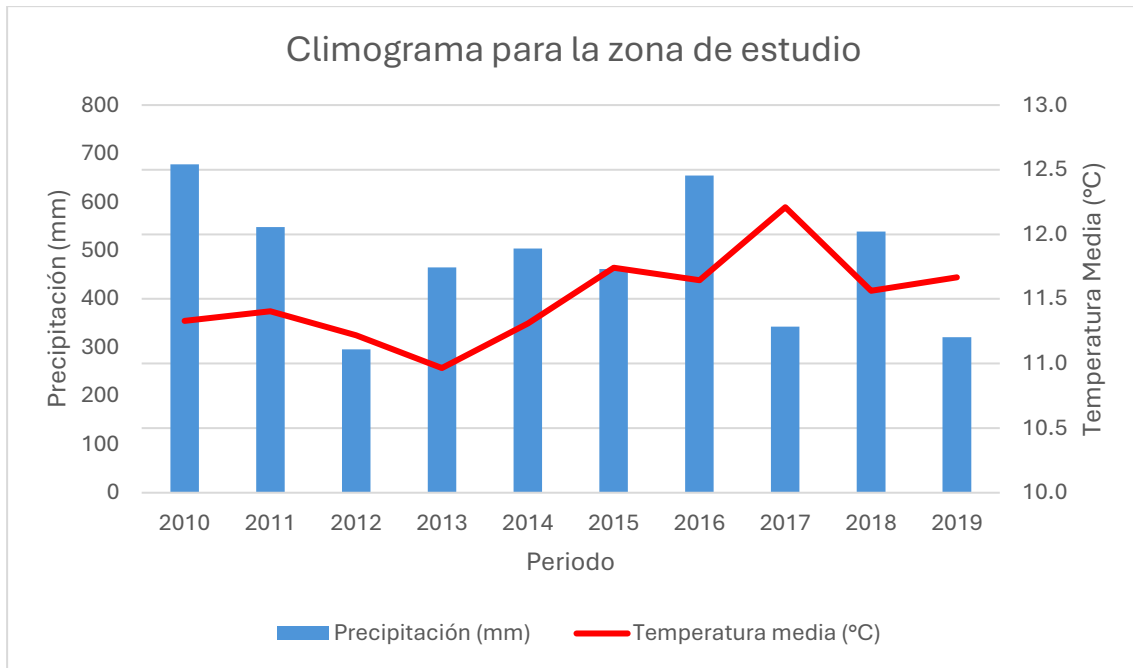


Figura 2. Climograma para la zona de estudio generado con los datos del periodo hidrológico 2010-2011 al 2019-2020 obtenidos en puntos interpolados por la AEMET.

2.2 Geología

La comarca de la Valduerna se enmarca, casi por completo, en la hoja 231- La Bañeza, y este apartado se respaldará principalmente en dicho informe con un mapa de elaboración propia a partir de la hoja 231 (La Bañeza) y 193 (Astorga) del MAGNA (Figura 3).

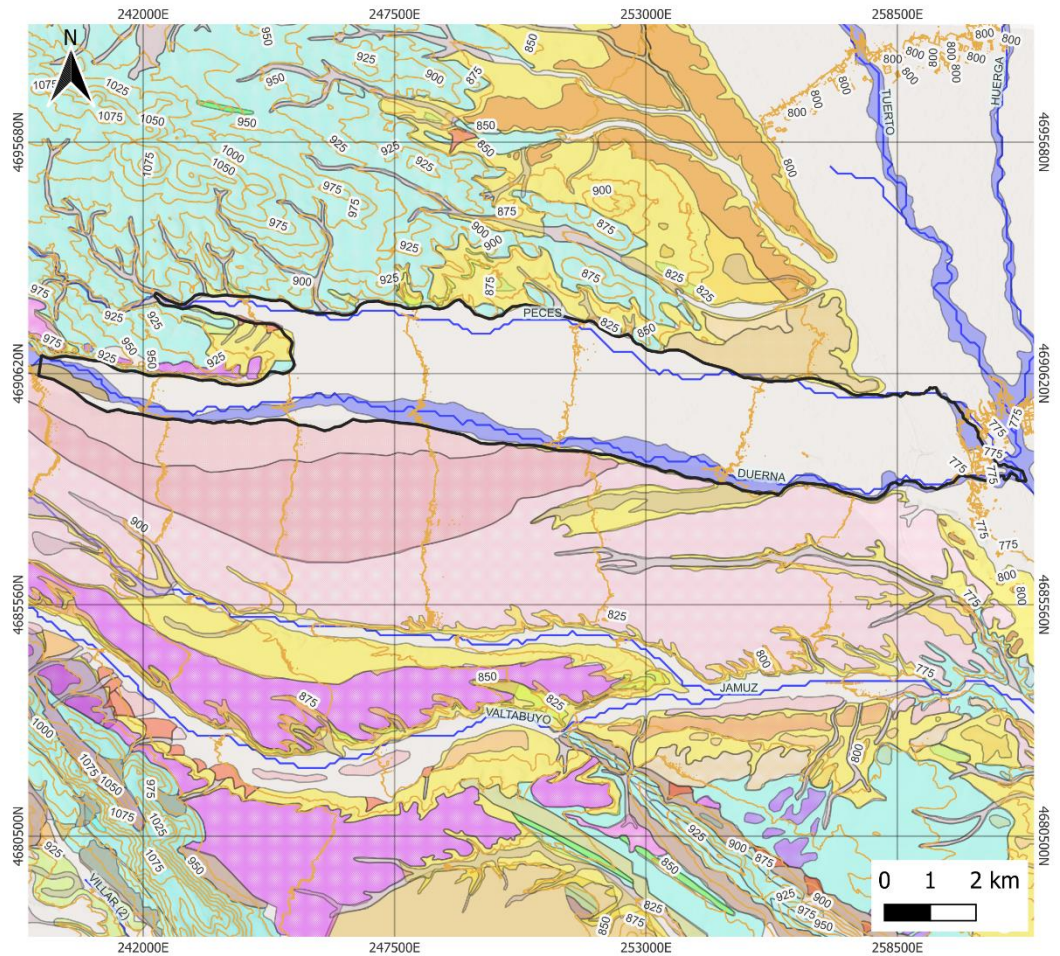
Como contexto geológico general, la comarca se ubica en la Submeseta septentrional, al borde noroeste de la cuenca del Duero. Geográficamente, destaca por su morfología predominantemente plana, con dos alineaciones principales: al suroeste, Las Lomas de Villar y Sierra del Pinar, que son una prolongación oriental de la Sierra del Teleno. Aquí se encuentran las cotas más elevadas de la comarca, con 1.240 y 1.216 metros en el Cerro de Valdelacasa y Peña del Ave. Al sureste, la Sierra de Casas Viejas constituye otra alineación significativa.

El resto de la región se distingue por amplias terrazas fluviales bien conservadas, donde se inserta la red hidrográfica. Esta red está influenciada más por la historia geológica de la zona que por la distribución de las distintas litologías. Aunque la red secundaria depende de la disposición actual de sierras y áreas bajas, los cauces principales atraviesan las alineaciones de relieve elevado mencionadas anteriormente. En el noreste, cerca de La Bañeza, el río Órbigo, que viene del norte, recibe al río Tuerto, con el que comparte una extensa llanura aluvial, y al río Duerna, que sigue un curso de este a oeste y luego cambia hacia el sureste. Los ríos Jamuz y Eria, que nacen en las estribaciones de la Sierra del Teleno, también cambian de dirección de manera similar.

Desde un punto de vista geológico, los relieves más destacados están compuestos por areniscas, pizarras, cuarcitas y calizas paleozoicas. Las áreas planas están mayoritariamente cubiertas por sedimentos terciarios que rellenan el relieve pre-Mioceno, modelados y cubiertos

junto con los depósitos cuaternarios que se encuentran sobre los del Paleozoico. En lo referente a los materiales paleozoicos, la comarca se encuentra en la Zona Asturoccidental Leonesa (LOZTE 1945, JULIVERT, et al. 1972). Aquí se presentan materiales característicos de los dominios del Navia, Alto Sil y Truchas (PEREZ-ESTAUN, 1978), los cuales están tectónicamente afectados por cabalgamientos que han sido cartografiados en esta zona.

Mapa geológico zona de estudio



Legenda		Simbología	
Holoceno			Límite acuífero superficial interfluvial Peces-Duerna.
	Llanura aluvial		Ríos
	Llanura de inundación. Holoceno		Curvas de nivel
	Depósitos antrópicos. Holoceno		
	Conos de deyección y aluviales. Holoceno		
	Conos de deyección. Holoceno		
	Depósitos aluvial-coluviales. Holoceno		
	Depósitos coluviales. Holoceno		
Pleistoceno			
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Orbigó. Pleistoceno Superior		
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Duerna-Jamuz-Eria. Pleistoceno Superior		
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Duerna-Jamuz-Eria. Pleistoceno Superior		
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Duerna-Jamuz-Eria. Pleistoceno Superior		
	Conglomerados, arenas, y limos fluviales. Pleistoceno medio.		
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Duerna-Jamuz-Eria. Pleistoceno Medio		
	Conglomerados, arenas y fangos. Abanico aluvial de Las Pradizas. Pleistoceno Medio		
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Duerna-Jamuz-Eria. Pleistoceno Inferior		
	Conglomerados, arenas y limos. Terrazas. Sistema de Duerna. Pleistoceno Inferior		
Mioceno			
	Conglomerados de clastos de cuarcita, cuarzos y pizarras. (Valduerna). Mioceno Superior		
	Fangos, fangos arenosos, arenas fangosas y arenas. Concreciones carbonatadas. Mioceno Medio		
	Arenas, arenas fangosas y fangos. (S. de Nogarejas). Mioceno Medio		
	Arenas y arenas fangosas. (S. de la Valduerna). Mioceno Medio		
Ordovícico			
	Areniscas, cuarcitas y pizarras. (Serie de transición). Ordovícico Medio		
	Cuarcitas. (serie de Los Cabos). Ordovícico Inferior		
Cámbrico			
	Cuarcitas y pizarras. (Serie de los Cabos). Cámbrico Superior		
	Areniscas, pizarras y dolomías. (F. Cándana-Herrería). Cámbrico Inferior		
	Calizas y dolomías (Form. Vegadeo) Cámbrico Inferior		

Figura 3 Mapa geológico modificado de hoja 231 (La Bañeza) y 193 (Astorga) del MAGNA.

2.2.1 Geología Local

Como contexto geológico específico, también basado en (IGME, 2009), la zona se denomina sistema de la Valduerna. Los sedimentos se originarían del depósito dejado por el llamado Paleoduerna según HERAIL (1978), y también por el que se podría denominar Paleojamuz, al menos hasta los relieves de Casasviejas.

Por el norte, el área de estudio está delimitado y separados por relieves paleozoicos (Serie de los Cabos) del sector de Bustos-Tejados, definido en la Hoja n.º 193 Astorga. Al suroeste, también está limitado por relieves paleozoicos (Serie de los Cabos y Serie de Transición), que lo separan del sistema de Nogarejas. Sin embargo, existe una estrecha franja de comunicación entre ambos en las cercanías de Pobladura de Yuso. Hacia el este, se une con el sistema de Carrizo-Benavides cerca de La Bañeza.

Su trazado cartográfico es relativamente complejo debido a la presencia de paleorrelieves y al recubrimiento cuaternario. Los mejores más nítidos se observan en los escarpes proporcionados por los ríos Duerna, Jamuz, Valtabuyo y Eria. Para su descripción, se diferencian dos partes: la formada por los depósitos inferiores, que ocupan la mayor extensión, y la de los depósitos superiores, que están restringidos a la esquina noroccidental.

2.3 Hidrología

El área de estudio, está delimitada principalmente de sur a norte por los ríos Duerna y Peces (Figura 4), ocupando una superficie total cultivable de 3.195 ha. Como se puede observar en la figura 4, el río Duerna se encuentra al sur del área de estudio y recoge las aguas de la vertiente del lado norte de la sierra del Teleno y parte de la cara este de los Montes de León (CHD, 2021). Con una longitud de 50,84 km y una superficie cuenca vertiente de 298,13 km² (CHD, 2016), el río Duerna es el principal colector de aguas de la comarca y juega un papel crucial en la provisión de recursos hídricos tanto para el riego, como también para el abastecimiento de las poblaciones locales. Este río, de régimen pluvial mediterráneo, varía significativamente a lo largo del año según la estacionalidad, siendo verano los meses más críticos por la escasez de precipitaciones y el aumento de la demanda hídrica para el riego.

El río Peces se ubica al margen izquierdo del río Duerna, se nutre principalmente de las derivaciones de este río en las localidades de Destriana y Castrillo de La Valduerna a través de las zayas. Este río culmina su recorrido en la confluencia con el río Tuerto. Tiene una longitud de 28,99 km y una superficie cuenca vertiente de 101.9 km² (CHD, 2016). Es importante destacar que las zayas, son fundamentales para la distribución del agua a los campos de cultivo, asegurando un uso eficiente del recurso hídrico en la comarca.

Mapa hidrología de la zona de estudio

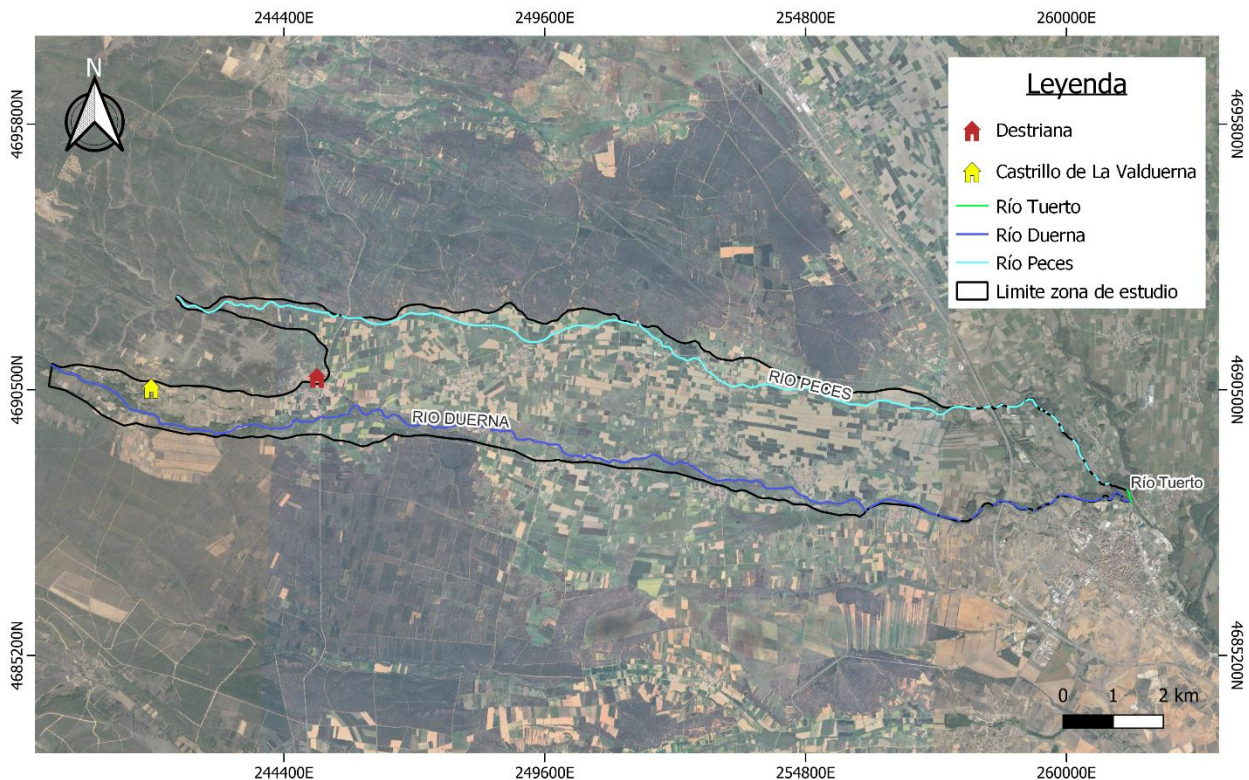


Figura 4. Mapa de la zona de estudio con ubicación de los principales ríos y localidades importantes.

