revierte

CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas | IGME Instituto Geológico y Minero de España

Informe de evaluación del impacto hidrológico forestal del Proyecto Revierte



Gobierno de España – Vicepresidencia Tercera del Gobierno – Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Fundación Biodiversidad

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Revierte cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

INFORME DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO HIDROLÓGICO FORESTAL DEL PROYECTO REVIERTE (ACCIÓN A9.2)

Coordinador:

Sergio Martos Rosillo

Autores:

Irene Marín Carrillo (IGME-CSIC)

Sergio Martos Rosillo (IGME-CSIC)

Antonio Jaime Molina Herrera (UCO)

Jorge Julián Vélez Upegui (UNCO)

Thomas Zakaluk (IGME-CSIC)

Nuria Naranjo Fernández (IGME-CSIC)

La realización de la acción A9.2 del REVIERTE ha sido dirigida y realizada por el Instituto Geológico y Minero de España del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC) en colaboración con la Universidad de Córdoba, la Universidad Nacional de Colombia y con el Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA) de la Junta de Andalucía.

Índice

1. El proyecto REVIERTE y el IGME-CSIC 4

2. Introducción 5

3. Descripción del área de estudio 6

4. Material y métodos 9

5. Resultados 17

5.1 Modelización hidrológica 17

5.2 Simulación de distintos escenarios de gestión forestal 22

5.3 Parcelas experimentales de pinar en Jérez del Marquesado 26

5.4 Parcela experimental en la chopera de Purullena 28

6. Resumen y conclusiones 29

Referencias bibliográficas 30

1. El proyecto REVIERTE y el IGME-CSIC

El proyecto REVIERTE se desarrolla en el noreste de la provincia de Granada con una idea sencilla pero ambiciosa: cuidar los bosques y el agua para generar empleo, riqueza local y frenar la despoblación rural. Parte de la base de que los pinares, las choperas y los sistemas tradicionales de riego, como las acequias históricas, no son solo patrimonio natural y cultural, sino también una oportunidad de futuro.

REVIERTE impulsa una gestión activa y sostenible del monte, que reduce el riesgo de incendios, mejora la biodiversidad y apuesta por la madera local como material clave para una construcción más ecológica y con menor huella de carbono, conectando el territorio con nuevos usos industriales y sociales. El proyecto está liderado por la Universidad de Granada y se desarrolla en colaboración con otras universidades, centros de investigación, como el Instituto Geológico y Minero de España, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC) y entidades del sector forestal.

REVIERTE cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Entre las distintas acciones que se han llevado a cabo en este proyecto, la acción A9.2 “Seguimiento del impacto hidrológico-forestal del proyecto del proyecto REVIERTE” implicaba la realización de las siguientes actividades según se describe en la memoria del mismo:

“Para poder demostrar y transmitir a la población local los beneficios de estas actuaciones se pretende continuar con la monitorización hidrológica de las cuencas de los ríos Alcázar, Alhorí y Bernal, completando la información hidrológica con una red dasométrica que permitirá evaluar la traspiración y el consumo de agua del arbolado en varias parcelas con distinta densidad arbórea, vinculando así de forma directa la interacción agua subterránea-bosque. En el caso de las choperas se procederá a instalar una red de sensores piezométricos y de control del caudal del riego, para realizar los balances hidrológicos que permitan evaluar la recarga de agua subterránea que se genera con los retornos de riego”.

El trabajo del IGME-CSIC para la ejecución de la acción A9.2 ha consistido en evaluar el impacto que en los acuíferos y en los ríos, de la falda norte de Sierra Nevada, supondría reducir las altas densidades de árboles mediante actuaciones de clareo. Intervenciones con las que se conseguiría, al mismo tiempo, mejorar la salud de estos bosques, aumentar su biodiversidad, reducir el riesgo de incendios y generar un beneficio con el aprovechamiento de la madera. Además, se ha seleccionado y se ha monitorizado una parcela de chopos, en la vega de Purullena (Granada) para analizar la recarga de agua al acuífero mediante los retornos de riego.

2. Introducción

Los sistemas hídricos de la región mediterránea se encuentran sometidos a una presión creciente como consecuencia de la reducción de la precipitación media, el aumento en la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones y la degradación de la calidad del agua. Dicha presión tiene efectos directos sobre los ecosistemas, la biodiversidad, los recursos hídricos y la salud humana. En este contexto, los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, al intervenir en procesos clave como la evapotranspiración, la modulación térmica, la infiltración y almacenamiento del agua, la regulación de escorrentías y la reducción de la erosión.

A pesar de que aproximadamente el 38% del territorio español y el 35% de Andalucía están cubiertos por masas forestales, y de los avances normativos impulsados por la Unión Europea en materia de gestión integrada del territorio, el agua y los ecosistemas entre los que destacan la Directiva Marco del Agua, la Estrategia Forestal para 2030, la Estrategia de Biodiversidad para 2030 y la Ley de Restauración de la Naturaleza, amplias áreas forestales del sureste peninsular presentan un estado de conservación desfavorable. En particular, los bosques del noreste de la provincia de Granada se ven afectados por el abandono de la gestión forestal. Las repoblaciones históricas de elevada densidad y la intensificación de las sequías, son factores que incrementan la susceptibilidad a plagas, enfermedades y grandes incendios forestales además de reducir la disponibilidad de recursos hídricos.

El presente estudio analiza el impacto de actuaciones selvícolas de clareo destinadas a reducir la densidad arbórea sobre la dinámica hidrológica de los acuíferos y los sistemas fluviales de la vertiente norte de Sierra Nevada. Asimismo, se han intentado evaluar los retornos de riego que se producen mediante el riego de las choperas en las zonas de vega.

3. Descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza en la vertiente septentrional de Sierra Nevada, en la provincia de Granada, en el sur de España (Figura 1) y abarca un total de 180 km^2. La cuerda que delimita el límite norte de las cuencas estudiadas tiene el picos por encima de los tres mil metros de altitud, como el Punta de Juntillas (3143 m s.n.m.) o el Picón de Jérez (3088 m s.n.m.) ambos en la cuenca del Alhorí, reduciéndose la altitud hacia el este, hacia el pico del Chullo (2612 m s.n.m) en la cuenca de la rambla del Castañar.

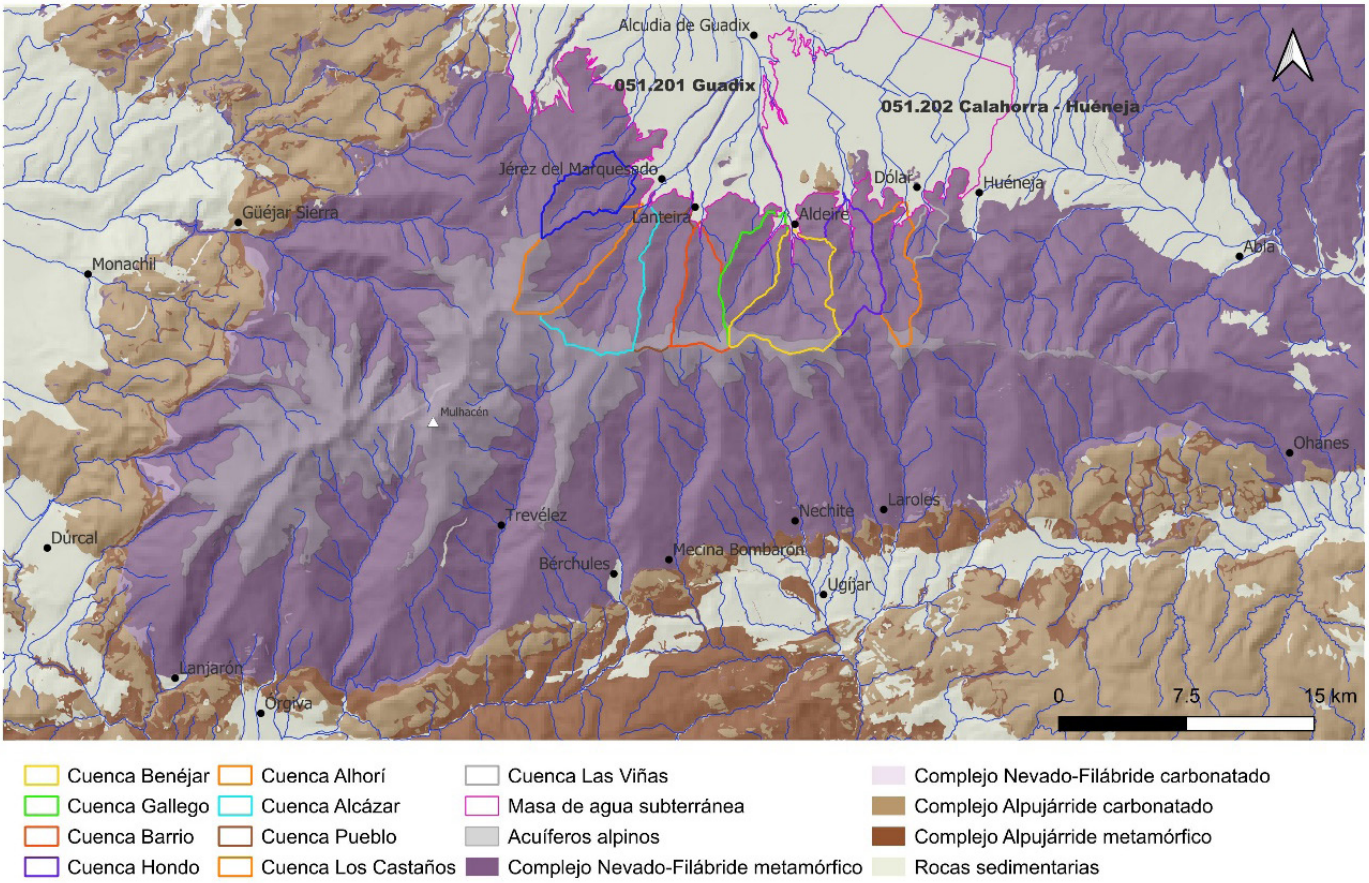


Figura 1. Mapa hidrogeológico sintético del sector de estudio.

La precipitación media anual del área estudiada, en el periodo 1997-2022, es de 524 mm, con un máximo en la cuenca del río Alhorí (614 mm) y un mínimo en la del río Benéjar (347 mm/año). Las temperaturas medias anuales están comprendidas entre los 5,5 °C (cuenca Alcázar) y los 12,2 °C en el extremo más oriental (cuenca Viñas). La precipitación en forma de nieve representa entre un 45-50%, en las cuencas más occidentales y el 5-8% en las más orientales, siendo la media en torno al 30%.

La litología aflorante en la falda norte de Sierra Nevada se corresponde, casi en su totalidad, con materiales metamórficos intensamente alterados, resultado de procesos de disgregación física y alteración química de los esquistos pertenecientes al Complejo Nevado-Filábride. En los sectores de alta montaña, por encima de los 2300-2500 m s.n.m., afloran depósitos cuaternarios de origen glaciar y periglaciar, que incluyen circos glaciares relictos, morrenas y glaciares rocosos con cubetas de sobreexcavación. Más al norte y a menor altitud, afloran los materiales neógenos y cuaternarios que rellenan la cuenca sedimentaria de Guadix.

Las citadas formaciones geológicas dan lugar a tres tipos de acuíferos en las zonas investigadas. A mayor altitud, por encima de los 2100-2200 m s.n.m. afloran los materiales producto de los procesos de alteración glaciar y periglaciar, que dan lugar a acuíferos de alta montaña, en adelante denominados acuíferos alpinos. Subyacentes a los depósitos glaciares y periglaciares se disponen esquistos metamórficos, que actúan como nivel de base de los acuíferos alpinos. Por debajo de la altitud antes indicada afloran los esquistos, en su mayor parte alterados. Esta zona de alteración presenta espesores variables, entre menos de un metro y más de 20 m, en zonas concretas. Esta zona alterada superficial permite el flujo del agua subterránea, que está muy condicionado por la pendiente de la zona de contacto entre el esquisto alterado y el que no lo está, que hace de base impermeable de este acuífero pobre, libre y en pendiente. Estos acuíferos se disponen en continuidad lateral con los depósitos detríticos neógenos y cuaternarios que conforman el relleno sedimentario de la depresión de Guadix y los Llanos del Marquesado, actuando este gran acuífero detrítico como unidad receptora de la escorrentía que proviene de esta parte de Sierra Nevada.

La recarga de los materiales permeables se produce por infiltración del agua de precipitación y por fusión de nieve. El agua que se infiltra recarga a los acuíferos alpinos y a los acuíferos asociados a la zona de alteración de los esquistos, ambos con escasos espesores saturados, y descarga a través de los cauces superficiales de primer orden y por los numerosos manantiales existentes en las laderas de las cuencas hidrológicas. Las surgencias se localizan fundamentalmente en la zona de alteración superficial de los esquistos y de forma secundaria en el límite entre los acuíferos alpinos y los esquistos alterados, debido al contraste de permeabilidad existente entre ambos tipos de materiales. Hacia las cotas más bajas la densidad de manantiales se reduce, coincidiendo con la presencia de una densa cubierta de masa forestal.

Los ríos, con pendientes elevadas y trazados rectilíneos en dirección norte-sur, presentan barrancos encajados en las zonas medias de la cuenca, con fuerte capacidad erosiva. Los hidrogramas suelen ser nivales, con importantes caudales de base debido a las altas tasas de infiltración del agua de fusión de la nieve en las zonas altas de las cuencas y por el drenaje diferido del agua subterránea desde los acuíferos alpinos y los asociados a la zona de alteración de los esquistos hacia los ríos.

En estas cuencas existen acequias de careo, aunque solo se mantienen operativas las de El Corazón y Jaral, en la cuenca del Alhorí. Estas acequias derivan el agua del deshielo para regar pastos y para infiltrarla en las laderas. No son acequias tan importantes como las de la cara sur de Sierra Nevada. Los caudales máximos medidos durante el deshielo no superan en ninguno de los casos los 50 l/s. Durante los últimos diez años, la Comunidad de Regantes de Jerez del Marquesado, en colaboración con la UGR, ha mantenido el funcionamiento ambas acequias.

Por encima de 2.800 m s.n.m. la cubierta vegetal es mínima, entre esta altitud y los 2.000 m s.n.m. dominan los pastizales naturales de alta montaña, entre los que destacan los borreguiles, matorrales y las comunidades rupícolas. Por debajo de los 2.000 m s.n.m., existe una importante masa forestal de pino de repoblación, que fue desarrollada a mediados del siglo XX (Figura 2). Se trata de un extenso y denso bosque de pinos maduros con alto grado de estancamiento (alta densidad y competencia entre pies) y algunas encinas dispersas que no conforman bosques de entidad. La cobertura media de pino de repoblación ronda el 40% de la superficie de las cuencas, aunque se llegan a máximos entorno al 60% como ocurre en la cuenca del río Gallego. Los mínimos siempre superan el 30%. En las cotas más bajas, ya sobre los materiales cuaternarios y neógenos, existen zonas de cultivo que se extienden a lo largo de la depresión de Guadix y los Llanos de la Calahorra, en donde, a partir de la localidad de Alcudia, y hacía el oeste son frecuentes las plantaciones de chopos, en las terrazas de los valles fluviales (Figura 3).

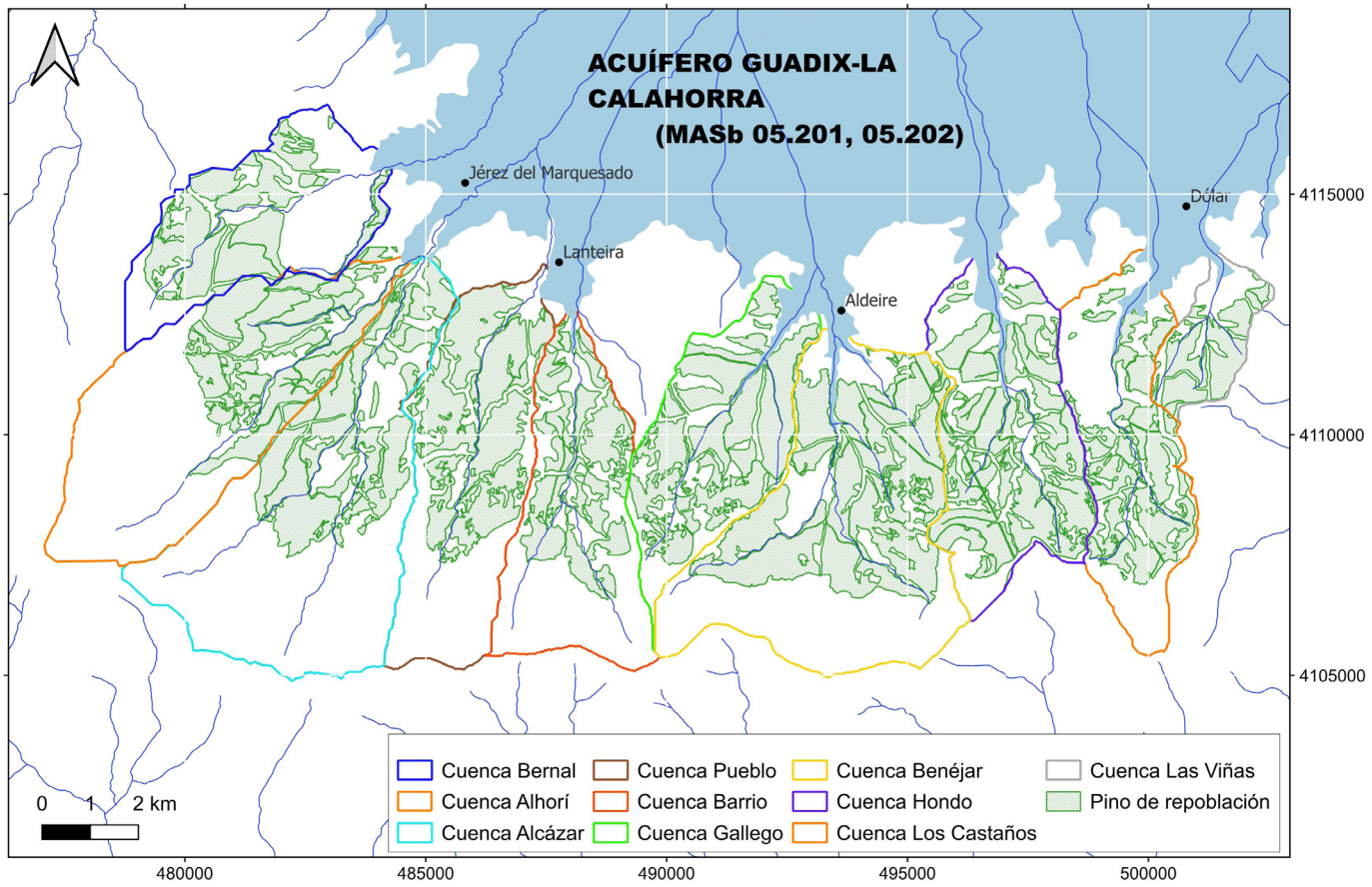


Figura 2. Cobertura de pino de repoblación por cuencas.