2.4 Hidrogeología

En base a la caracterización geológica e hidrogeológica regional de la zona de estudio (CHD, 2021), los materiales geológicos antiguos actúan como acuíferos de baja permeabilidad debido a su estructura esquistosa y la presencia de fracturas. Los depósitos terciarios, que se distribuyen de manera horizontal en el borde de la cuenca, conservan los relieves geológicos antiguos y forman acuíferos principalmente en capas arenosas con configuraciones geométricas de canales.

La recarga de agua ocurre debido a la ubicación estratégica de estos depósitos terciarios entre las elevaciones geológicas antiguas, que delimitan varias cuencas hidrográficas alimentadas por diferentes ríos. Los pozos artesianos asociados a estos depósitos terciarios muestran caudales observados en pruebas de bombeo que pueden alcanzar hasta 20 l/s o más.

En los depósitos cuaternarios, la composición litológica y la presencia de capas arcillosas que parcialmente impermeabilizan el sustrato facilitan el almacenamiento de agua, aunque la falta de conexión entre los diferentes niveles impide acumular grandes volúmenes. La recarga de estos acuíferos se realiza principalmente a través de los propios depósitos. Las áreas más propensas a la extracción intensiva de agua son las llanuras aluviales y las terrazas bajas, donde se utilizan pozos y sondeos para extraer agua debido a su conexión directa con los ríos

y las aguas subterráneas, permitiendo un bombeo continuo y suficiente, como ocurre en el acuífero Peces-Duerna.

El área de estudio se encuentra ubicada, administrativamente hablando, dentro de la masa de agua Aluvial del Órbigo. En esta masa existen dos dominios hidrogeológicos separados: un acuífero superficial, correspondiente a los depósitos cuaternarios, y un acuífero profundo, que se identifica con los depósitos terciarios. El presente trabajo tiene como objeto de estudio el acuífero superficial denominado acuífero interfluvial Peces-Duerna. Se trata de un acuífero libre de 43 km² con flujo de oeste a este, limitado al norte por formaciones principalmente sedimentarias del Mioceno y Plioceno. En áreas donde el acuífero terciario descarga, los aluviales actúan como receptores del flujo subterráneo del Terciario Detrítico, los recursos de este acuífero superficial están vinculados a los aportes hídricos de los ríos y la recarga de la lluvia y la derivada de riegos superficiales.

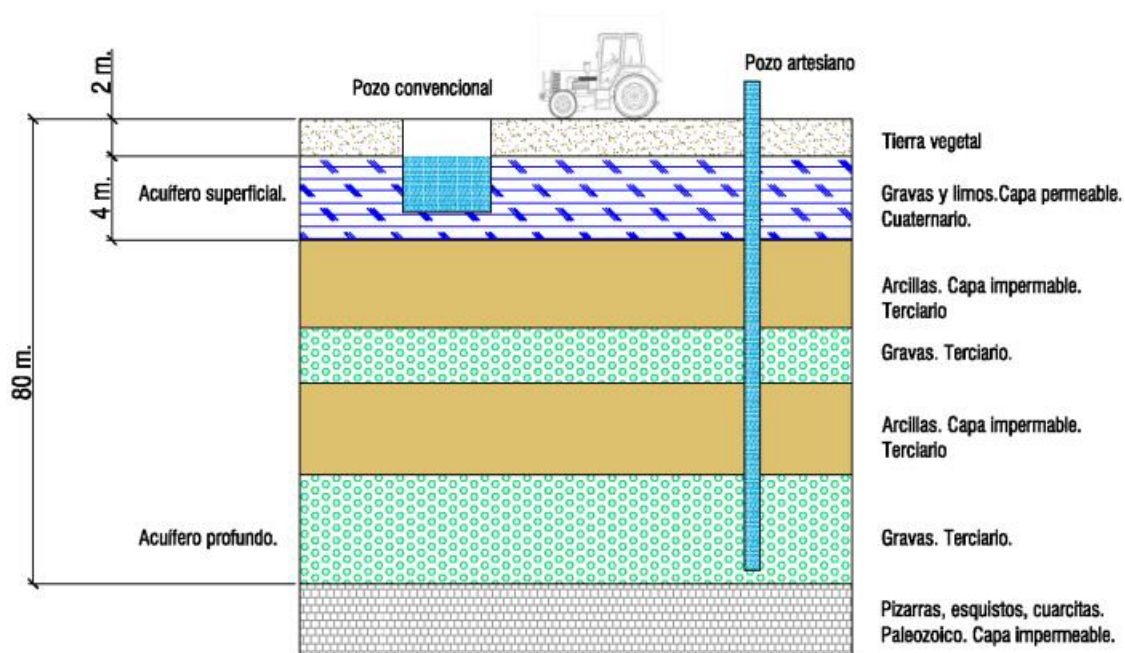


Figura 5. Esquema hidrogeológico de la zona de estudio y ubicación del acuífero en estudio (acuífero superficial en la figura). Obtenido de CHD, 2021.

Los pozos que explotan este acuífero aluvial tienen profundidades típicas de 2 a 10 m, con caudales que a menudo superan los 25 l/s. El acuífero Peces-Duerna constituye la principal fuente de agua subterránea en la zona de estudio, gestionada a través de una red de pozos bien conocida.

Según la bibliografía el acuífero objeto de estudio comprende un área estimada de 44 km² y tiene una permeabilidad elevada, con valores del orden de 10 – 100 m/día, mientras que la porosidad es de aproximadamente 11% (CHD, 2021). Teniendo en cuenta el valor medio de espesor del acuífero de 6 m se puede calcular un potencial de almacenamiento saturado de agua de 29.040.000 m³ utilizando la relación:

Almacenamiento saturado = Porosidad efectiva x Espesor del acuífero x Área superficial, donde se han empleado los valores mencionados.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

Para comprender mejor la metodología empleada se ha construido un diagrama de flujo dividido por etapas, donde se describe el proceso de trabajo de cada una de ellas (Figura 6). A continuación, se desglosará cada etapa.

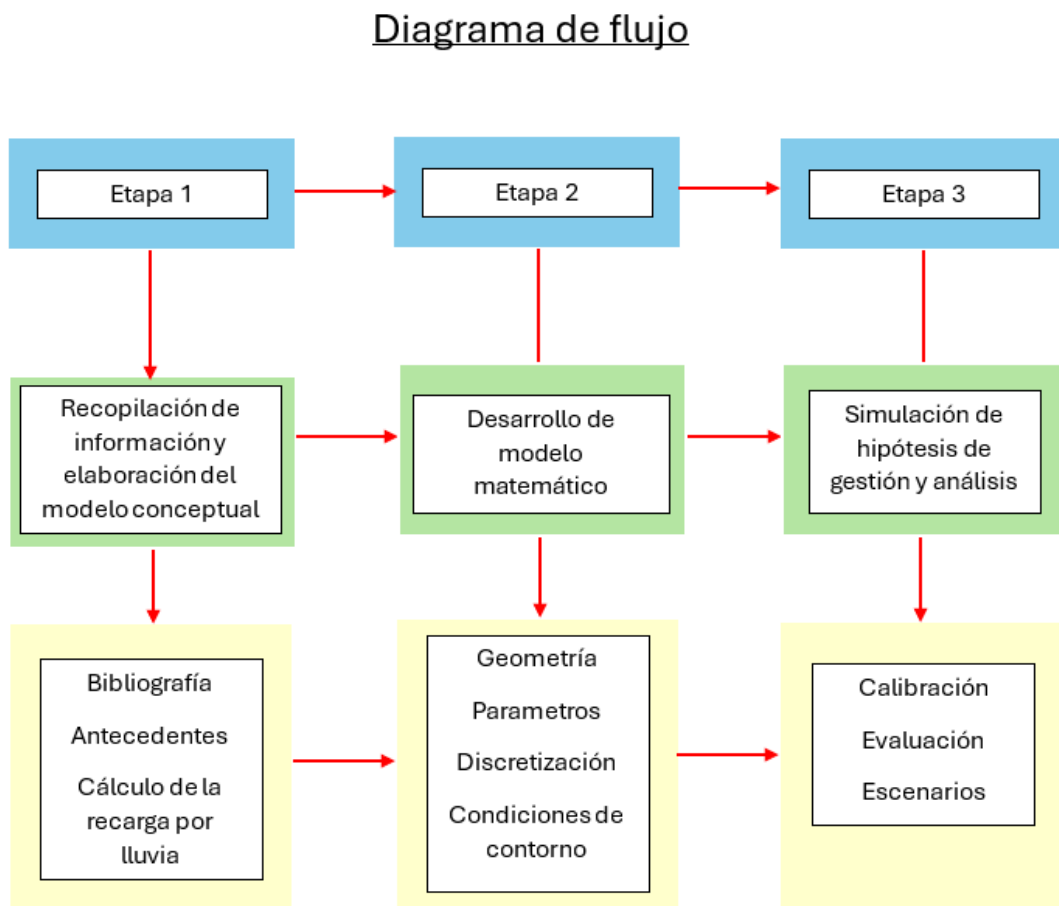


Figura 6. Esquemización de la metodología empleada este Trabajo de Fin de Máster.

3.1 Primera etapa

En primer lugar, se realizó una recopilación bibliográfica, de estudios previos y antecedentes. El trabajo "Caracterización geológica e hidrogeológica preliminar de los recursos hídricos del sistema hidrológico de la Valduerna (León)" (CHD, 2021), fue clave para el entendimiento general del acuífero aluvial Peces-Duerna, del cual se obtuvo toda la información relacionada al ensayo de infiltración controlado entre el 15 y el 30 de marzo del año 2020.

Los datos climáticos se obtuvieron a través de una herramienta desarrollada por el Instituto Geológico y Minero de España (Husillos et al., 2022) que permite leer datos directamente de la web de La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y la Dirección General del Agua (DGA), y extraer las series de pluviometría y temperatura en puntos distribuidos dentro de la zona de estudio espaciados a una distancia de 5 km. Para la utilización de esta herramienta

fue necesario adquirir conocimientos básicos del lenguaje en el que está desarrollada, Python, y de la plataforma en la que se ejecuta, Jupyter Notebook. Esta herramienta es muy útil en cualquier estudio hidrogeológico o hidrológico ya que permite obtener datos desde el año 1950 hasta el año 2020 en toda la Península Ibérica. La ventaja principal de esta herramienta es que se pueden usar directamente los datos diarios interpolados por la AEMET en una malla que tiene espaciado de 5 km, y que, con la ayuda de un script, estas series diarias se descargan en un fichero ASCII de fácil lectura (extensión .CSV). Para la zona de estudio, existen 8 nodos de la malla de interpolación de la AEMET, y por lo tanto, las series temporales de lluvia y temperatura descargadas fueron 8. Esta serie histórica de datos climáticos permite obtener los valores medios climáticos a tener en cuenta para el cálculo de la recarga en el periodo estacionario. Para validar estos datos climáticos, se obtuvieron datos medidos del periodo de estudio (entre los años hidrológicos 2010-2011 y 2019-2020, descargados de la web del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), de las estaciones que se podía obtener datos de precipitación más cercanas a la zona de la Valduerna: "Hospital de Órbigo" a 14.5 km y "Quintana del Marco" a 10.5 km de la zona de estudio.

Una vez validados los datos de precipitación y temperatura, se utilizó el software TRASERO (Aljibe Consultores, 2013), que permite realizar tratamiento de series temporales y calcular el balance del agua diario. Este cálculo se realizó para la serie histórica completa entre los años hidrológicos 1952-1953 y 2019-2020, ya que 1952 es el primer año con datos completos. De esta forma se obtiene la serie temporal diaria de recarga al acuífero por infiltración de lluvia en 8 nodos con series temporales descargadas de la AEMET.

El método utilizado por el software TRASERO considera que el suelo es un único depósito que produce un excedente cuando se llena, que pasa a formar parte del agua superficial y subterránea en función de la naturaleza del terreno. Se asume que el suelo tiene capacidad de retención de agua en el suelo. Esta agua se agrega o se resta del suelo, constituyendo la variación de la reserva de agua en el suelo (ΔRU), y depende de si la precipitación (P), es mayor o menor que la evapotranspiración potencial (EPT), entendida como la cantidad máxima de agua que se puede volver a la atmósfera por evaporación o transpiración cuando existe suficiente disponibilidad en el suelo y el desarrollo vegetal es óptimo.

No siempre hay suficiente disponibilidad de agua para satisfacer la EPT , produciéndose entonces la evapotranspiración real (ETR). Existen dos posibles situaciones:

- I. Si $P \geq ETP$, $ETR = ETP$ y el agua que no se somete a la evapotranspiración contribuye a aumentar el agua en el suelo ($\uparrow RU$) hasta un límite máximo (RU_{max}) marcado por la capacidad de campo (CC). En ese caso, superada la CC se produce un excedente denominado lluvia útil (LLU)
- II. Si $P < ETP$, la ETR estaría determinada por la precipitación y por la disponibilidad de agua en el suelo, donde se produciría un déficit ($\downarrow RU$) hasta un mínimo marcado por el punto de marchitez permanente (PMP). En este caso $ETR \leq ETP$, pudiendo RU llegar a cero si no existe suficiente agua para satisfacer la ETP y se alcanza el PMP .

La ecuación (1) define la aritmética del balance del agua en el suelo para cada periodo de tiempo i :

$$P_i = ETR_i + LLU_i + \Delta RU_i \quad (1)$$

donde:

P_i : precipitación (mm)

ETR_i : evapotranspiración real (mm)

LLUi: lluvia útil o excedente de agua en el suelo (mm).