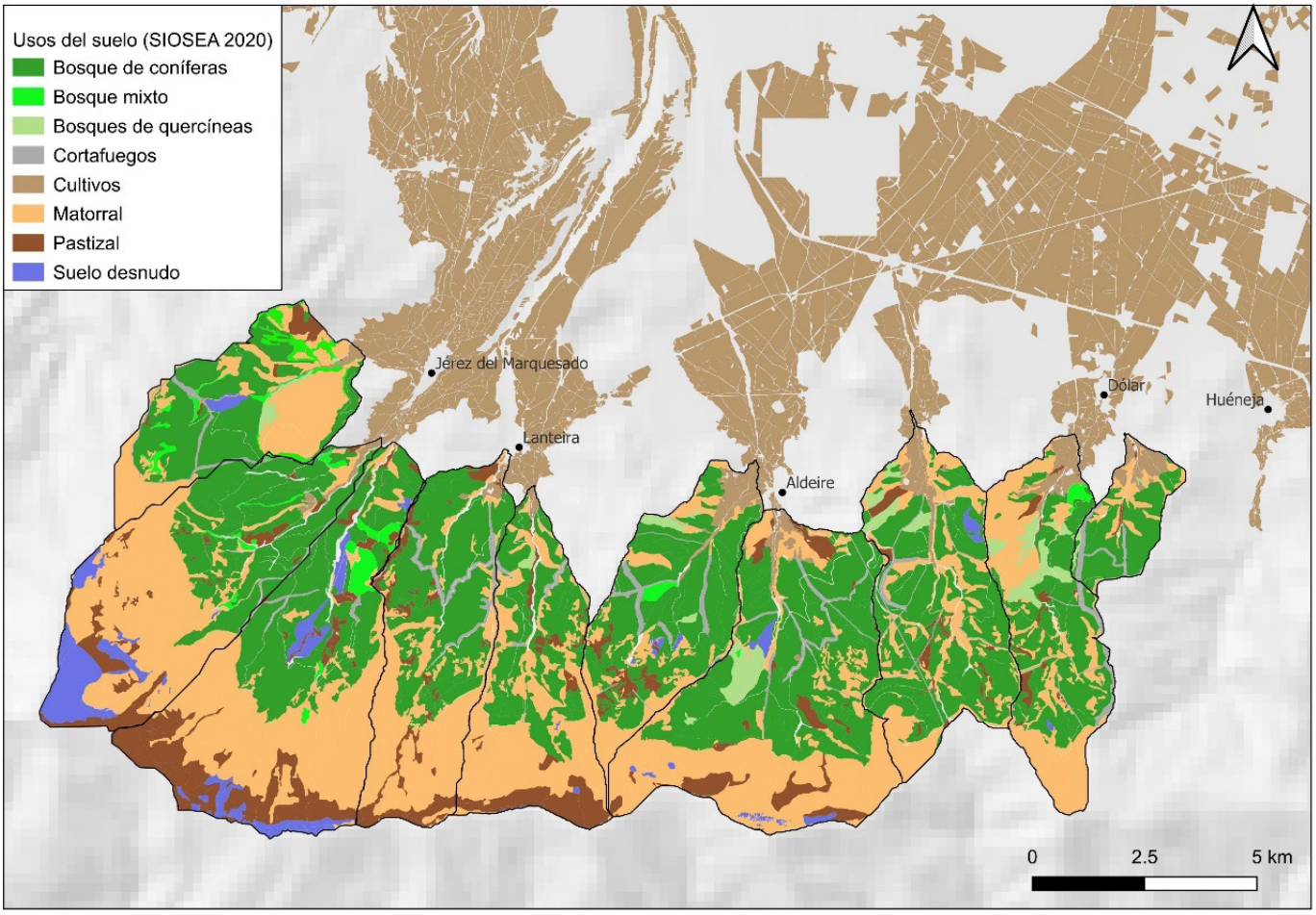


Figura 3. Usos del suelo (SIOSEA 2020).

4. Material y métodos

Con el fin de caracterizar el funcionamiento hidrológico de las cuencas de la vertiente norte de Sierra Nevada y simular el balance hídrico del suelo bajo distintos escenarios de gestión forestal, se llevó a cabo un análisis basado en datos instrumentales y campañas de campo:

Control de caudales. Los datos de caudal se obtuvieron a partir del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. En el área de estudio se dispone de dos estaciones de aforo con registros continuos desde 1994: A-53 (río Alhorí, Jérez) y A-42 (río del Barrio, Lanteira) (Figura 4). Los caudales medios registrados, en el periodo de estudio, han sido de 244 l/s y 110 l/s, respectivamente. De forma complementaria, se realizaron campañas de aforo directo, con una cadencia mensual, en los ríos Bernal (acequia Alrután) y Alcázar (área recreativa La Tizná), así como en cuatro secciones a lo largo del cauce del río Alhorí, desde su cabecera hasta la estación de aforo A-53. Los aforos diferenciales en este río permitieron caracterizar el comportamiento hidrodinámico del río Alhorí, evidenciando un régimen ganador a lo largo de todo el tramo analizado, con un incremento progresivo del caudal aguas abajo.

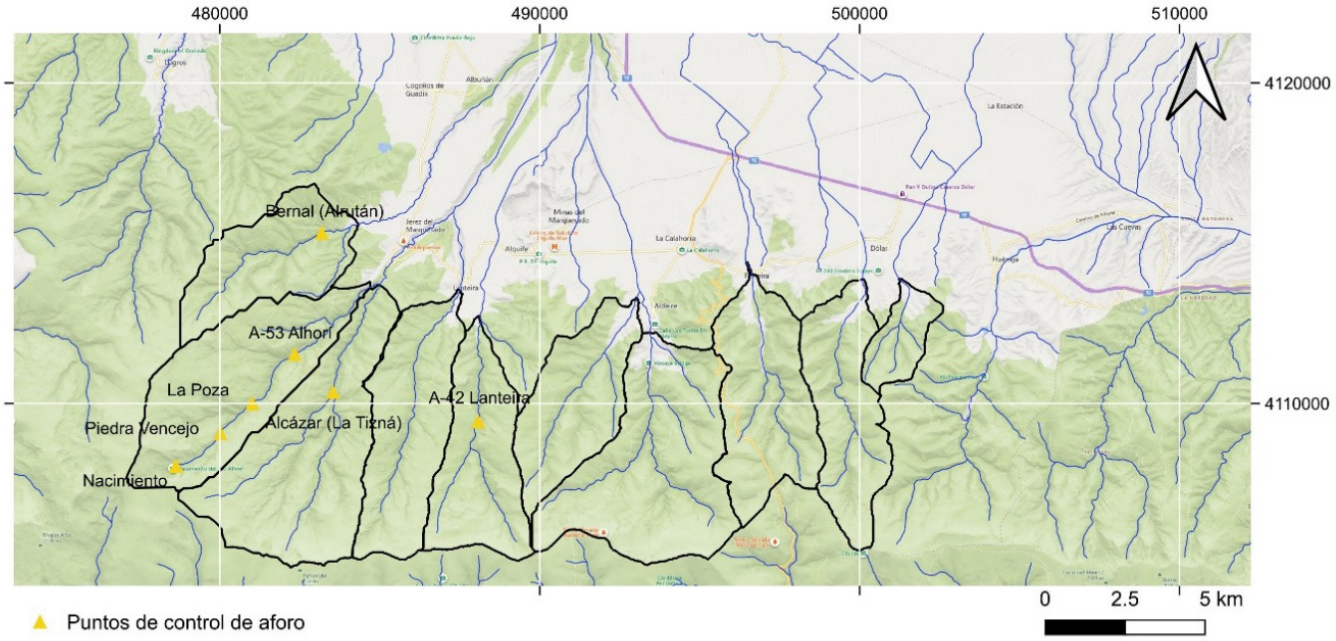


Figura 4. Delimitación de cuencas de estudio con puntos de control de caudales.

Puntos de control de aforo	X (m)	Y (m)
Arroyo Bernal	483188	4115328
A53 Río Alhorí	482335	4111549
La Poza. Río Alhorí	481012	4110005
Piedra Vencejo. Río Alhorí	480013	4109079
Nacimiento. Río Alhorí	478626	4108054
Río Alcázar (La Tizná)	483534	4110362
A42 Lanteira	488076	4109450

Nota: Las coordenadas corresponden al sistema de referencia ETRS89.

Tabla 1. Localización de puntos de control de aforo.

Las mediciones manuales de caudal se realizaron mediante el método de dilución con trazador salino, utilizando cloruro sódico (NaCl) inyectado de forma instantánea en el cauce, a una dosis aproximada de 5 g de NaCl por litro·segundo de caudal estimado. A unos 50 m aguas abajo del punto de inyección se instaló un caudalímetro tipo salinómetro modelo EasyFlow (JDC Electronic SA), que registró la variación de la conductividad eléctrica y permitió el cálculo del caudal una vez restablecidos los valores basales del río.



Foto1. Instante de la inyección de caudal en el río para realización de aforo manual y detalle del equipo de medición Easyflow.

La incertidumbre se minimizó siguiendo el protocolo estándar (Hudson y Fraser, 2005), mediante la verificación in situ y la repetición de las mediciones en caso de resultados inconsistentes. El error del sensor es de hasta un 5 %, mientras que la incertidumbre inherente al método se estima en torno al 5 % (Hudson y Fraser, 2005). En todos los casos se utilizó un segundo salinómetro para contrastar la validez de los resultados.

Calidad del agua y composición isotópica. Se monitorizó la señal isotópica del agua de lluvia y de los ríos con el objetivo de determinar el origen del agua, distinguiendo entre aportes superficiales y subterráneos. Las muestras se recogieron en tres puntos de precipitación y a lo largo de los ríos Alhorí, Alcázar y Bernal, así como en algunos manantiales seleccionados. La captación de agua de lluvia se realizó mediante tres pluviocaptores instalados en el núcleo urbano de Jérez del Marquesado, en la casa forestal El Posterillo y en el refugio del Picón de Jérez, y fueron posteriormente analizadas para determinar su composición isotópica (Tabla 2 y Foto 2).

Pluviocaptores	X (m)	Y (m)	Z (m s.n.m.)
Jérez Pueblo (centro Guadalinfo)	485606	4114880	1260
Casa forestal El Posterillo	483151	4112355	1515
Refugio Picón de Jérez (Postero alto)	482032	4110116	1885

Nota: Las coordenadas corresponden al sistema de referencia ETRS89.

Tabla 2. Localización de pluviocaptores.



Foto 2. Pluviocaptores en Casa forestal el Posterillo (izquierda) y Refugio Postero Alto (derecha).

La toma de muestras de los ríos se realizó en los mismos puntos donde se efectuaron los aforos manuales, así como en algunos manantiales cercanos a La Poza, Piedra Vencejo y el nacimiento del río Alhorí (Tabla 3 y Foto 3).

Toma de muestras	X (m)	Y (m)	Z (m s.n.m.)
Manantial La Pozá	481094	4110037	1782
Manantial Pasto Alhorí	480150	4109040	2068
Manantial Nacimiento río Alhorí	478552	4108000	2669

Nota: Las coordenadas corresponden al sistema de referencia ETRS89.

Tabla 3. Localización de manantiales muestreados.



Foto 3. Durante la toma de muestras en los distintos manantiales.

Control de temperatura del agua del río. Para el seguimiento térmico se instalaron sensores de presión y temperatura a distintas profundidades en puntos seleccionados del cauce de los ríos (Figura 4). Este control permitió evaluar la variabilidad térmica del agua a distintas profundidades. El agua de menor profundidad es más sensible a las fluctuaciones de temperatura ambiental y muestra variaciones estacionales más pronunciadas, mientras que el agua más profunda atenúa estos cambios, reflejando una respuesta térmica más estable.



Foto 4. Detalle del sensor instalado en el lecho del río Alhorí.

Modelización hidrológico-forestal. La simulación se llevó a cabo utilizando el modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica **TETIS v9.0**, desarrollado por la Universitat Politècnica de València (UPV, 2020). El modelo permite resolver la respuesta hidrológica de la cuenca frente a precipitaciones de lluvia y nieve, considerando los procesos físicos involucrados y empleando un enfoque de modelización distribuida de tipo conceptual. La generación de escorrentía se calcula mediante un balance hídrico a escala de celdas, asumiendo que el agua se distribuye entre seis niveles de almacenamiento interconectados (Figura 5).

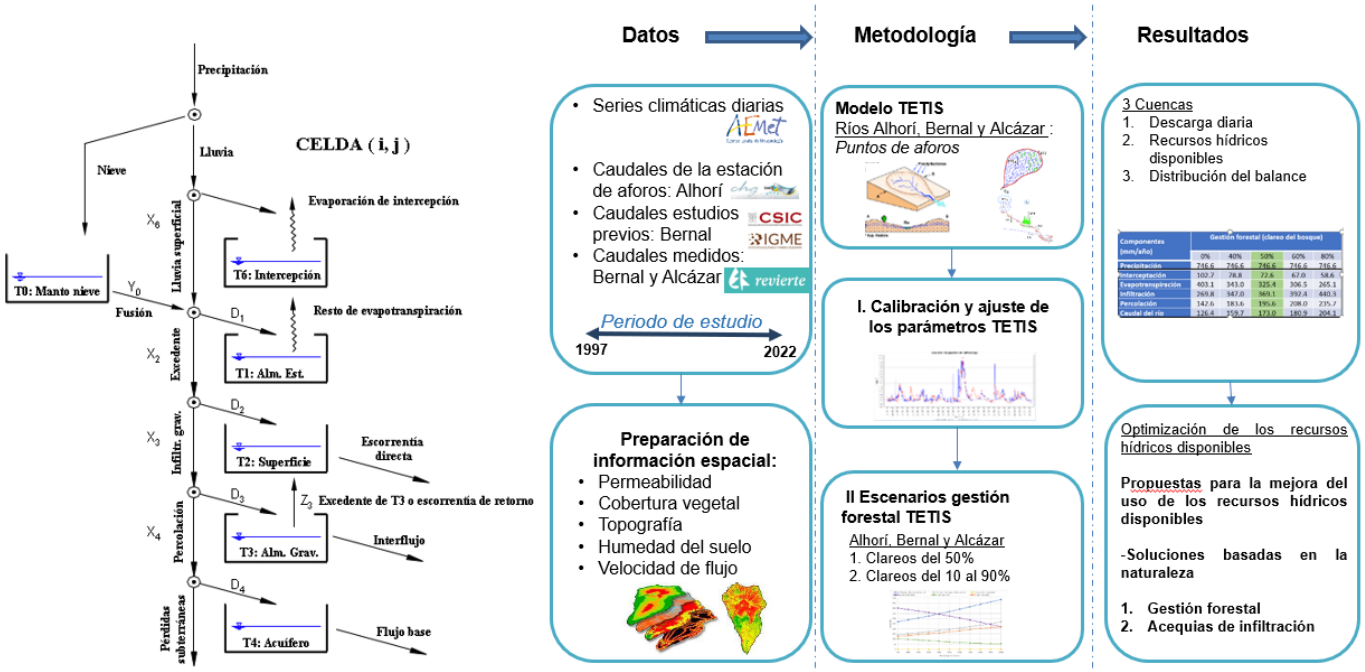


Figura 5. Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v9.0.

Figura 5.- Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v9.0.

La información previa que requiere la modelización hidrológica es:

- ***Datos meteorológicos.*** Las series climáticas se obtuvieron a partir de la rejilla **ROCIO** desarrollada por AEMET (Nota Técnica 24, Peral et al., 2017), que proporciona datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, y evapotranspiración desde 1951 hasta la actualidad, con una resolución espacial de 5×5 km. Los valores espaciales y temporales se asignaron a una malla de nodos para su integración en el modelo hidrológico. (https://sarai-data.igme.es).

- ***Descriptores del terreno***. Se utilizaron variables geomorfológicas derivadas de un modelo digital de elevaciones, incluyendo celdas acumuladas, dirección de flujo, pendientes y velocidad de ladera, así como mapas de parámetros hidrológicos relevantes para la modelización, tales como almacenamiento estático del suelo (Hu), capacidad de infiltración (Ks), percolación (Kp) y conductividad hidráulica. A cada uso del suelo presente en la cuenca se asignó un coeficiente de cultivo (Kc) mensual (12 valores), cuya reducción porcentual combinada con la intercepta-ción permitió simular los efectos del clareo forestal. Toda esta información se espacializó con resolución de 50×50 m a partir de datos de la Red de Información Ambiental (REDIAM) de la Junta de Andalucía (https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/acceso-rediam/descargas).

- ***Hidrogramas.*** Los datos de caudal provienen de estaciones de aforo monitorizadas por el **Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH)** de la Confederación Hidrográfica del Guadalquiviry de campañas mensuales desarrolladas en el marco del Proyecto REVIERTE. Estos registros se utilizaron para la calibración del modelo hidrológico (https://www.chguadalquivir.es/saih/).

- ***Parcelas experimentales en pinares de repoblación.*** Para evaluar de manera directa los efectos de la gestión forestal sobre la recarga del acuífero y el caudal de los ríos, se seleccionaron 4 parcelas experimentales, a 2012 m s.n.m, en la cuenca del río Alhorí, en repoblaciones maduras de *Pinus sylvestris* caracterizadas por mantener la densidad inicial de plantación (estancadas) y ausencia de tratamientos previos.

  En abril de 2025 se aplicó una clara de alta intensidad (>50 % de eliminación de pies) en dos parcelas, manteniéndose otras dos como control. Las parcelas se dispusieron aguas arriba y aguas abajo de la acequia del Corazón para evaluar el efecto combinado de la gestión forestal y la recarga inducida por careos sobre la estructura forestal y el balance hidrológico (Tabla 4 y Figura 6). En todas ellas se instalaron sensores automáticos para el seguimiento de variables hidrológicas y de crecimiento, en concreto: sensores de humedad del suelo, dendrómetros, medidores de flujo de savia, piezómetros y vertederos (Figura 7).