ΔRU_i : variación de la reserva de agua del suelo (mm)

La ETP puede obtenerse por numerosos métodos empíricos. En este trabajo se aplica la ecuación de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985), aplicando la adaptación del parámetro C (ecuación 2) realizada por Vanderlinden et al. (2004) para la cuenca del Guadalquivir. Se requiere para ello datos de las temperaturas máxima y mínima del aire y de la radiación extraterrestre, que es una constante que depende de la latitud y el día del año (Samani, 2000). Para un periodo de tiempo i , se aplica la siguiente expresión (2):

$$ETP_i = C \cdot (t_{med} + 17.78) \cdot R_0 \cdot (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad \text{siendo} \quad C = 0.0005 \frac{t_{med}}{t_{max} - t_{min}} + 0.00159 \quad (2)$$

donde:

t_{med} : temperatura media diaria (°C)

t_{max} : temperatura máxima diaria (°C)

t_{min} : temperatura mínima diaria (°C)

R_0 : radiación solar extraterrestre (MJ m⁻² día⁻¹)

El balance se realiza según los siguientes criterios (Figura 7):

- La ETR será siempre igual o inferior a la ETP.
- El volumen de agua almacenado en el suelo tiene un límite (RU_{max}), que depende de la naturaleza y espesor del suelo. Este límite equivale a la capacidad de retención del agua en el suelo (CRAS).
- El primer término a ser cubierto en el balance es siempre la ETR, siempre y cuando exista precipitación y/o agua suficiente almacenada en el suelo como para cubrirla. Una vez satisfecha la ETR, se incrementan las reservas (ΔRU) hasta el límite impuesto por la CRAS.
- Una vez cubiertas todas las demandas anteriores, el agua sobrante o excedente es la lluvia útil (LLU), es la que produce recarga y escorrentía.

A pesar de que el método del balance del agua en el suelo fue inicialmente diseñado para un paso de tiempo mensual, para el estudio detallado de estimación de la recarga en la zona de estudio, se considera fundamental utilizar un paso de tiempo a nivel diario, debido a que a nivel mensual se produce un retraso entre la precipitación y la escorrentía especialmente en cuencas con poca capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas y con meses consecutivos de déficit de agua en el suelo, lo que provoca una subestimación de la recarga en los meses de estiaje (Alley, 1984).

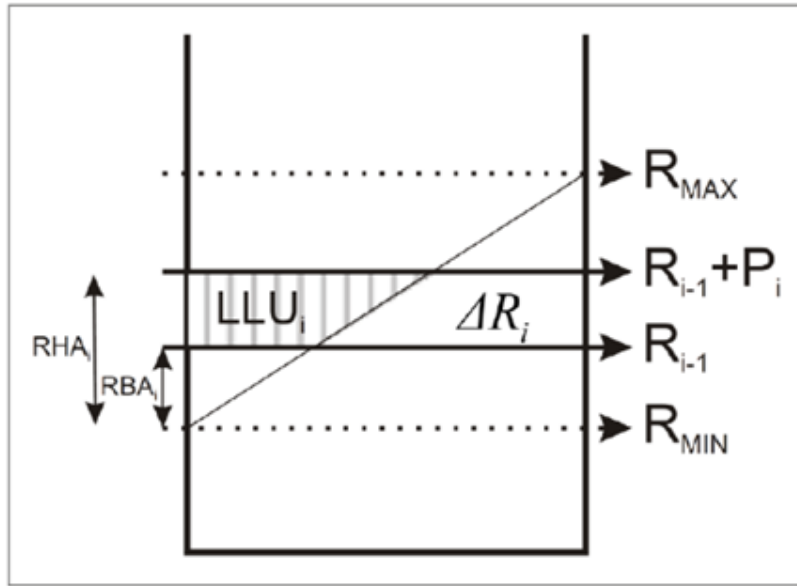


Figura 7. Esquema de la producción de lluvia útil e incremento de la reserva a partir de la precipitación. Fuente tomado de Aljibe Consultores, 2013.

Se considera un intervalo de RU dentro del cual se empezaría a producir LLU, denominado (R_{min} y R_{max}). Esto se ajusta mejor a lo que ocurre en la naturaleza. El método consiste en considerar que el excedente de agua de precipitación se almacena en el suelo (R) de dos maneras. Si en el periodo anterior, el agua que se ha almacenado (R_{i-1}) es inferior a un determinado valor (R_{min}), entonces el excedente se acumula en su totalidad. Si está comprendido entre dos valores denominados R_{min} y R_{max} , el excedente se divide, una parte aumentará la reserva del suelo (RBA) y la otra irá destinada a la producción de LLU (RHA). Como se puede deducir, el término R_{max} es equivalente a la CRAS. Si $R_{min} = R_{max}$ el balance se realiza según el método tradicional de Thornthwaite. Esta repartición se realiza según la siguiente ecuación (3):

$$LLU_i = \max(R_{i-1} + P_i - R_{MAX}, 0) + \Delta R_i \frac{(2RBA_i + \Delta R_i)}{2(R_{MAX} - R_{MIN})} \quad (3)$$

donde:

$$RBA_i = \max(R_{min}, R_{i-1}) - R_{min}$$

$$RHA_i = \min((R_{i-1} + P_i), R_{min}) - R_{min}$$

$$\Delta R_i = \max(0, (RHA_i - RBA_i))$$

El aumento de la reserva (ΔR_i) es igual:

$$\Delta R_i = EX_i - LLU_i \quad (4)$$

Una vez obtenida LLU, esta se reparte entre escorrentía superficial (ESC) y recarga (INF) en tránsito hacia el acuífero (ecuación 5).

$$INF_i = LLU_i - ESC_i \quad (5)$$

donde:

INF_i: Infiltración en tránsito al acuífero o Recarga (mm)

ESC_i: Escorrentía Superficial (mm)

A la hora de descomponer (LLU) en las fracciones de infiltración (INF) y escorrentía (ESC), se ha seguido el procedimiento propuesto por el Soil Conservation Service de Estados Unidos (MOPT, 1992). Este método considera que la escorrentía superficial generada por LLU comienza a producirse cuando un evento lluvioso excede un determinado valor umbral de escorrentía (P_0). De forma general, cuanto menos permeable sea el suelo, menos densa la vegetación y mayor la pendiente, menor será el valor de P_0 . Por el contrario, P_0 tomará valores elevados cuanto menos propicias sean las condiciones para generar escorrentía. La generación de escorrentía a partir de los excedentes se rige por la ecuación 6:

$$ESC_i = \frac{(LLU_i - P_0)^2}{LLU_i + 4P_0} \quad (6)$$

3.2 Segunda etapa

Para la realización del modelo numérico de flujo del acuífero se utilizó la versión más actualizada del software desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGG) MODFLOW, MODFLOW6 (Langevin et al. 2017) utilizando la interfaz gráfica también elaborada por el USGS, ModelMuse (Winston R. B., 2019). Para desarrollar el modelo numérico se divide el acuífero en una cuadrícula de celdas. MODFLOW resuelve numéricamente las ecuaciones de flujo y balance de agua subterránea en cada celda activa del modelo.

Para calcular estos flujos, MODFLOW necesita conocer las condiciones y piezometría iniciales en todas las celdas.

Primero se desarrolló, ejecutó y calibró el modelo en estado estacionario, es decir, con todas las entradas y salidas al acuífero constantes en el tiempo. A continuación, se procedió a utilizar el resultado del estacionario para construir el modelo transitorio con un paso de tiempo diario durante el periodo comprendido entre los años hidrológicos 2010-2011 y 2019-2020. Se considera que un periodo de estudio de 10 años es adecuado para que el modelo no arroje errores numéricos importantes en el periodo 2020 en el que se tienen datos de calibración mediante 62 piezómetros de medición. Además, permite estudiar un periodo con una variabilidad climática representativa de épocas secas y húmedas, lo cual permite comprobar su aplicabilidad como herramienta de gestión.

Las condiciones de contorno utilizadas para la ejecución del modelo fueron simuladas con los siguientes paquetes, tal y como se denominan en el algoritmo de MODFLOW;

- RIV, condición de contorno de río: con el río Peces y Duerna.

- RCH, condición de contorno de recarga: con la recarga por infiltración natural y por zayas.
- WELL, condición de contorno de pozo: extracción por bombeo en un total de 73 pozos.

Las estimaciones de las extracciones por bombeo han sido realizadas por técnicos del IGME, ya que los consumos de cada pozo son desconocidos. Para realizar esta estimación se ha utilizado el mapa de usos del suelo de Castilla y León y los valores de extracciones totales por cultivo que se encuentran en el Plan Hidrológico. Del mapa de usos del suelo se han filtrado únicamente los cultivos mayoritarios de la zona. Después, se ha dividido el área del acuífero en polígonos de Thiessen utilizando la ubicación de los pozos inventariados (Figura 8) como los centros de los polígonos. Con una herramienta GIS se ha calculado el área que ocupa cada uno de los cultivos principales en cada polígono de Thiessen y se ha calculado el consumo para cada uno de los polígonos por separado.

Mapa de distribución espacial de pozos

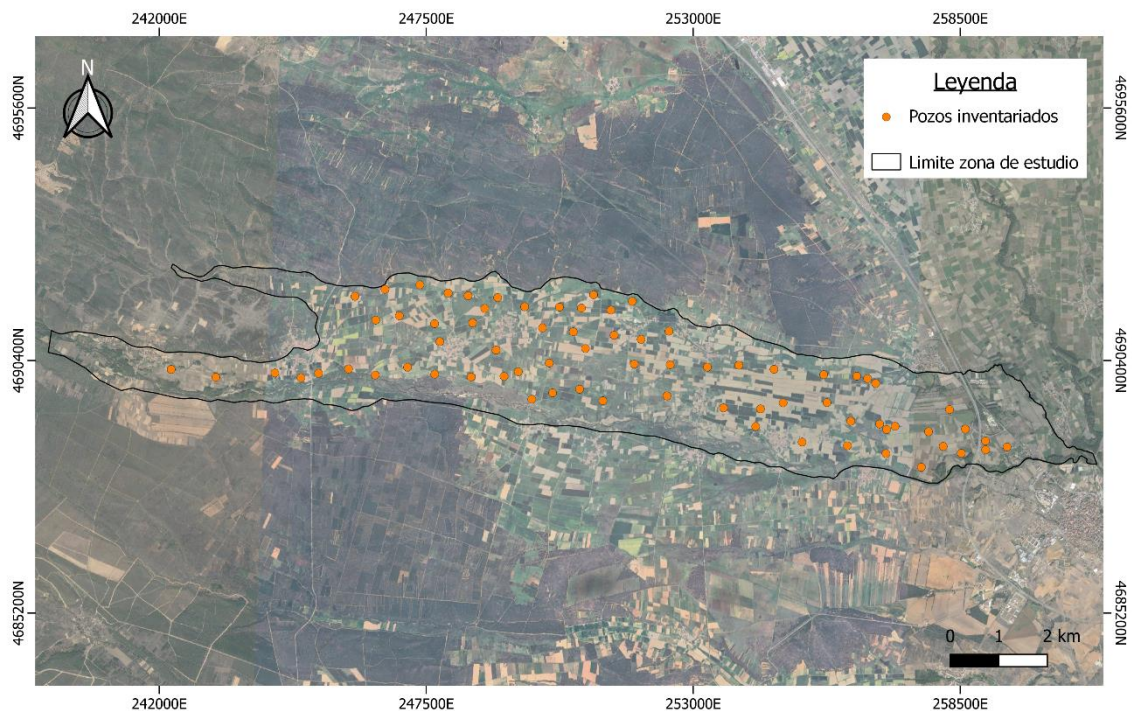


Figura 8. Distribución espacial de pozos de extracción inventariados.

Utilizando la distribución temporal de los riegos, indicada por los agricultores para cada cultivo, y el consumo anual, de cada pozo calculado según lo explicado en el párrafo anterior se han distribuido temporalmente las extracciones producidas en cada pozo para todo el periodo de estudio.

Al procesar los datos de entrada (inputs), el modelo da como resultado importantes variables para analizar. Una de ellas es la piezometría, es decir las elevaciones del nivel piezométrico en cada celda del modelo calculadas para cada paso de tiempo. Eso es clave para evaluar la distribución espacial y temporal del agua subterránea en el acuífero, ya que permite visualizar la evolución de las direcciones de flujo dentro del mismo, identificar zonas de recarga y

descarga, los posibles impactos ante actividades antropogénicas y validar el modelo. Otra salida es la que describe las tasas de flujo de agua subterránea entre distintos elementos del modelo, para determinar los flujos entrantes y salientes, analizar los intercambios con ríos o pozos, etc.

Adicionalmente se ha realizado una estimación del período de renovación (RP, por sus siglas en inglés), que expresa la relación entre la capacidad total de almacenamiento de un acuífero y su recarga (S/R; Margat et al. 2006). Aquí se propone calcular dos valores extremos posibles para el RP: el primero utilizando el valor mínimo de recarga y el máximo de capacidad total de almacenamiento teniendo en cuenta todo el espesor del acuífero y su porosidad, y el segundo utilizando el valor máximo de recarga y el mínimo de capacidad total de almacenamiento.

Por último, se utilizó una herramienta de post-procesamiento llamada MODPATH en conjunto con MODFLOW. Este código permite realizar análisis de movimiento de partículas en el acuífero estudiado, siendo su principal función el cálculo de las trayectorias y los tiempos de tránsito de las partículas de agua que se mueven con flujo a través del acuífero. Todos estos cálculos se realizan, a partir de los resultados del modelo de flujo.

3.3 Tercera etapa

Como último paso del TFM, se realizó el análisis de los resultados del modelo construido y se simularán las hipótesis de gestión planteadas por los regantes. Para facilitar el análisis de los resultados se describen a continuación las simulaciones realizadas:

- Simulación estacionaria histórica sin intervención antrópica.
- Simulación transitoria con zayas en funcionamiento comprendido en el periodo de los años hidrológicos 2010-2011 a 2019-2020, que se ha calibrado con el ensayo de infiltración controlada realizado del 15 al 30 de marzo del 2020
- Simulación escenario de gestión 1: se considera la adición de una zaya más había el este de las que ya existen.
- Simulación escenario de gestión 2: se amplía el funcionamiento de las zayas desde el mes de enero.
- Se analizarán estos comparando el cambio en el balance del acuífero y los niveles piezométricos con respecto a la simulación transitoria calibrada en la que no se tiene en cuenta el ensayo de recarga gestionada, para así tener en cuenta la situación real de funcionamiento de las zayas a partir del 1 de abril.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Cálculo de la recarga por infiltración de lluvia

En primer lugar, se procedió a validar los datos interpolados por la AEMET a nivel diario en la zona de estudio utilizando las dos estaciones más cercanas de la red SIAR: Quintana del Marco y Hospital de Órbigo. En las Figura 9 y 10, se han comparado gráficamente los valores medios mensuales medidos en las estaciones con el promedio mensual de los 8 valores correspondientes a los 8 nodos de la interpolación de la AEMET, que cubren toda la zona de estudio.