			Antes del tratamiento			Después del tratamiento		
Parcela	**X_UTM30**	**Y_UTM30**	**G**	**D**	**MD**	**G**	**D**	**MD**
CU	480535	4112482	33	1000	20	-	-	-
CD	480571	4112446	43	1548	18	-	-	-
TU	480647	4112722	46	1392	20	23	564	22
TD	480703	4112657	37	988	21	18	392	24

Tabla 4. Características estructurales de las parcelas de estudio (CU: control "aguas arriba acequia", CD: control "aguas abajo acequia", TU: tratamiento "aguas arriba acequia", TD: tratamiento "aguas abajo acequia") antes y después de la ejecución de los tratamientos en abril de 2025. G: Densidad de área basimétrica (m2/ha), D: densidad de pies (pies/ha), MD: diámetro medio (cm). Las coordenadas (en sistema GPRS 25830) para cada parcela se corresponden con sus centroides.

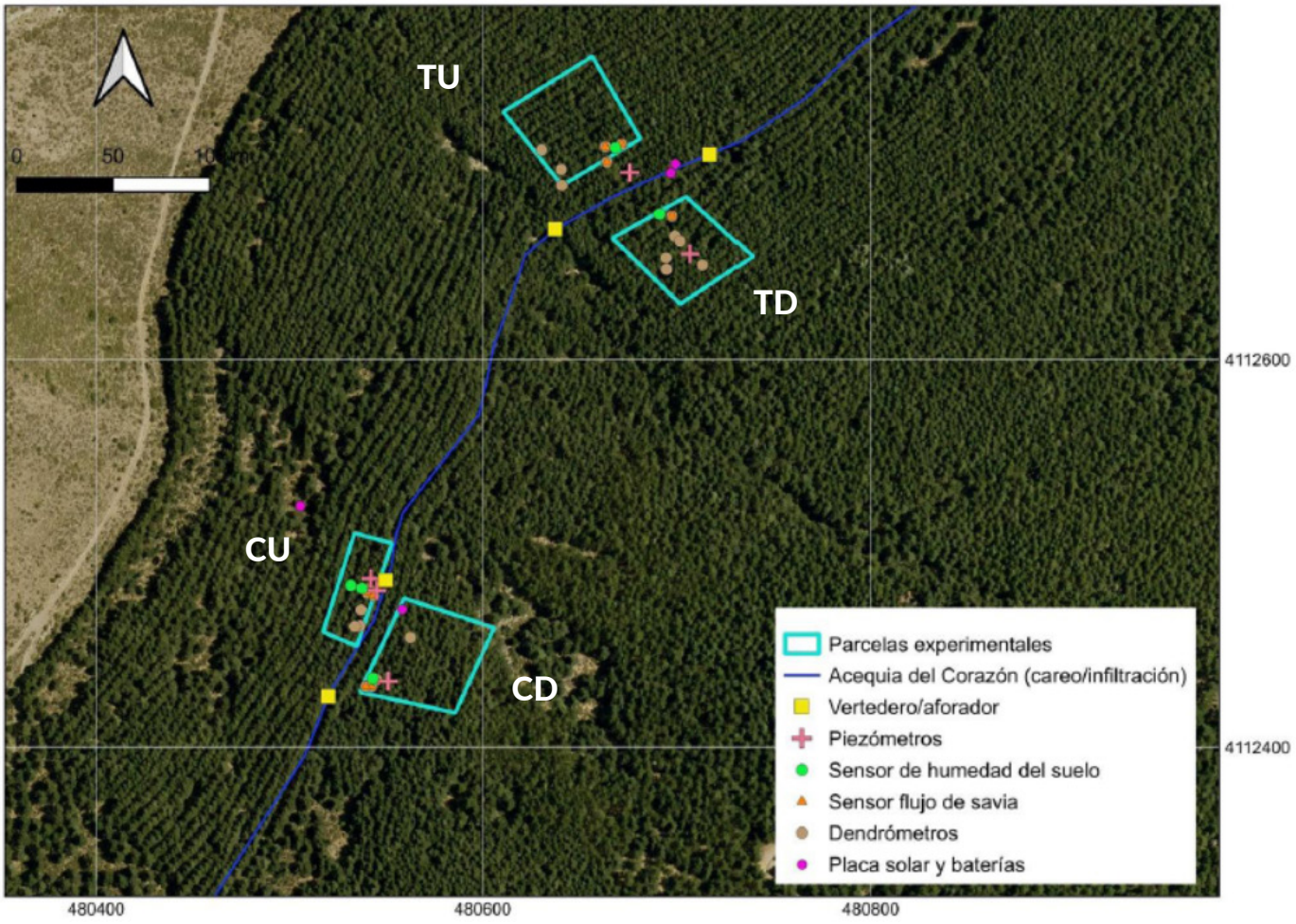


Figura 6. Delimitación de las parcelas experimentales y sensores instalados.

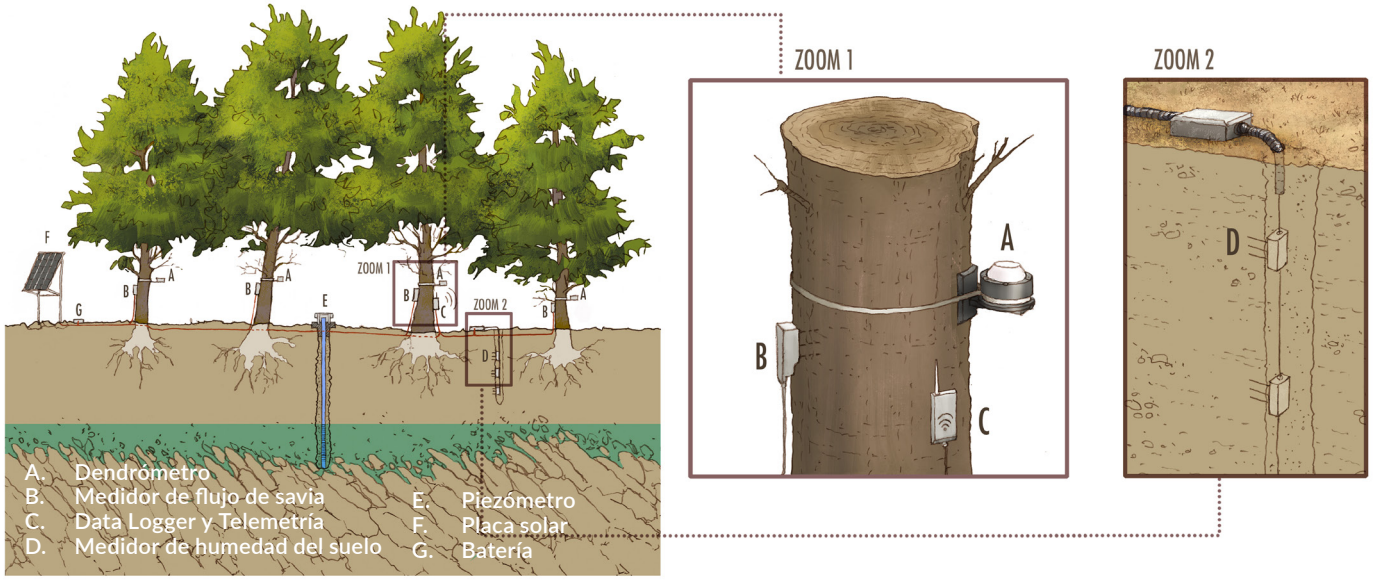


Figura 7. Detalle de los sensores de control.

- ***Cartelería e ilustraciones.*** Las parcelas experimentales fueron identificadas mediante carteles explicativos de las actuaciones realizadas, con el fin de facilitar la localización y seguimiento de las intervenciones en campo (Figura 8).