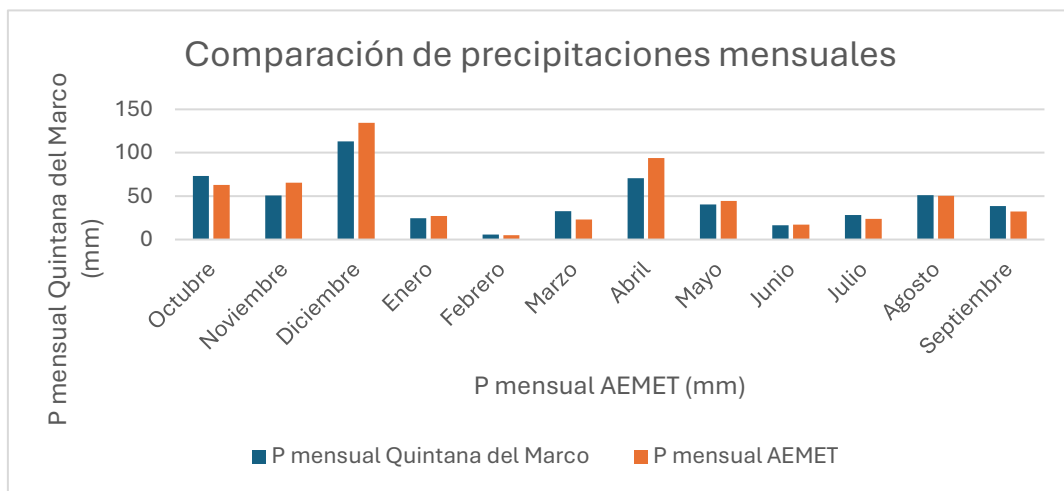


Figura 9. Comparativa los valores interpolados por AEMET y de los medidos en la estación meteorológica de Quintana del Marco en el año hidrológico 2019-2020.

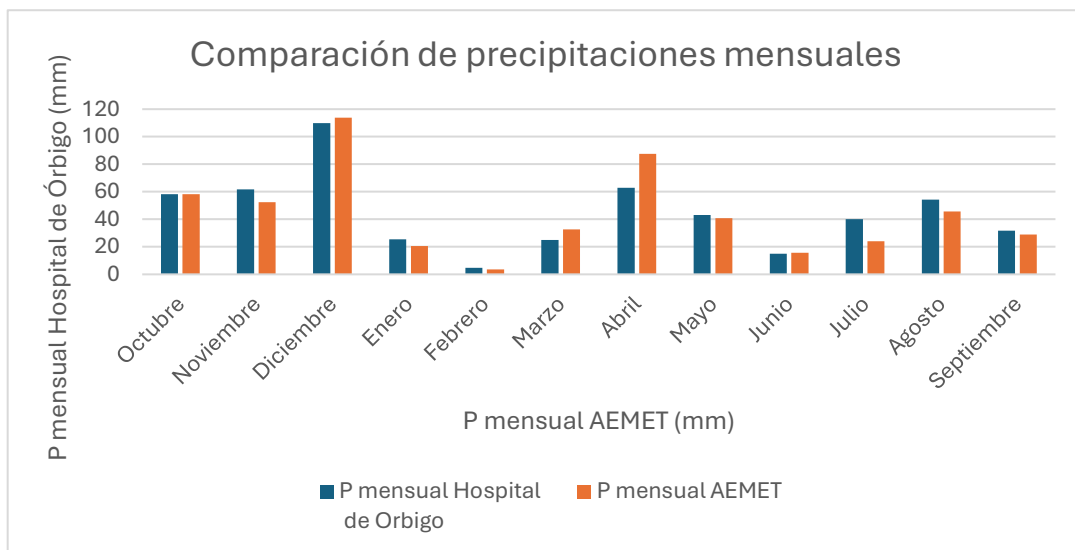


Figura 10. Comparativa los valores interpolados por AEMET y de los medidos en la estación meteorológica de Hospital de Órbigo en el año hidrológico 2019-2020.

El coeficiente de correlación obtenido de comparar valores observados y valores medidos para la estación Quintana del Marco es de 0.90 y el de la estación Hospital de Órbigo es 0.94. Esta significativa correlación entre los valores obtenidos por la AEMET y las estaciones cercanas a la comarca de la Valduerna sustenta la clara similitud observada en la comparación gráfica, y por tanto válida que podamos usar estos valores en el presente estudio.

Para calcular la infiltración con el software de tratamiento de series temporales, TRASERO, se comienza mediante los valores diarios de la precipitación y de las temperaturas máxima y mínima. Tal y como se ha explicado en el capítulo 3. Metodología. El programa utiliza estos datos para estimar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo después de considerar las pérdidas por evapotranspiración. TRASERO aplica las fórmulas basadas en el balance hídrico, incorporando variables como la capacidad de retención del suelo, la evapotranspiración potencial y la precipitación efectiva.

El proceso comienza ingresando los datos climáticos, con los que calcula la evapotranspiración potencial utilizando en este caso el método de Hargreaves. Luego, se determina la fracción de precipitación que excede las necesidades de evapotranspiración y no es retenida superficialmente, estimando así la infiltración diaria en la serie de tiempo. Este valor entonces refleja la recarga al acuífero y es fundamental para el modelamiento del mismo.

Los valores de infiltración obtenidos se han calculado con distintos valores de capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS) 25, 50, 100 y 150, esto debido a la versatilidad del área en estudio y la falta de información de este parámetro. Finalmente se decidió utilizar como recarga al acuífero a introducir en el modelo, en cada uno de los 8 nodos, el promedio diario de las 4 series temporales obtenidas con cada valor de CRAS. La Figura 11 muestra para los distintos valores de CRAS la comparación de la infiltración acumulada anual de la infiltración calculada mediante TRASERO utilizando los valores de precipitación interpolados por la AEMET y la calculada con las series de precipitación medidas en las estaciones meteorológicas.

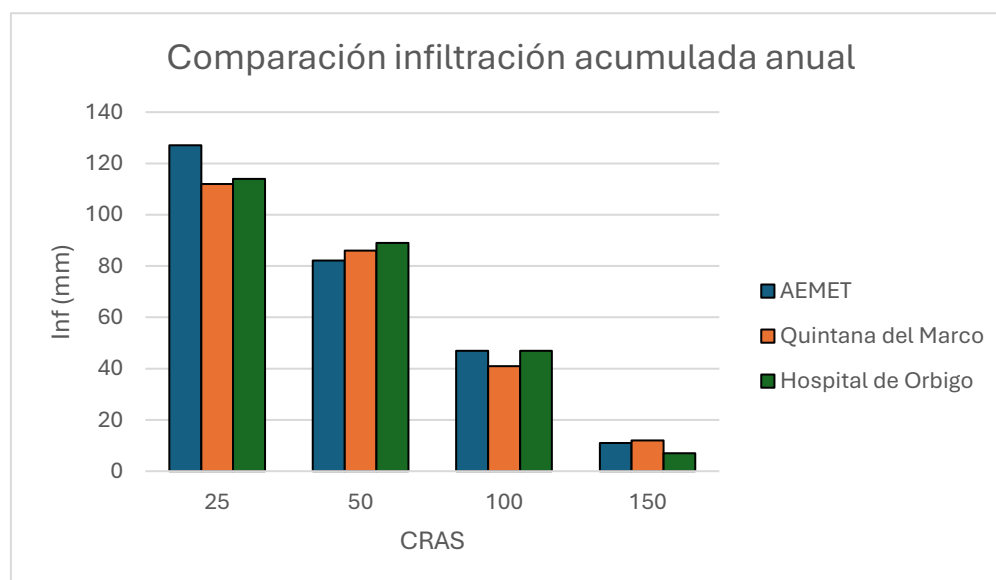


Figura 11. Gráfica comparativa con los distintos valores de capacidad de retención de agua en el suelo utilizados desde los años 1952 a 2020.

4.2 Modelo matemático numérico de flujo subterráneo

4.2.1 Discretización y propiedades del modelo

La discretización espacial realizada se puede visualizar en la Figura 12, donde se ha incluido un corte E-O (parte inferior de la Figura 12; línea verde en el mapa) y otro N-S (parte derecha de la Figura 12; línea azul en el mapa). La malla del modelo se corresponde a una discretización de una sola capa de celdas cuadradas de 100x100 m, dando como resultado un mallado de 216 columnas x 45 filas. El espesor del acuífero se ha calculado teniendo en cuenta el modelo digital del terreno y la superficie que representa el muro de los depósitos aluviales, según información aportada por los técnicos del IGME.

En la Figura 12 se han resaltado de color blanco todas las celdas activas. Las inactivas (de color rojo) son aquellas que se encuentran por fuera del límite del acuífero. Se definió el acuífero como un acuífero libre, en MODFLOW esto se traslada a considerar la capa como "convertible" (Winston R. B., 2019)

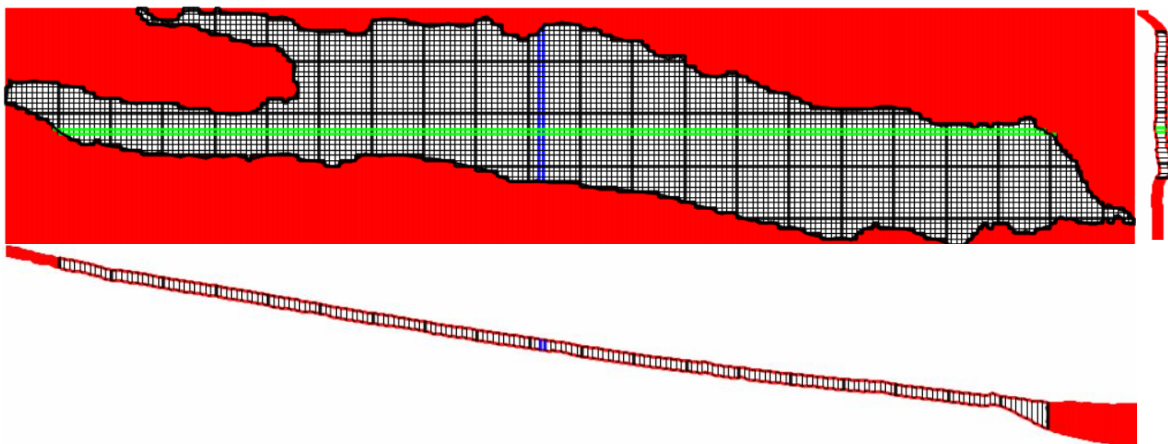


Figura 12. Discretización espacial realizada para el modelo.

Los parámetros hidráulicos se obtuvieron de CHD (2021). Se considera que el acuífero es homogéneo e isótropo horizontalmente, y anisótropo verticalmente. La conductividad hidráulica horizontal es de 50 m/d ($K_x = K_y$) y la vertical es $K_z = K_x/10$.

Tal y como se ha explicado en el capítulo 3. Metodología. Para la discretización temporal se utilizó un paso de tiempo diario y se simularon dos periodos: permanente y transitorio. En el caso del modelo permanente, se trabajó con un solo periodo que consta de 365 días. Para el régimen transitorio, se consideraron diez periodos anuales, siendo el primer periodo utilizado el año hidrológico 2010-2011 y el último el 2019-2020.

4.2.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en los modelos numéricos hidrogeológicos ayudan a establecer las interacciones entre el acuífero y su entorno. Las condiciones de contorno utilizadas en el

presente modelo son: el paquete RIV que incluye ríos y zayas, el paquete RCH que incluye la recarga por infiltración y el paquete WELL que incluye las extracciones por bombeo. Estas condiciones de contorno se detallan a continuación.

Río (paquete de MODFLOW RIV)

La red de ríos que interactúa con el acuífero es esencial para la modelización y el posterior análisis del balance final, por esto es por lo que se introdujo como condición de contorno tanto el río Duerna por el sur y el Peces por el norte. En la Figura 12 se puede observar la distribución espacial de estos cuerpos de agua.

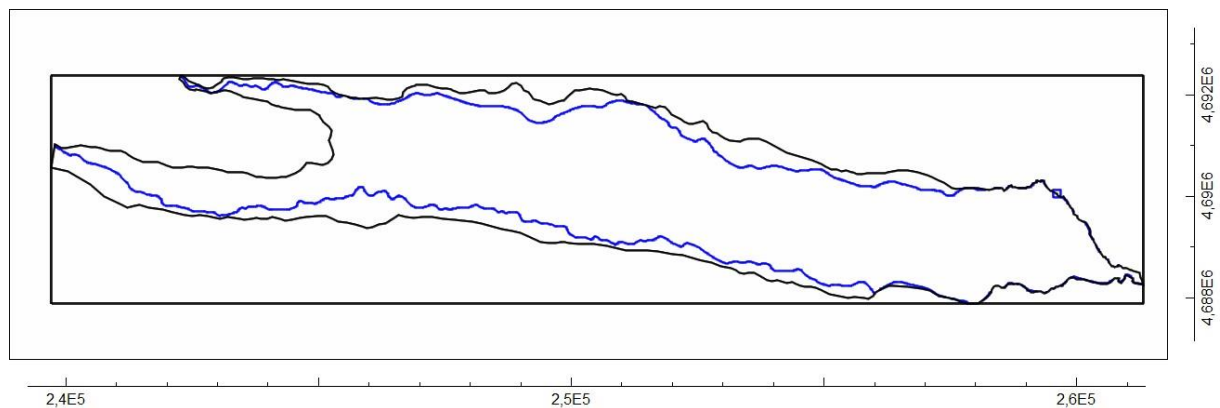


Figura 13. Representación visual de las condiciones de contorno relacionadas al paquete RIV. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.

El paquete RIV se utiliza para simular la interacción entre un río y un acuífero. Este paquete representa al río como una fuente de flujo que puede ceder agua al acuífero o recibirla de él, dependiendo de la relación entre el nivel del agua en el río y el nivel piezométrico en el acuífero. El flujo entre ambos se calcula usando una fórmula de conductancia hidráulica, que considera la conductividad hidráulica del lecho del río, su espesor y su área de contacto con el acuífero. Además, el paquete permite definir un nivel mínimo del río (stage) por debajo del cual no se permite más intercambio, simulando una desconexión hidráulica. También permite definir la capacidad del lecho del río para simular el flujo de agua entre él y el acuífero (conductance) y la elevación de la base del lecho del río o el punto más bajo donde puede existir agua en el río (river bottom). Como no hay datos de estos parámetros, se ha considerado constantes durante toda la simulación transitoria. Sus valores se recogen en la Tabla 1.

Río	River stage	Conductance	River bottom
Peces	Model_top + 0.25	20	Model_top
Duerna	Model_top + 0.5	150	Model_top

Tabla 1. Parámetros utilizados en la modelación para la condición de contorno RIV.

Recarga (paquete de MODFLOW RCH)

La recarga utilizada en el modelo representa la infiltración de la lluvia mediante el paquete de recarga (RCH). En el presente estudio no se consideró la infiltración por retornos de riego por falta de información. En futuros estudios se podría tener en cuenta como mejora del presente modelo. Las series de recarga obtenidas con diferentes reservas útiles fueron promediadas, y la serie promedio resultante fue la que se utilizó como dato de entrada en el paquete de recarga.

Se utilizaron 8 zonas de recarga (Figura 14), una para cada uno de los nodos de datos climáticos de la malla de interpolación de la AEMET. Para el régimen permanente el valor de recarga fue considerado constante en el tiempo, por zona, para todo el periodo de simulación, teniendo en cuenta el valor promedio de la serie de recarga calculada desde 1952. Sin embargo, para el modelo transitorio se utilizaron valores diarios de infiltración para los 10 años hidrológicos simulados.

También se simuló la recarga a través de las zayas con el paquete RCH. Las zayas solo están activas los meses de abril a junio de cada año, que es cuando la CHD da permiso a los regantes para abrir las compuertas de paso a los canales de infiltración (líneas de color púrpura en la Figura 14). El valor que aportan las zayas al acuífero se consideró de 1 hm³ desde el 1 de abril al 30 de junio, según comunicación personal de los técnicos del IGME que están trabajando en la zona. Este valor podría ser mayor, pero no hay medidas para el periodo de estudio que puedan acotar mejor este valor. Se ha considerado también este dato teniendo en cuenta el ensayo de recarga controlado, en el que se infiltraron 0,7 hm³, pero que se realizó en condiciones especiales abriendo todas las compuertas, cuando esta no suele ser la práctica habitual. Para el año 2019-2020 se incluyó la recarga del ensayo de recarga controlada, por lo que este año la recarga de las zayas fue de 1,7 hm³/año.

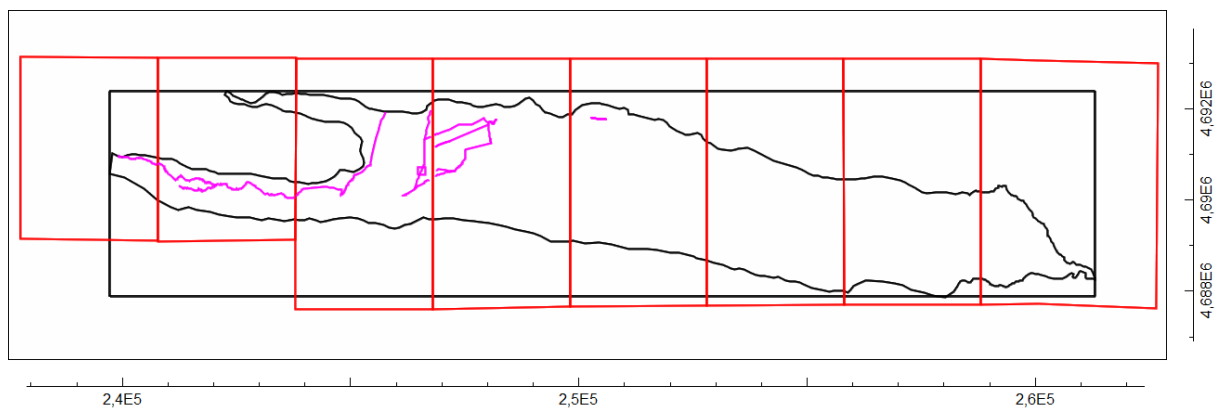


Figura 14. Representación de la zonificación en la zona de estudio para la recarga por infiltración por lluvia (polígonos de color rojo) y ubicación de las zayas (líneas de color púrpura). Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.

Extracción por bombeo (paquete de MODFLOW WELL)

Los pozos de extracción para riego se introdujeron en el modelo mediante el paquete WELL, para el periodo transitorio comprendido entre los años hidrológicos del 2010-2011 al 2019-2020. Se puede observar su distribución espacial en la Figura 15.

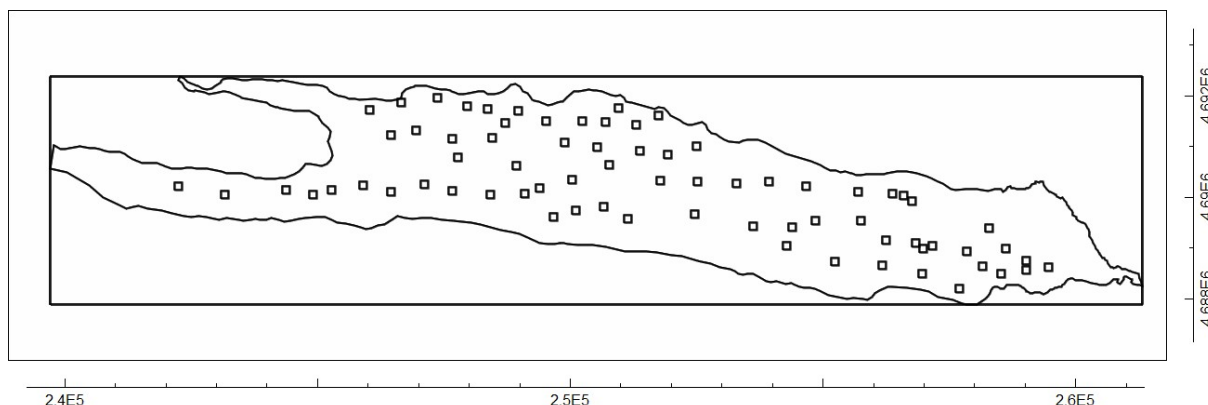


Figura 15. Representación espacial de los pozos de extracción en la zona de estudio. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.

Se consideraron un total de 73 pozos según lo que se detalla en el capítulo 3. Metodología. Estos están distribuidos por casi la totalidad del área del acuífero. El uso regable de estos bombeos es principalmente para; alfalfa, cebada, centeno, girasol, maíz, patata, remolacha y trigo, con un promedio de riego anual de 6.74 hm³ en total para todos los cultivos.

4.2.3 Régimen permanente

Piezometría

Al finalizar la ejecución del modelo en régimen permanente, se obtuvieron los niveles piezométricos que se pueden observar en la Figura 16. Estos resultados se basan en condiciones de contorno constantes, sin intervención antrópica de extracción por bombeos ni recarga mediante zayas, utilizando solo los paquetes de RIV y RCH, que tiene en cuenta la infiltración por lluvia.

Las isopiezas representadas en la Figura 16, muestran mayores valores en la zona occidental del área de estudio, con valores máximos de alrededor de 910 m.s.n.m. A medida que avanza al extremo oriental del acuífero, los niveles piezométricos descienden hasta un mínimo de aproximadamente 775 m.s.n.m. Estos valores reflejan el comportamiento real del acuífero con el flujo natural del agua.

Los resultados indican que el flujo del acuífero se dirige de oeste a este, lo cual es consistente con la topografía regional y las características hidrogeológicas ya estudiadas previamente por

la CHD.

Piezometría régimen permanente

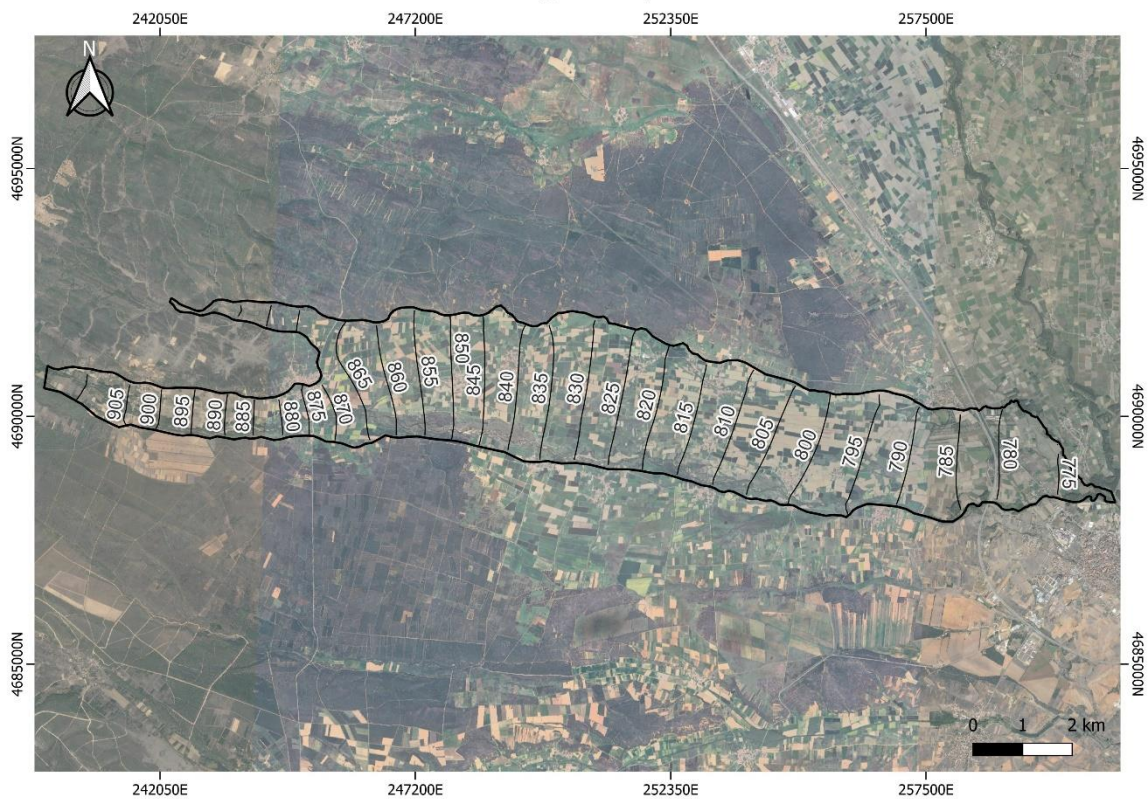


Figura 16. Mapa de los resultados piezométricos obtenidos en régimen permanente.

Balace hídrico

El balance hídrico del modelo en régimen permanente se puede ver representado en la Tabla 2. La entrada de agua por medio de los ríos al acuífero alcanza aproximadamente 0.3 hm³/año, mientras que la recarga directa al acuífero por infiltración de la lluvia es mucho mayor, con un valor de 2.8 hm³/año.

Con respecto a las salidas desde el acuífero hacia los ríos suman 3.1 hm³/año, mientras que no se consideran salidas de agua por otros mecanismos en este régimen permanente.

CONDICIONES DE CONTORNO	ENTRADAS HM3/AÑO	SALIDAS HM3/AÑO
RÍOS	0.3	3.1
RECARGA	2.8	0
TOTAL	3.1	3.1
ENTRADAS - SALIDAS	-2.8E-05	

Tabla 2. Balance hídrico obtenido para la simulación en régimen permanente.

En la tabla podemos observar que las entradas y salidas al acuífero tiene el mismo valor, con una diferencia de $-2.8 \text{ E-}05 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este resultado es esperable en el régimen estacionario, en el cual se ha trabajado, donde se asume que el acuífero ha alcanzado un estado de equilibrio en el que las entradas y salidas de agua están en balance.

Es importante mencionar que este balance hídrico es coherente con las características del acuífero modelado, y la diferencia mínima que se ve reflejada entre entradas y salidas es atribuible a la precisión numérica del modelo. Se puede decir que el error es despreciable, lo cual valida la estabilidad y confiabilidad en régimen permanente.

4.2.4 Régimen transitorio

La simulación en régimen transitorio corresponde al periodo comprendido entre los años hidrológicos del 2010-2011 y 2019-2020.

Calibración del modelo

La calibración de un modelo hidrogeológico es crucial para asegurar que las simulaciones de flujo de agua subterránea reflejan con la mayor precisión posible las condiciones reales. Este proceso es reiterativo e involucra la comparación de datos observados y simulados, y el ajuste en la modificación sistemática de parámetros como la conductividad hidráulica, la recarga y coeficiente de almacenamiento. Según Anderson, Woessner & Hunt (2015) y Kreisic (2006), la calibración no solo mejora la exactitud del modelo, sino que también incrementa la confianza en las predicciones futuras realizadas con el modelo calibrado.

En este trabajo, se tienen datos observados durante el año en el que se realizó el ensayo de recarga controlada, 2020, provenientes de 62 piezómetros con información de nivel freático distribuidos a lo largo de toda el área de estudio (Figura 17). Estos valores observados se importaron al modelo utilizando el paquete de MODFLOW OBS. Estos piezómetros proporcionan información clave sobre los niveles freáticos y la variación espacial de las condiciones hidrogeológicas reales.

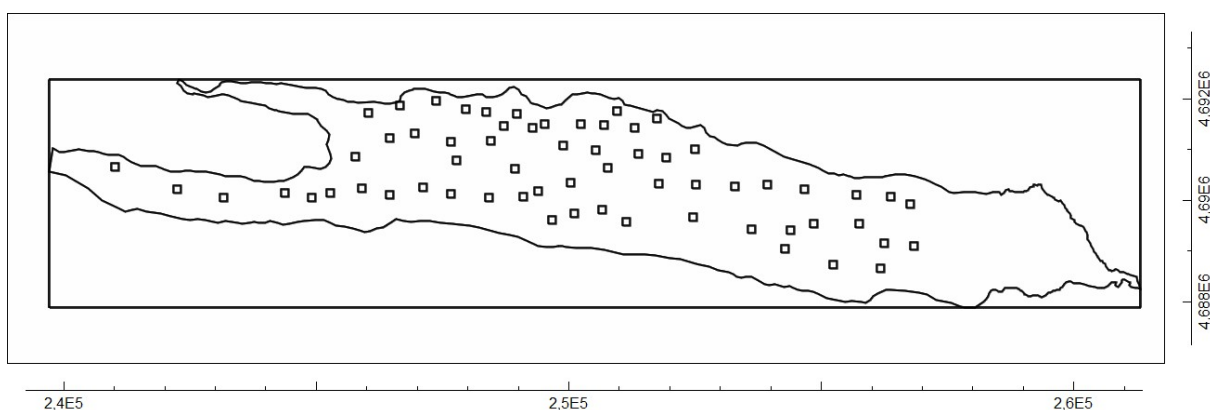


Figura 17. Distribución espacial de los piezómetros con medidas realizadas durante el año 2020 en la zona de estudio. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.

Los datos observados en campo corresponden a 4 fechas: 30 de enero del 2020, 15 de marzo del 2020, 30 de marzo del 2020 y 27 de septiembre del 2020. La comparación de estas 4 mediciones observadas con las simuladas nos permite evaluar el ajuste del modelo a los datos medidos en campo. En la Figura 18, se muestra la comparación en m.s.n.m entre valores observados y valores simulados para las cuatro fechas consideradas.