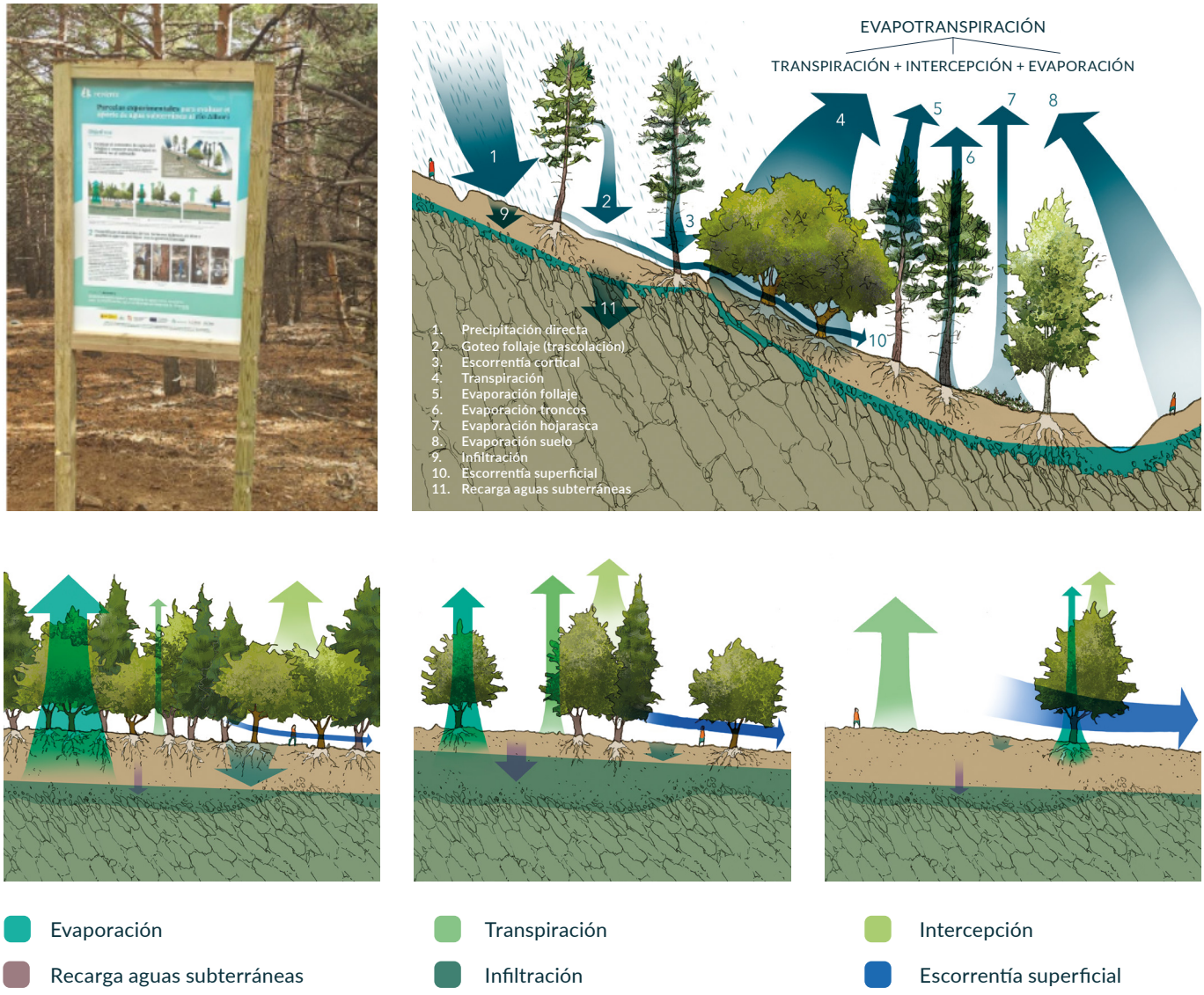


Figura 8. Detalle de la cartelería en las parcelas experimentales.

- ***Parcelas experimentales en choperas.*** Para evaluar la recarga que se puede producir con los retornos de riego en parcelas de chopo, se monitorizó una parcela de chopos en la localidad de Purullena, muy cercana a Guadix (Figura 9). Para controlar el nivel piezométrico del acuífero y medir la recarga se necesitaba que la plantación de chopos dispusiera de un pozo en el que se pudiera medir el nivel freático. Esta tarea resultó tremendamente compleja, porque también era necesario que el pozo no se pusiera en funcionamiento durante el periodo de estudio. Tras una búsqueda intensa a través de asociaciones y comunidades de regantes, se seleccionaron dos parcelas, una en Guadix y otra en Purullena. En la primera su propietaria nos indicó que el pozo se utilizaba para riego durante todo el verano. En la parcela de Purullena, su propietario manifestó que solo se utilizaba en caso de que hubiera problemas con la disponibilidad de agua superficial que le proporcionaba la comunidad de regantes. Se procedió, por tanto, a acondicionar una boquera de riego en la entrada de la parcela de Purullena, con un vertedero de lámina delgada y un sensor de presión para controlar el caudal de riego y se instaló un sensor piezométrico en el interior del pozo para controlar las variaciones de nivel del agua subterránea (Figura 10).

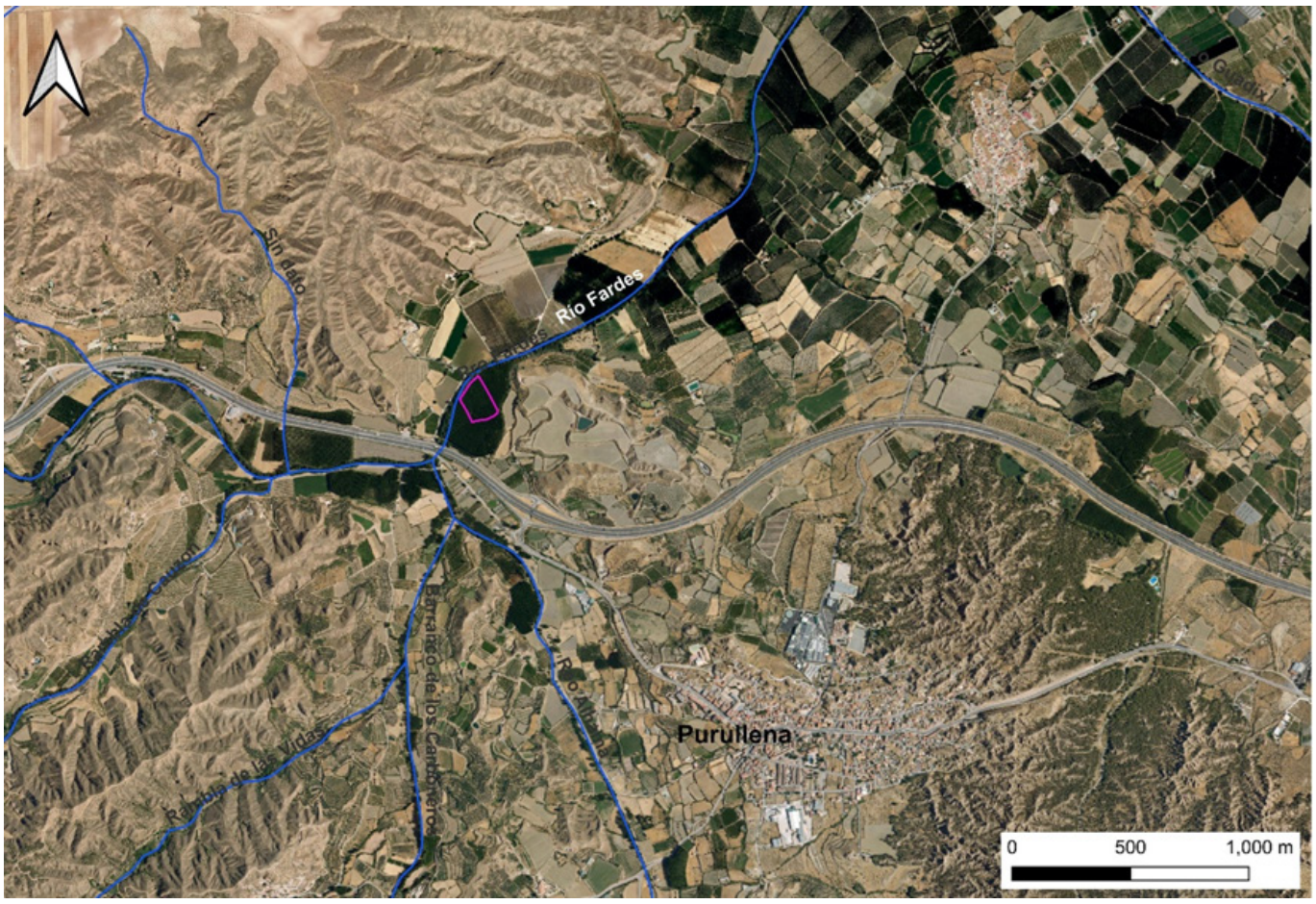


Figura 9. Situación de la chopera monitorizada en la vega de Purullena.



Figura 10. Acondicionamiento de una derivación de riego con un vertedero de lámina delgada para controlar el caudal de riego y de la instalación de un sensor de presión y temperatura en un pozo ubicado en el interior de la parcela de control.

5. Resultados

5.1 Modelización hidrológica

Los modelos hidrológicos distribuidos se implementaron con resolución temporal diaria y resolución espacial de 50 m. La calibración se realizó mediante factores correctores (FC) asociados a la formación y distribución de la escorrentía, previa realización de un análisis de sensibilidad de parámetros.

El objetivo de la calibración fue minimizar la diferencia entre los caudales observados y los simulados por el modelo. Como índices de evaluación del ajuste se emplearon el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error de volumen (Ev) (Wouter et al., 2019).

La simulación se aplicó a una serie temporal de 25 años (1997–2022), previa calibración y validación en series más cortas. Una vez ajustado el modelo, se evaluaron los efectos de diferentes escenarios de gestión forestal, con niveles de clareo comprendidos entre el 10% y el 80%.

Cuencas vertientes a Jérez del Marquesado (acuífero de Guadix)

Las particularidades de cada una de las tres cuencas (Bernal, Alhorí, Alcázar), junto con la disponibilidad variable de datos de aforo, motivaron que la modelización se realizara de manera independiente, empleando parámetros de calibración específicos para cada cuenca.

Los indicadores de desempeño obtenidos (Tabla 5) se consideran adecuados. Aunque el modelo no reproduce completamente los picos máximos de caudal, la fase de recesión y el agotamiento de los caudales están correctamente ajustados, lo que se interpreta como una calibración satisfactoria (ejemplo para río Alhorí en Figura 11).