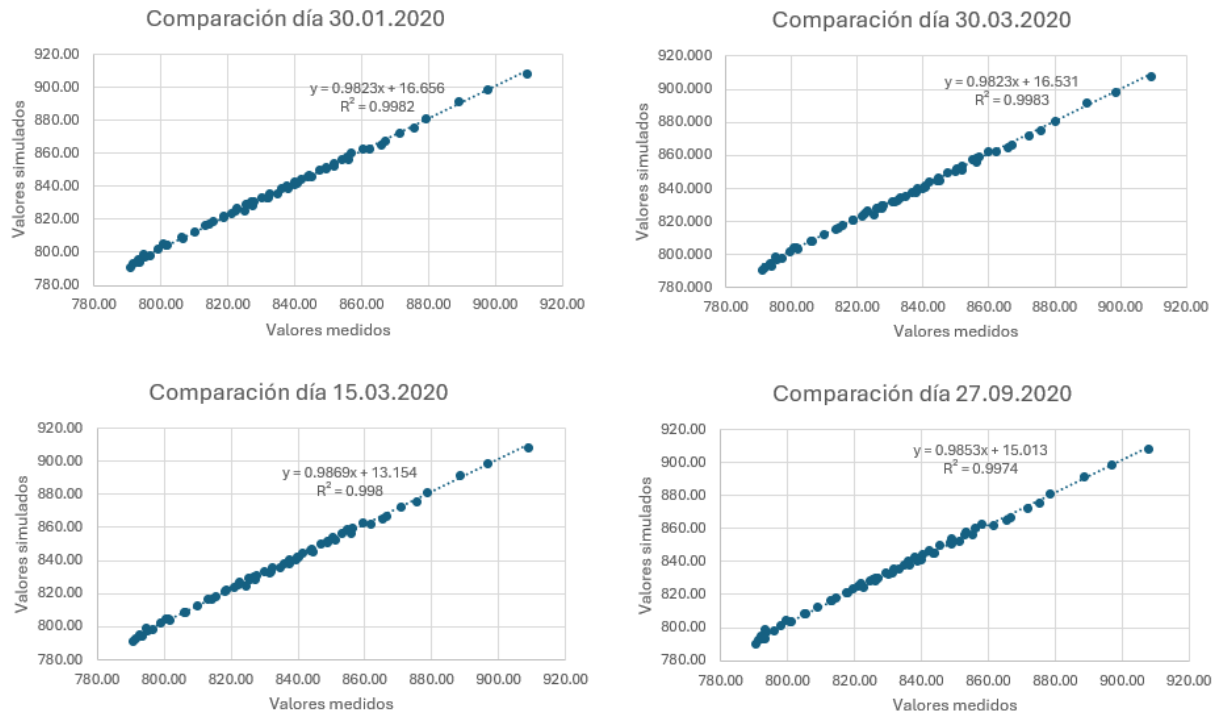


Figura 18. Gráficos comparativos de valores simulados versus valores medidos para los 4 días de ensayo.

Como se puede observar en la Figura 18, para las 4 fechas existe una muy buena correlación entre los valores piezométricos simulados en el modelo y los valores observados en campo. Esta correlación indica que el modelo reproduce de manera bastante fiable el comportamiento piezométrico del acuífero en la zona de estudio.

Piezometría

Al ejecutar el modelo en régimen transitorio, se observa que los valores piezométricos apenas tienen variaciones, a lo largo del periodo de estudio (año hidrológico 2010-2011 al 2019-2020). Esto concuerda con las medidas realizadas por el IGME en el año 2023-2024, que no estaban disponibles para la realización del presente trabajo.

Observamos también que existe una similitud importante con la piezometría resultante al ejecutar el modelo en un régimen permanente, con la misma distribución espacial de cotas, mayores en el extremo oeste donde alcanzan valores de 910 m.s.n.m. aproximadamente y van decreciendo con el sentido topográfico hacia el este, con valores mínimos que alcanzan los 775 m.s.n.m.

Piezometría simulada 30.01.2020



Figura 20. Mapa piezométrico para la simulación del 30.01.2020.

Piezometría simulada 15.03.2020



Figura 19. Mapa piezométrico para la simulación del 15.03.2020.

Piezometría simulada 30.03.2020

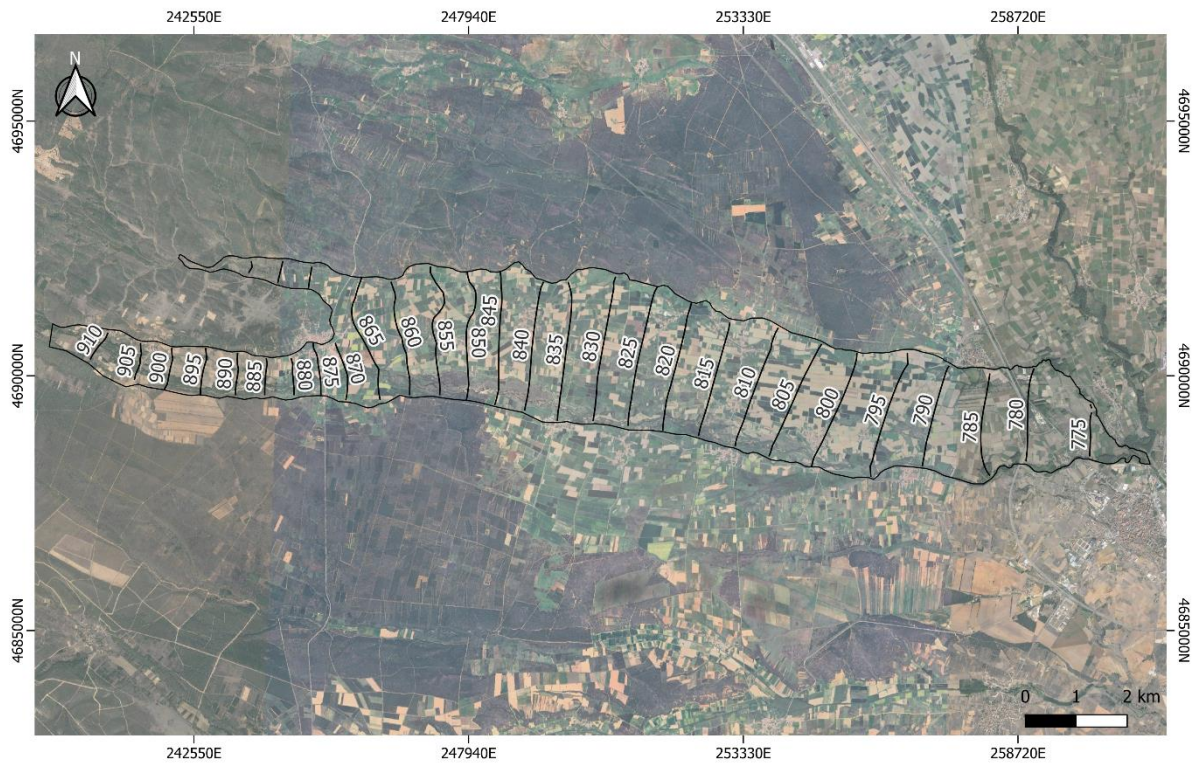


Figura 21. Mapa piezométrico para la simulación del 30.03.2020.

Piezometría simulada 27.09.2020

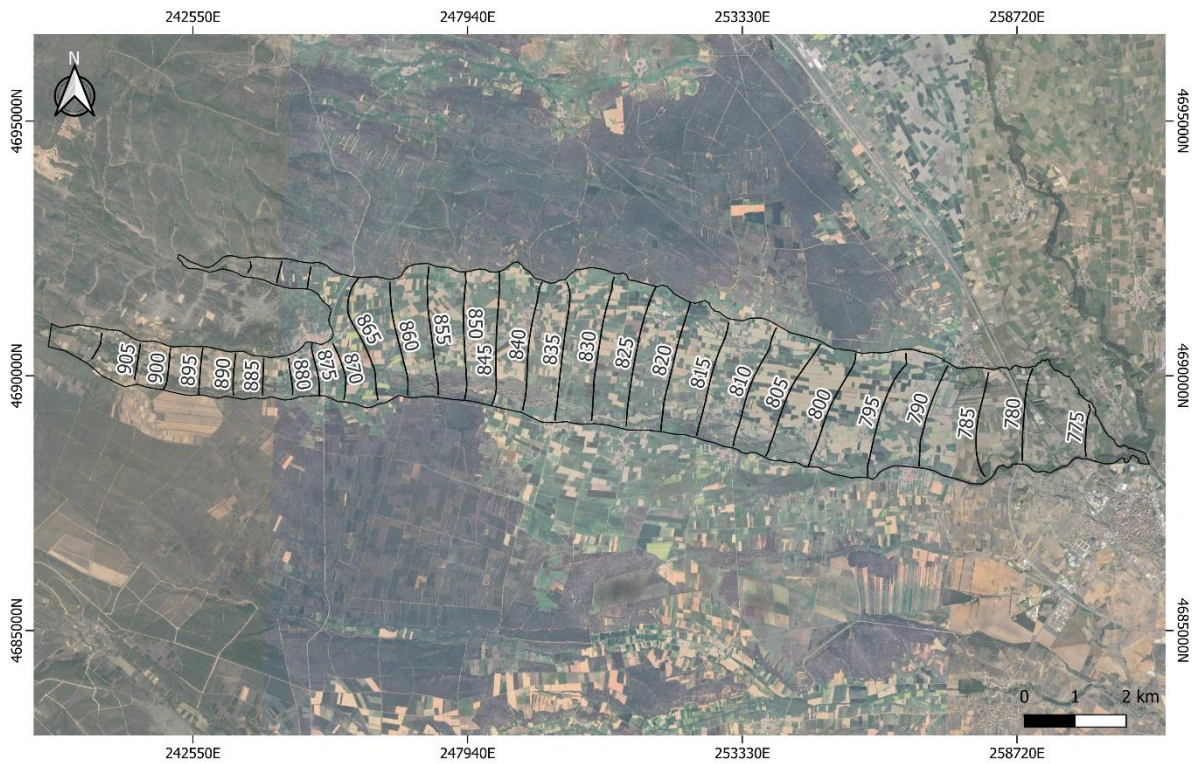


Figura 22. Mapa piezométrico para la simulación del 27.09.2020.

Se puede observar un leve cambio en la piezometría simulada en el día 30.03.2020 con respecto a la del día 15.03.2020, que es justo el término del ensayo de infiltración a través de las zayas. En la Figura 22 se ha representado la diferencia del nivel piezométrico entre el primer día el ensayo de recarga controlada y el último. Se puede apreciar un incremento en el nivel piezométrico en correspondencia de las zayas, lo que sugiere que la recarga artificial, provocó una elevación de los niveles de agua subterránea en estas zonas. Las áreas con valores más altos (cerca de 2 m) son las que se encuentran más cerca de las zayas donde el agua infiltrada logra impactar directamente en el acuífero con una conexión hidráulica favorable. En cambio, las zonas de color azul cercanas a un valor nulo de diferencia, es donde no hay un impacto medible durante los 15 días de simulación.

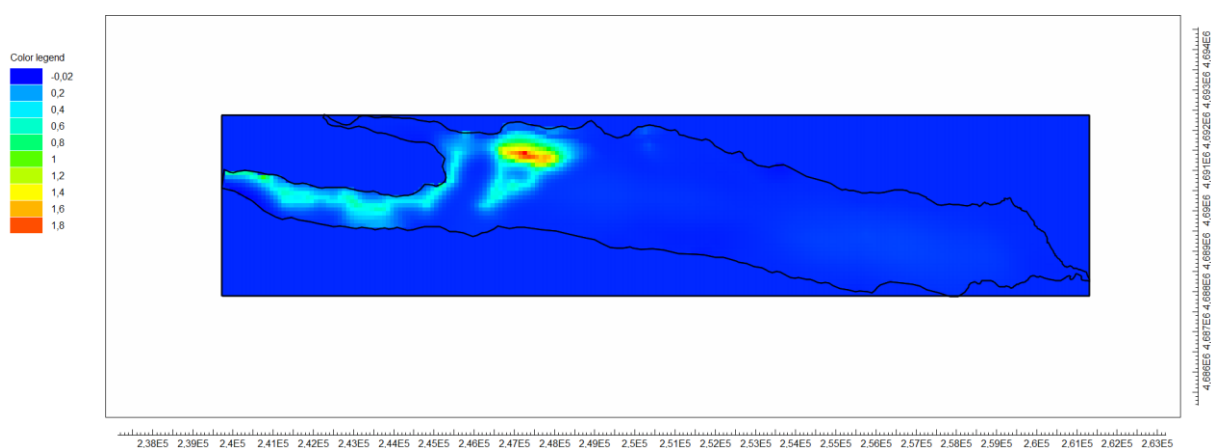


Figura 23. Representación con los cambios del nivel piezométrico (unidades de medida en m) para el ensayo de recarga artificial controlada realizado entre el 15.03.2020 y el 30.03.2020. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.

Balace hídrico

El balance hídrico para el régimen transitorio permite corroborar si se logran reproducir las condiciones establecidas en el modelo conceptual. A continuación, se puede observar el resumen de los resultados en la Tabla 3, de color celeste las entradas y de color naranja las salidas.

Año hidrológico	Ríos hm³/año	Recarga hm³/año	Almacena- miento hm³/año	Ríos hm³/año	Bombe- os hm³/año	Almacena- miento hm³/año
2010-2011	9.06	3.86	6.63	9.34	7	3.48
2011-2012	10.18	2.35	5.11	7.27	6.75	3.63

Año hidrológico	Ríos hm ³ /año	Recarga hm ³ /año	Almacenamiento hm ³ /año	Ríos hm ³ /año	Bombos hm ³ /año	Almacenamiento hm ³ /año
2012-2013	10.49	2.98	4.94	6.89	6.74	4.77
2013-2014	10.14	4.59	5.40	7.55	6.74	5.84
2014-2015	10.36	2.91	4.98	7.04	6.74	4.46
2015-2016	9.42	7.89	5.95	8.65	6.74	7.87
2016-2017	10.24	2.10	5.13	7.10	6.74	3.63
2017-2018	10.47	2.87	4.75	6.78	6.74	4.56
2018-2019	10.80	1.58	4.56	6.44	6.74	3.76
2019-2020	10.37	4.55	5.24	7.27	6.74	6.14
Promedio	10.15	3.57	5.27	7.43	6.74	4.81

Tabla 3. Resumen resultados de entradas y salidas en régimen transitorio.

Con respecto a la recarga, presenta mayor variabilidad interanual, reflejando los datos de entrada que se habían calculado con el balance del agua en el suelo. Tiene un promedio de 3.57 hm³/año. Se observa también, que el año 2015-2016 presenta el valor más alto de recarga, con 7.89 hm³/año, lo que estará asociado con un año hidrológico más húmedo. Por otro lado, el año 2018-2019 refleja un periodo de baja precipitación, con una recarga anual de 1.58 hm³/año.

En la misma Figura 24, se puede observar también las variaciones interanuales en el agua que entra en movimiento en el acuífero proveniente del agua almacenada en el acuífero, con una media anual de 5.27 hm³/año.