Cuencas	Índice de Nash-Sutcliffe (NSE)	Error en volumen (Ev)
Río Bernal	0.3	1.3%
Río Alhorí	0.5	5.5%
Río Alcázar	0.8	2.4%

Tabla 5. Resultados de los indicadores de desempeño en las cuencas vertientes a Jérez del Marquesado.

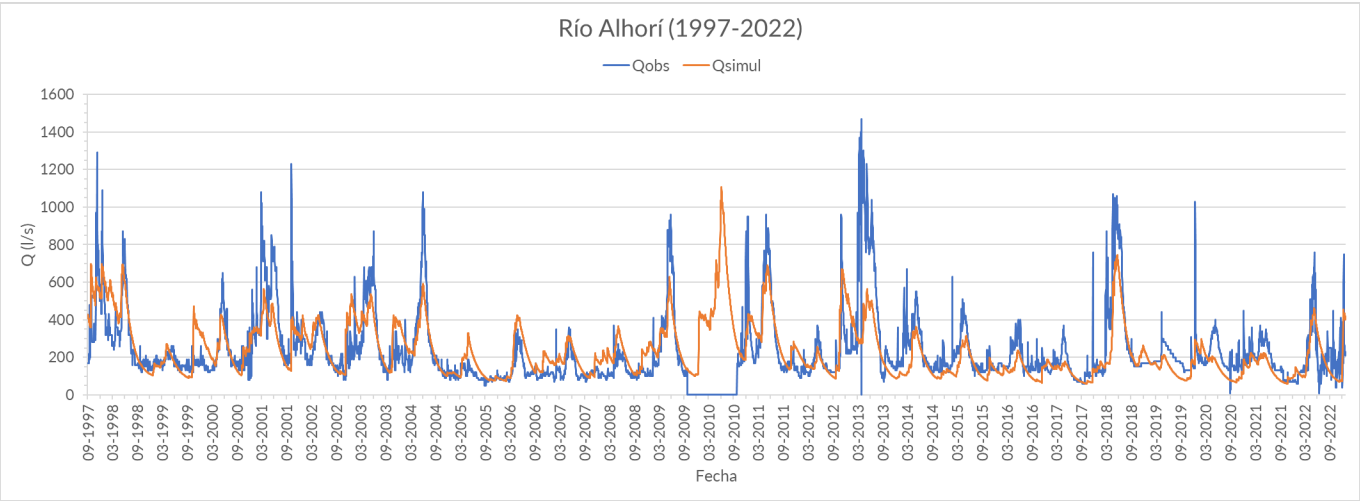


Figura 11. Calibración del caudal del río Alhorí (1997-2022).

Los balances obtenidos en cada una de las cuencas, con la cobertura vegetal actual, se recogen a continuación en la siguiente tabla.

Balance (mm/año)	Cuenca Bernal	Cuenca Alhorí	Cuenca Alcázar
Precipitación	538.7	613.6	492.5
Lluvia en superficie	421.6	343.8	243.7
Nieve	117.0	269.8	248.8
% nieve	21.7%	43.9%	50.5%
Interceptación	84.6	50.8	45.0
Tasa Interceptación	15.7%	8.3%	9.1%
Evapotranspiración	418.0	178.7	77.8
Evapotranspiración real	502.6	229.5	122.7
Tasa Evapotranspiración	93.3%	37.4%	24.9%
Escorrentía directa	0.0	0.0	0.1
Infiltración	36.1	383.6	369.8
Tasa Infiltración	6.7%	62.5%	75.1%
Interflujo	27.0	248.4	342.7
Percolación	9.1	132.2	26.9
Flujo base	8.3	130.9	26.9
Tasa de recarga (% percolación)	1.7%	21.5%	5.5%
Tasa de recarga (% percolación+interflujo)	6.7%	62.0%	75.1%
Superficies (km^2)			
Cuenca	14.2	23.4	27.0
Cobertura de pino	5.1	8.2	8.2
% cobetura pino/cuenca	35.9%	35.1%	30.4%
Resumen			
PPT (hm3/año)	7.6	14.3	13.3
Escorrentia total (mm/año) (*)	35.3	379.3	369.7
Escorrentia total (l/s)	15.9	281.2	316.4
Escorrentía total (hm3/año)	0.5	8.9	10.0
Recarga Total 1997-2022 (hm^3/año)	**19.3**		

(*) Escorrentía Total = Escorrentía directa+Interflujo+Flujo base.

Tabla 6. Balances resultantes de la simulación hidrológica.

La cuenca del Bernal presenta el mayor porcentaje de interceptación (16 %), mientras que las cuencas del Alhorí y Alcázar muestran valores similares (8-9%), debido a la presencia de áreas de cabecera dominadas por suelo desnudo y pastizal-matorral. Como consecuencia, la evapotranspiración real (ETR) en Bernal alcanza el 93%, frente al 25-37 % de Alhorí y Alcázar, lo que favorece una mayor infiltración y recarga subterránea en estas últimas cuencas (62-75%) frente al 7% del Bernal. El aporte subterráneo conjunto de las tres cuencas al acuífero de Guadix se estima en 19 hm^3/año, siendo el 97% procedente de Alhorí y Alcázar y solo un 3% del Bernal.

La precipitación media anual en la cuenca del Bernal es de 539 mm (7,6 hm^3/año), con temperatura media de 6,6 °C. La evapotranspiración potencial (ETP) alcanza 662 mm/año, mientras que la ETR es de 500 mm/año, con máximos en junio. El caudal medio anual simulado es de 0,5 hm^3, alcan-

zando un máximo de 1 m^3/s en abril y mayo y un mínimo de 0,1 m^3/s entre agosto y octubre. En la cuenca del río Alhorí, la precipitación media anual es de 614 mm (14,3 hm^3/año) y la temperatura media de 6,5 °C. La ETP es de 486 mm/año (13,3 hm^3/año) y la ETR de 230 mm/año, con caudal medio anual simulado de 8,9 hm^3. La cuenca del Alcázar presenta precipitación media de 493 mm/año (13,3 hm^3/año) y temperatura media de 5,5 °C, con ETP de 486 mm/año y ETR inferior a 125 mm/año, y caudal medio simulado de 10 hm^3/año. En la Figura siguiente se presenta el hidrograma para la cuenca del Alhorí como ejemplo de distribución mensual de los flujos hídricos.

Precip. media	614 mm/año
Temp. media	6.5 °C
ETP media	486 mm/año
ETR media	230 mm/año
Q medio simulado	379 mm/año (8.9 hm^3/año)
Sup. cuenca	23.4 km^2

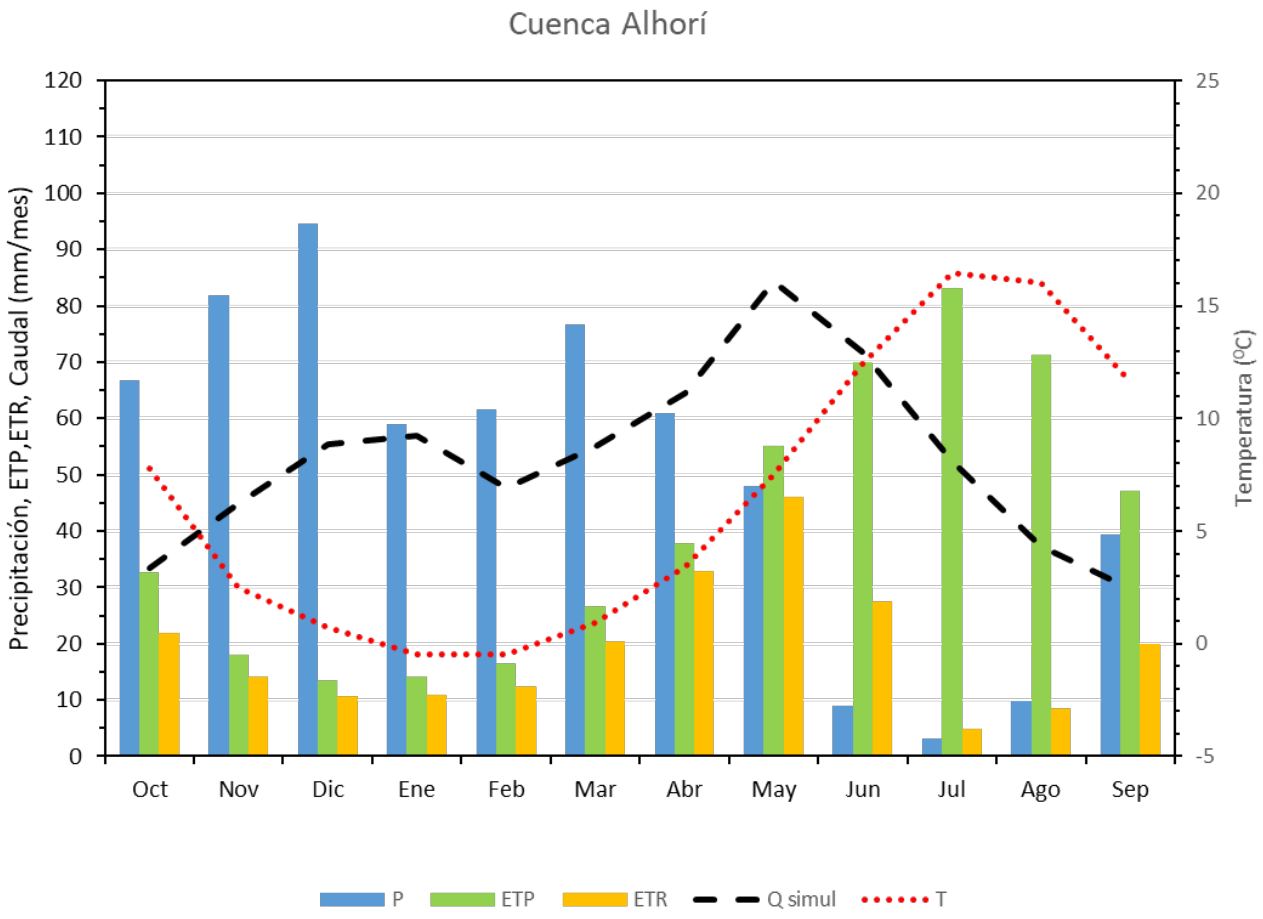


Figura 12. Hidrograma resultante de la simulación hidrológica de la cuenca del río Alhorí.