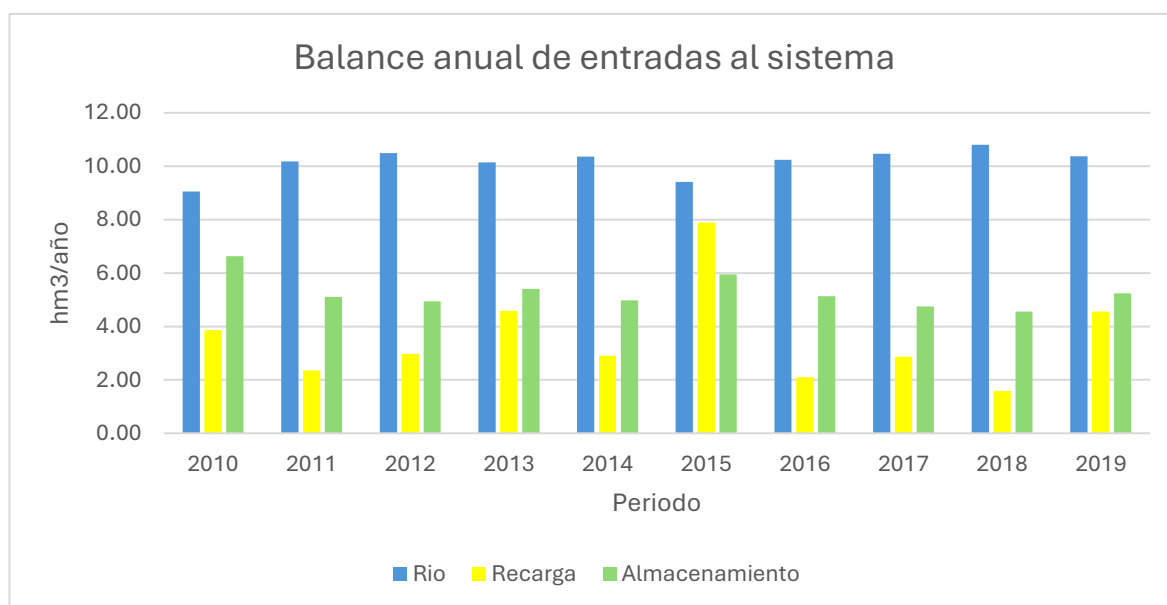


Figura 24. Gráfica de resultados para las entradas al sistema del balance hídrico en régimen transitorio.

Para las salidas del acuífero (Figura 25), tenemos los flujos de agua que abandonan el acuífero, principalmente a través de interacciones con los ríos y extracción por bombeo. Los valores obtenidos para el periodo de estudio muestran variaciones anuales que son consistentes con los cambios en las entradas y el comportamiento del almacenamiento.

Los ríos han jugado un papel importante en el balance hídrico del modelo. Durante el periodo de estudio, se observaron intercambios de flujo de entrada o salida de agua entre los ríos y el acuífero. Existe una interacción bidireccional entre el acuífero y los ríos, ya que, en ciertos periodos y zonas, los ríos aportan agua al acuífero, mientras que, en otros, el acuífero descarga agua hacia los ríos. Esto es esperable en acuíferos que están en contacto directo con cuerpos de agua superficiales y refleja la conectividad que existe entre ambos.

Con respecto al agua que queda almacenada en el acuífero, cabe resaltar que MODFLOW la considera como un almacenamiento "externo" al acuífero, considerando esta componente del balance como un término externo al propio acuífero. Los años con mayores entradas netas tienden a coincidir con años en los que el acuífero está respondiendo a un mayor nivel de recarga o flujo de ríos hacia el acuífero. Este comportamiento es esperable si el acuífero tiende hacia el equilibrio.

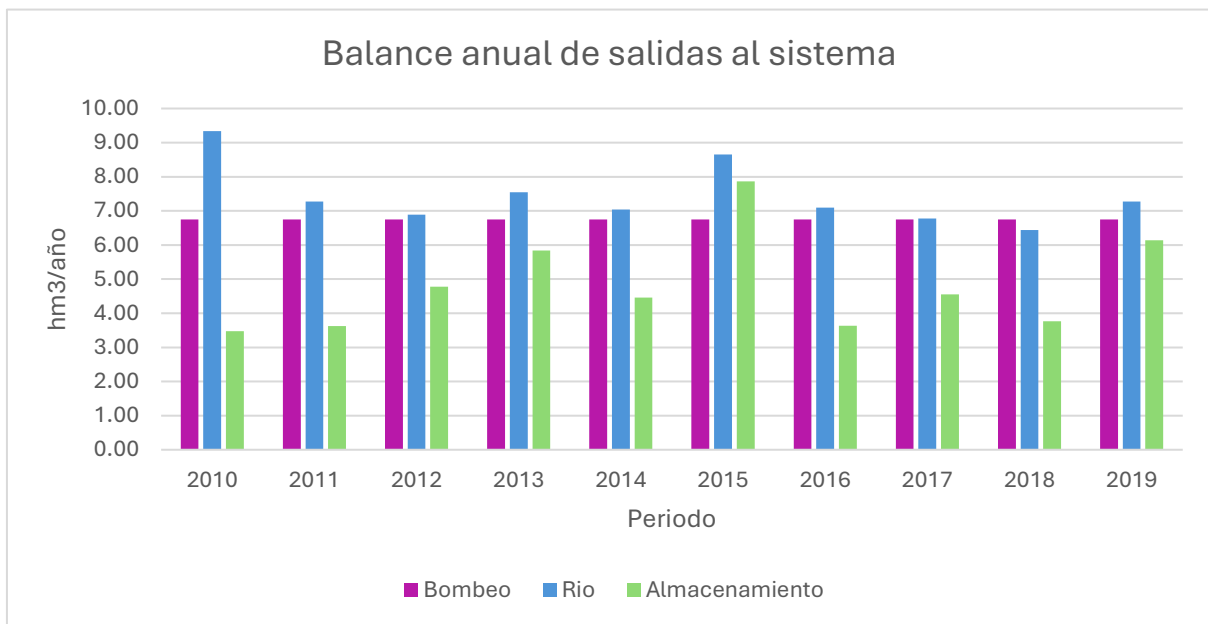


Figura 25. Gráfica de resultados para las salidas al sistema del balance hídrico en régimen transitorio.

Con la resta de las entradas y salidas del sistema a los ríos, se ha podido calcular la entrada neta al acuífero desde los ríos (Figura 26). En la Figura 26 es importante mencionar que la entrada neta de los ríos tiene un promedio general de 2.7 hm³/año, con un mínimo de - 0.3 hm³/año para el primer año 2010-2011. Este valor también podría estar asociado y verse afectado por el inicio de la simulación transitoria. También se puede observar la dinámica de intercambio de agua, siendo los valores positivos desde el periodo 2011-2012 al 2019-2020. Esto nos muestra que los ríos ceden agua al acuífero. El año hidrológico 2010-2011 ha sido el único periodo en que el río aparece como ganador con respecto al acuífero (el acuífero le cede agua), pero puede ser debido también a errores del modelo asociados al primer año de simulación después del estacionario.

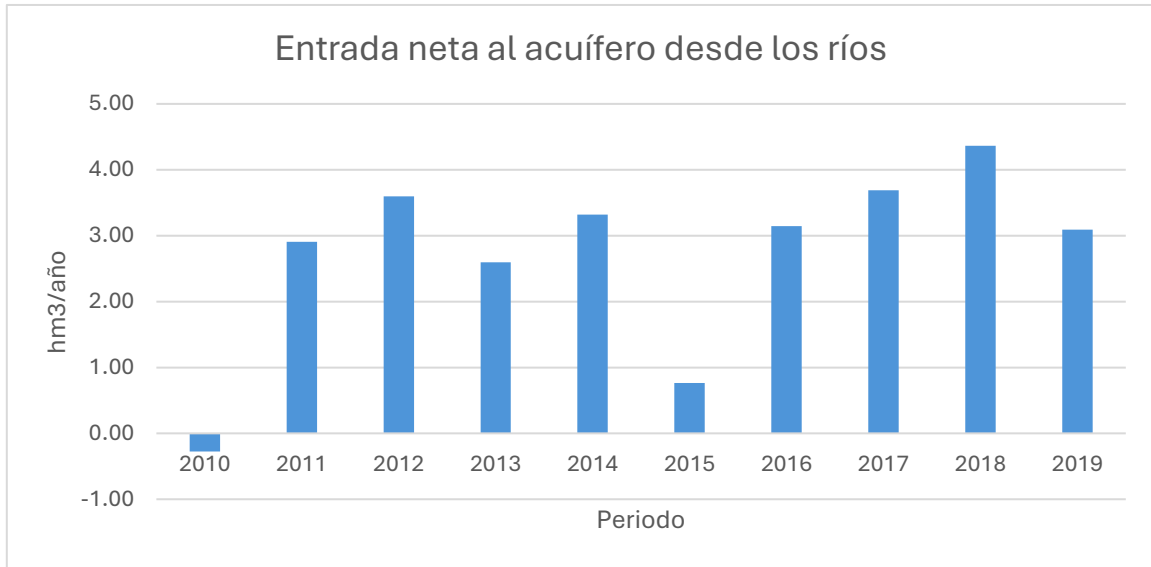


Figura 26. Gráfica de resultados de entrada neta al acuífero desde los ríos en régimen transitorio.

En la Figura 27, podemos observar que el almacenamiento neto del acuífero vs la curva de desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media. Con respecto al almacenamiento, tiene solo ligeras variaciones, con valores negativos de $-0.4 \text{ hm}^3/\text{año}$, $-1.9 \text{ hm}^3/\text{año}$ y $-0.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ en los periodos 2013-2014, 2015-2016 y 2019-2020 respectivamente. Este comportamiento puede relacionarse con una disminución en la recarga por lluvia mostrada con los valores negativos de la curva de desviación acumulada de la lluvia.

Al analizar la curva de desviación acumulada de la precipitación mensual con respecto a la media, se observa que los periodos con valores negativos de la desviación en la acumulación de precipitaciones coinciden con menor almacenamiento en el acuífero. Por ejemplo, durante los periodos 2013-2014, 2015-2016 y 2019-2020, la curva muestra valores bajos y una tendencia descendente, lo que podría haber limitado la recarga efectiva del acuífero. Los picos positivos en la curva observados en 2016-2017 presentan una variación positiva en el almacenamiento neto, pero con retraso (Figura 27).

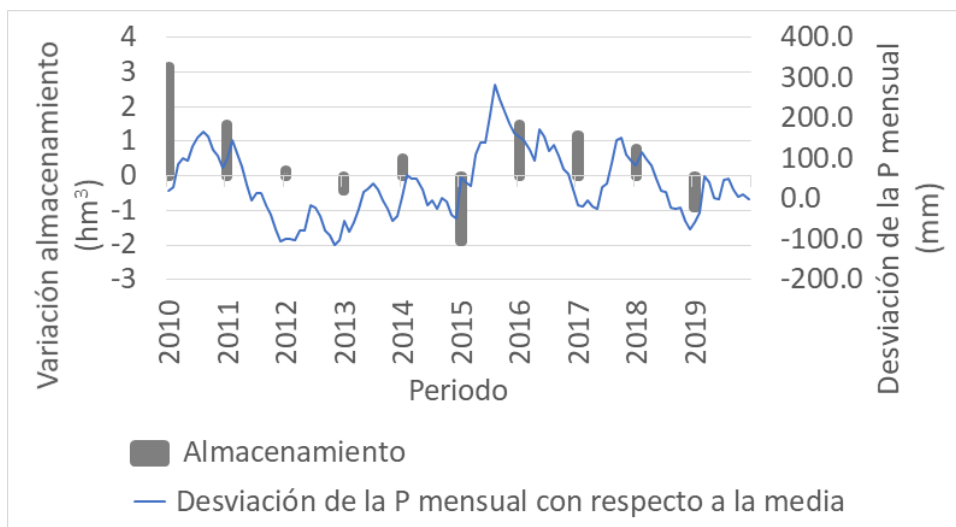


Figura 27. Gráfica de resultados de la variación anual del almacenamiento neto vs curva de desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media.

4.2.5 Estimación del periodo de renovación de agua en el acuífero

Este cálculo se basó en la relación entre el volumen total del acuífero y la recarga anual que recibe (S/R; Margat et al. 2006). Para el volumen de almacenamiento se consideró multiplicar el área del acuífero 45992100 m^3 por una porosidad del 11%. Por lo tanto, para el cálculo final se utilizó un volumen de almacenamiento de $46 \text{ hm}^3/\text{año}$ y una recarga anual para el periodo de estudio (año hidrológico 2019-2020) de $5 \text{ hm}^3/\text{año}$, que al dividir estos valores nos dio un periodo de renovación de 9.2 años. Este valor indica que, bajo las condiciones actuales, el acuífero tardaría aproximadamente esa cantidad de años en renovar completamente su contenido hídrico. En opinión de Margat (1989), los acuíferos con tiempos de renovación menores de 10 años son extremadamente vulnerables a su explotación, por lo que las medidas de gestión del agua deben extremarse, hacerse de forma controlada, e ir mejorando de forma progresiva su conocimiento hidrogeológico para optimizar su explotación.

4.2.6 Tiempo de tránsito en el acuífero

En la Figura 28 se puede observar la trayectoria de partículas en el acuífero. Simulado con el programa MODPATH. Estas partículas se han introducido en el extremo oeste del acuífero y se simuló su movimiento hasta el extremo este en función de la velocidad del flujo subterráneo, la porosidad del medio y las condiciones hidráulicas trabajadas. El tiempo de tránsito calculado en MODPATH para las partículas es de 16000 días, lo que equivale aproximadamente 43.8 años. Este resultado indica el tiempo necesario para que una partícula de agua recorra el trayecto modelado dentro del acuífero. Este resultado contribuye a conocer mejor su dinámica de flujo, los tiempos de descarga y descarga, y los posibles impactos en la gestión del recurso hídrico.

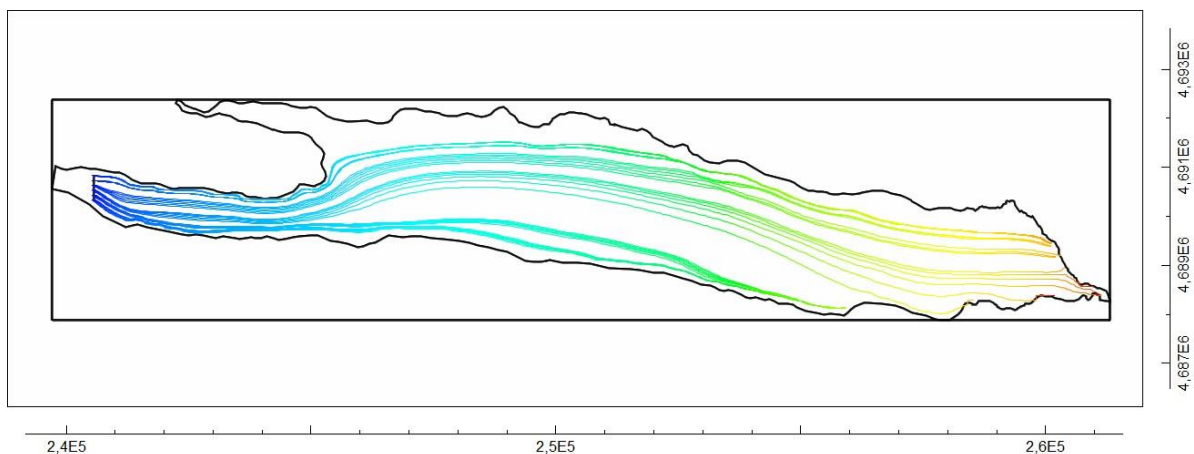


Figura 28. Representación de la trayectoria subterránea de partículas de agua en el acuífero, con colores más fríos partiendo de 0 días a colores más cálidos hasta de hasta 16000 días. Sistema de referencia EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N), las unidades en los ejes corresponden a metros.

Capítulo 5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la modelación del acuífero interfluvial Peces-Duerna han permitido evaluar el impacto de diferentes variables en la recarga y el balance hídrico de la región. En particular, se ha analizado el papel de las zayas como una solución basada en la naturaleza para incrementar la recarga del acuífero.

Sin el funcionamiento de las zayas, el modelo en régimen transitorio para el año hidrológico 2019-2020, estima una recarga promedio anual de 2.40 hm³/año, basada principalmente en la infiltración natural de agua superficial y las precipitaciones. No obstante, al considerar la presencia de las zayas en el modelo, la recarga incrementa en 1 hm³/año aproximadamente, alcanzando un valor promedio de 3.57 hm³/año (Tabla 4).

Este incremento supone un aumento redondeado del 40% en la recarga total del acuífero. Aunque el aumento de 1 hm³/año puede parecer no muy relevante en términos generales, este valor tiene implicaciones significativas para la gestión hídrica en la zona de estudio. En primer lugar, las zayas no solo incrementan la recarga directa del acuífero, sino que también lo hacen de manera estratégica, distribuyendo el agua en áreas clave para la infiltración, lo cual puede ayudar a mantener niveles piezométricos estables en épocas de alta demanda hídrica como las necesidades de riego. Este efecto puede ser crucial en periodos secos, cuando la recarga natural es limitada y la demanda sobre los recursos hídricos subterráneos aumenta.

Una vez construido y calibrado el modelo numérico de flujo, se realizaron dos simulaciones de escenarios de gestión. Estas simulaciones se han realizado y analizado comparando sus resultados con una simulación en transitorio en la que no está incluido el ensayo de recarga controlada del año 2020. De este modo se pretende estudiar una situación lo más aproximada a la gestión actual del acuífero, en la que las zayas comienzan a funcionar el 1 de abril. En la Tabla 4 se puede observar la comparación de los resultados del régimen transitorio con la simulación del escenario de gestión 1, considerando la construcción de una nueva zaya, mostrando un aumento considerable en la recarga.

Recarga hm³/año

Año hidrológico	Simulación transitoria sin zayas	Simulación transitoria con zayas	Incremento % de recarga	Simulación escenario de gestión 1	Incremento % de recarga
2010-2011	2.76	3.86	40	5.37	95
2011-2012	1.30	2.35	81	3.75	188
2012-2013	1.91	2.98	56	4.43	132
2013-2014	3.46	4.59	33	6.15	78
2014-2015	1.83	2.91	59	4.34	137
2015-2016	6.62	7.89	19	9.69	46
2016-2017	1.05	2.10	100	3.48	231

Año hidrológico	Simulación transitoria sin zayas	Simulación transitoria con zayas	Incremento % de recarga	Simulación escenario de gestión 1	Incremento % de recarga
2017-2018	1.79	2.87	60	4.30	140
2018-2019	0.56	1.58	182	2.92	421
2019-2020	2.70	3.81	69	5.30	96
Promedio	2.40	3.50		4.97	

Tabla 4. Tabla comparativa de los resultados de la simulación transitoria y el escenario de gestión 1 simulado.

Los resultados corroboran que la presencia de las zayas puede actuar como una herramienta eficaz para aumentar la resiliencia del acuífero frente a la variabilidad y el cambio climático, que están directamente relacionados con cambios en los patrones de precipitación y en la disponibilidad de recursos hídricos. Como ya se adelantaba, aunque el impacto de las zayas es pequeño en términos de recarga total anual, su influencia puede ser crítica para garantizar la disponibilidad de agua subterránea durante los periodos de sequía o en el final de la temporada de riego.

Además, los estudios previos en la región de la CHD indican que la recarga artificial mediante zayas ha demostrado ser una técnica tradicional que sigue siendo relevante para la sostenibilidad del acuífero. La utilización de esta práctica, en combinación con el manejo adecuado de las extracciones y el monitoreo de los niveles piezométricos, puede ser clave para mantener el equilibrio hídrico en la comarca de La Valduerna.

La simulación de escenario de gestión 2, representa el deseo de los regantes de cambiar el tiempo de funcionamiento de las zayas adelantando su apertura, y por lo tanto extendiendo el funcionamiento de las zayas durante los tres primeros meses del año, funcionando por tanto las zayas durante 6 meses, de enero a junio. Los resultados de esta simulación se muestran en la Tabla 5.

hm³/año				
Año hidrológico	Recarga con zayas funcionando normal	Almacenamiento con las zayas funcionando normal	Recarga en simulación escenario de gestión 2	Almacenamiento con las zayas en simulación 2
2010-2011	3.86	6.63	4.86	6.57
2011-2012	2.35	5.11	3.36	5.25
2012-2013	2.98	4.94	3.97	5.15
2013-2014	4.59	5.40	5.58	5.61

Año hidrológico	Recarga con zayas funcionando normal	Almacenamiento con las zayas funcionando normal	Recarga en simulación escenario de gestión 2	Almacenamiento con las zayas en simulación 2
2014-2015	2.91	4.98	3.90	5.19
2015-2016	7.89	5.95	8.90	6.14
2016-2017	2.10	5.13	2.30	5.37
2017-2018	2.87	4.75	3.86	4.99
2018-2019	1.58	4.56	2.58	4.79
2019-2020	3.81	5.09	4.82	5.27
Promedio	3.50	5.25	4.49	5.43

Tabla 5. Tabla comparativa de los resultados de la simulación transitoria y el escenario de gestión 2 simulado.

Los resultados de las simulaciones del escenario de gestión 2 muestran que el valor de recarga aumenta en 1 hm³/año aproximadamente, lo que significa un valor positivo en el aumento del almacenamiento que se analiza a continuación:

- Los meses de enero, febrero y marzo corresponden a meses de invierno, cuando las demandas hídricas de la zona (riego principalmente) suelen ser menores, entonces se almacena agua en el acuífero antes del inicio de la temporada de mayor consumo, lo que se puede considerar una reserva estratégica para los meses más secos.
- Al mantener en funcionamiento las zayas los meses de invierno, cuando la temperatura es menor. habrá un mayor aprovechamiento del agua disponible debido a la disminución de la evapotranspiración.
- Tener un incremento de 1 hm³/año significa tener un aumento equivalente a cubrir un 6.71% de la demanda anual total, considerando que la demanda hídrica actual total en La Valduerna es de 14.91 hm³/año (CHD, 2021). Esto es un recurso de agua adicional disponible para periodos de escasez o sequía, que si se gestiona correctamente puede ayudar a mantener niveles piezométricos y prevenir problemas de sobreexplotación. Pero si el poder llevar a cabo este cambio en el funcionamiento de los canales, requiere esfuerzo logístico y monetario, habría que evaluar la variabilidad de su ejecución.

Es importante señalar que la efectividad de las zayas como mecanismo de recarga depende de factores como la morfología del terreno, la capacidad de infiltración de los suelos y el mantenimiento adecuado de las infraestructuras. Una zaya bien gestionada no solo incrementa la recarga, sino que puede ser mejor el aprovechamiento del agua para riego que beneficiaría con creces a los habitantes del sector. Sin embargo, su efectividad podría disminuir si se impermeabilizan y las condiciones hidrogeológicas del acuífero cambian significativamente en el futuro debido a variaciones climáticas o al aumento de la demanda de

agua, por eso con las condiciones actuales se considera que las zayas si son un aporte para el acuífero estudiado.

Es importante también mencionar que los resultados obtenidos de tiempo de renovación del acuífero y tiempo de tránsito de partículas reflejan distintas escalas temporales en la dinámica del acuífero. Un tiempo de renovación de 9.2 años, según Marget (Martos Rosillo et al. 2013), implica que el acuífero Peces-Duerna es altamente vulnerable a la explotación, por lo que debe garantizarse que la explotación por bombeo sea menor a la recarga media.

Sin embargo, el tiempo de tránsito de casi 44 años indica que el movimiento del agua dentro del acuífero es considerablemente más lento a nivel local. Este tiempo puede ser un indicativo de baja velocidad de flujo debido a características del medio poroso o gradientes hidráulicos bajos. Esto implica que, el acuífero tiene una buena capacidad para depurarse naturalmente.

Desde el punto de vista de la gestión hídrica los resultados obtenidos hacen recomendar los siguientes puntos:

- Debe realizarse un control de las extracciones. Aunque el tiempo de renovación es relativamente corto, esto no debe interpretarse como una capacidad infinita de extracción, ya que el tiempo de tránsito indica que las reservas podrían tardar mucho en renovarse.
- Debe resaltarse la importancia de la recarga artificial con zayas. Dada la lentitud del tránsito de partículas, es crucial proteger las zonas de recarga por zayas del acuífero para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.
- El monitoreo continuo es de vital importancia para manejar la lenta dinámica del flujo.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido desarrollar un modelo hidrogeológico para el acuífero interfluvial Peces-Duerna, utilizando la última versión del software MODFLOW. Este modelo ha permitido cuantificar los recursos hídricos disponibles y evaluar el comportamiento del acuífero bajo diferentes condiciones, tanto en régimen permanente como transitorio.

Los resultados obtenidos confirman la importancia de la recarga artificial mediante las zayas y su impacto positivo en el acuífero estudiado. A lo largo de los 10 años modelados en régimen transitorio (2010-2011 al 2019-2020), se ha observado que la interacción entre los ríos y el acuífero, junto con las extracciones controladas por bombeo y la recarga por las zayas, mantienen el acuífero en un equilibrio hidrológico estable, con ligeras variaciones interanuales en los niveles de almacenamiento y piezometría.

El balance hídrico muestra que las entradas de agua al acuífero, principalmente a través de la recarga por infiltración del agua de lluvia, la recarga por las zayas y por y los flujos de los ríos, son capaces de compensar las salidas por bombeo y descarga hacia los ríos. Esto sugiere que, bajo las condiciones actuales de extracción, el acuífero es sostenible y no presenta signos de sobreexplotación. Sin embargo, los años con valores negativos de almacenamiento destacan la necesidad de continuar con un monitoreo constante, especialmente en periodos de menor recarga, para evitar posibles desequilibrios en el futuro.

El modelo desarrollado es una herramienta de gran utilidad para la gestión sostenible del agua en la comarca de La Valduerna, proporcionando un soporte técnico para la toma de decisiones en el contexto de variabilidad climática y creciente demanda hídrica. Adicionalmente, este estudio subraya la relevancia de las soluciones basadas en la naturaleza, como la recarga artificial mediante zayas, para mejorar la resiliencia del acuífero frente a posibles escenarios de cambio climático.

Como conclusión final, se puede resaltar que el modelo hidrogeológico propuesto no solo refleja con precisión las condiciones actuales del acuífero Peces-Duerna, sino que también permite realizar simulaciones futuras que gracias a las cuales se ha podido cuantificar el impacto sobre el acuífero de actuaciones sobre las zayas, cambio en la recarga debido al efecto del cambio climático, o cambios en los patrones de extracción. El análisis de estos escenarios de gestión contribuye a que la toma de decisiones, informadas técnicamente, logre una gestión hídrica más eficiente y sostenible en la región.

Referencias

- Aljibe Consultores, A. (2013). *Aplicación TRASERO 2.0: Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas*. Alicante.
- Allan Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *GRUNDWATER*. Englewood Cliffs.
- Alley, W. M. (1984). On the Treatment of Evapotranspiration, Soil Moisture Accounting, and Aquifer Recharge in Monthly Water Balance Models. *Water Resources Research*.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*. ELSEVIER.
- Betancur V., T., Palacio T., C. A., & Escobar M., J. F. (2014). Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results.
- Cesar Husillos; Carolina Guardiola-Albert; Héctor Aguilera-Alonso; Marta Béjar-Pizarro; Pablo Ezquerro; Ángel Prieto-Martín; 2022, *precipitacion_y_piezometria.ipynb*, v1.0.0, Zenodo, doi:10.5281/zenodo.7196959, as developed on GitHub
- CHD. (2016). *Plan Hidrológico 2016-2021*.
- CHD. (2021). *CARACTERIZACION GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA VALDUERNA (LEON). INTERFLUVIO DE LOS RIOS DUERNA-PECES*.
- de la Losa Román, A., Ventura González, J., Marín Lechado, C., Guardiola Albert, C., Massone, G., & Martos-Rosillo, S. (2024). *Investigación de sistemas ancestrales de Siembra de Agua, como ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza para la recarga de acuíferos. Las zayas de La Valduerna (León)*.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Groundwater Fourth Edition*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). *Reference Crop Evapotranspiration From Temperature*.
- Hiscock, K. M. (2005). *Hydrogeology*. Oxford: Blackwell Publishing.
- IGME. (2009). *MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA E 1:50.000 LA BAÑEZA*. Madrid.
- Kreissic, N. (2006). Calibration of Groundwater Models. *Groundwater Hydrology: Engineering, Planning and Management*, 379-405.
- Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). *Documentation for the MDOFLOW 6 Groundwater Flow Model*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Martos Rosillo, S., Marin Lechado, C., Pedrera, A., Vadillo, I., Motyka, J., Molina, J. L., . . . Martín Ramírez, J. M. (2013). Methodology to evaluate the renewal period of carbonate aquifers: a key tool for their management in arid and semiarid regions, with the example of Becerro quifer, Spain. *Hidrogeology Journal*.
- Rua Aller, F. J. (2012). Meteorología popular en la Valduerna (León). *Revista de Folklore*.
- TNC y MITECO. (2019). *Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua en España. Retos y Oportunidades*.

- Vanderlinden, K., Giráldez, J. V., & Van Meirvenne, M. (2004). Assessing Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Winston, R. B. (2019). ModelMuse Version 4: A Graphical User Interface for MODFLOW6. *Scientific Investigations Report 2019-5036*, 10.
- Winston, R. B. (2024). *Getting Started with MODFLOW*. Ontario.