Resto de cuencas vertientes a los acuíferos de Guadix y La Calahorra

La calibración de las siete cuencas más orientales a las anteriores se realizó siguiendo los parámetros ajustados para la cuenca del río del Barrio en Lanteira (A-42), telecontrolada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Se modelizó el periodo 1997-2022, precedido de simulaciones más cortas para calibración y validación de los caudales (Tabla 6 y Figura 13). En todos los casos, se priorizó el ajuste de los agotamientos sobre los picos de caudal.

Periodos de ajuste	Índice de Nash-Sutcliffe (NSE)	Error en volumen (Ev)
2018-2022	0.6	0.1%
2002-2009	0.4	1.4%
1997-2022	0.3	0.1%

Tabla 7. Resultados de los indicadores de desempeño del río del Barrio (Lanteira).

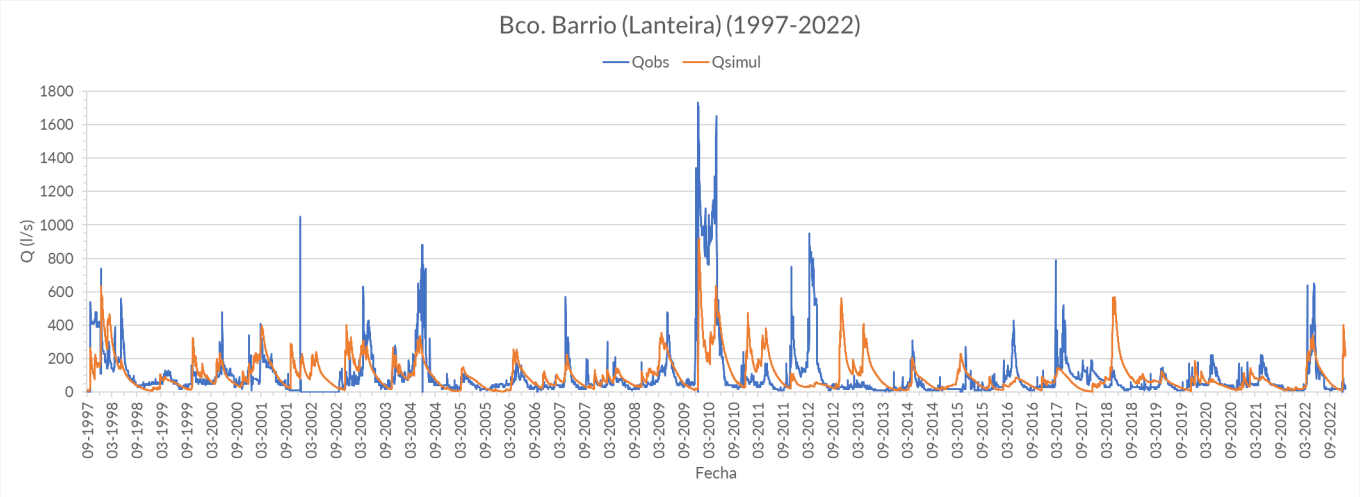


Figura 13. Calibración del caudal del río del Barrio en Lanteira. (1997-2022).

El balance medio anual (mm/año) para cada cuenca se resume en la Tabla 7. Se observa que la precipitación varía entre 347 y 493 mm/año, la tasa de interceptación entre 12 y 19%, la evapotranspiración real alrededor del 40%, y la infiltración/recarga entre 38 y 51%. El caudal medio anual simulado está comprendido entre 0,8 y 4,6 hm^3/año, siendo el aporte subterráneo total de las siete cuencas al acuífero de 23,4 hm^3/año.

La precipitación anual en las cuencas modelizadas está comprendida entre 2 y 10 hm^3, sin seguir un patrón lineal de oeste a este. En cambio, la tasa de innivación muestra un descenso progresivo desde el 35% hasta el 6%, mientras que la temperatura media aumenta gradualmente de 7 a 12 °C conforme se avanza hacia el este de la ladera norte de Sierra Nevada.

Las mayores tasas de interceptación se localizan en el extremo oriental, alcanzando un máximo de 19 % en la cuenca de la rambla Las Viñas. La evapotranspiración real media se mantiene alrededor del 40%, llegando al 42% en la misma cuenca del extremo oriental. La recarga subterránea presenta tasas comprendidas entre el 38 y el 51% de la precipitación.

Los caudales simulados anuales están comprendidos entre 3 y 4 hm^3, excepto en la cuenca de Las Viñas, donde el caudal es inferior a 1 hm^3/año. Los meses de mayor caudal son mayo, abril y marzo, siguiendo este orden conforme las cuencas se desplazan hacia el este.

El aporte total de agua subterránea de las siete cuencas vertientes al acuífero de Guadix y Llanos de la Calahorra se estima en 23,4 hm^3/año. La cuenca del arroyo del Barrio contribuye con 4,6 hm^3/año, seguida de la cuenca de Benéjar con 4,1 hm^3/año, siendo la cuenca de la rambla Las Viñas la que aporta menos agua (0,8 hm^3/año).

La variación mensual media típica de las componentes climáticas y del caudal medio simulado durante el periodo 1997-2022 se presenta en la siguiente figura.

Balance (mm/año)	Cuenca Pueblo	Cuenca El Barrio	Cuenca Gallego	Cuenca Benéjar	Cuenca Hondo	Cuenca Los Castaños	Cuenca Las Viñas
Precipitación	439,0	491,8	441,3	347,3	492,9	467,3	452,4
Lluvia en superficie	286,4	326,3	327,0	268,6	450,8	425,9	426,5
Nieve	152,6	165,5	114,5	78,7	42,1	41,4	25,9
% nieve	34,8%	33,7%	25,9%	22,7%	8,5%	8,9%	5,7%
Interceptación	55,5	59,1	65,2	59,1	85,4	79,8	86,7
Tasa Interceptación	12,6%	12,0%	14,8%	17,0%	17,3%	17,1%	19,2%
Evapotranspiración	174,8	183,0	177,3	141,2	190,0	167,8	193,4
Evapotranspiración real	230,4	242,1	242,5	200,4	275,5	247,7	280,1
Tasa Evapotranspiración	39,8%	37,2%	40,2%	40,7%	38,6%	35,9%	42,7%
Escorrentía directa	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración	209,1	250,0	199,7	146,9	217,4	219,9	172,7
Tasa Infiltración	47,6%	50,8%	45,2%	42,3%	44,1%	47,1%	38,2%
Interflujo	96,5	118,2	100,2	62,5	114,9	112,5	83,0
Percolación	112,8	131,8	99,7	84,4	102,5	107,9	90,3
Flujo base	115,9	134,7	103,0	84,4	102,5	111,0	93,6
Tasa de recarga (% percolación)	25,7%	26,8%	22,6%	24,3%	20,8%	23,1%	20,0%
Tasa de recarga (% percolación+interflujo)	47,7%	50,8%	45,3%	42,3%	44,1%	47,1%	38,3%
Superficies (km^2)							
Cuenca	18,0	18,2	14,6	27,6	17,8	14,655	4,575
Cobertura de pino	8,3	5,6	8,6	12,6	9,9	5,9	2,6
% cobetura pino/cuenca	46%	30,6%	59,3%	46%	55,6%	40%	56%
Resumen							
PPT (hm3/año)	7,9	8,9	6,4	9,6	8,8	6,8	2,1
Escorrentia total (mm/año) (*)	212,4	252,9	203,3	146,9	217,4	223,4	176,6
Escorrentia total (l/s)	121,2	145,7	94,1	128,6	122,7	103,8	25,6
Escorrentía total (hm3/año)	3,8	4,6	3,0	4,1	3,9	3,3	0,8
Recarga Total 1997-2022 (hm^3/año)	**23,4**						

(*) Escorrentía Total = Escorrentía directa+Interflujo+Flujo base.

Tabla 8. Balances resultantes de la simulación hidrológica en las distintas cuencas.

Precip. media	492 mm/año
Temp. media	7.6 °C
ETP media	464 mm/año
ETR media	242 mm/año
Q medio simulado	253 mm/año (4.6 hm^3/año)
Sup. cuenca	23.4 km^2

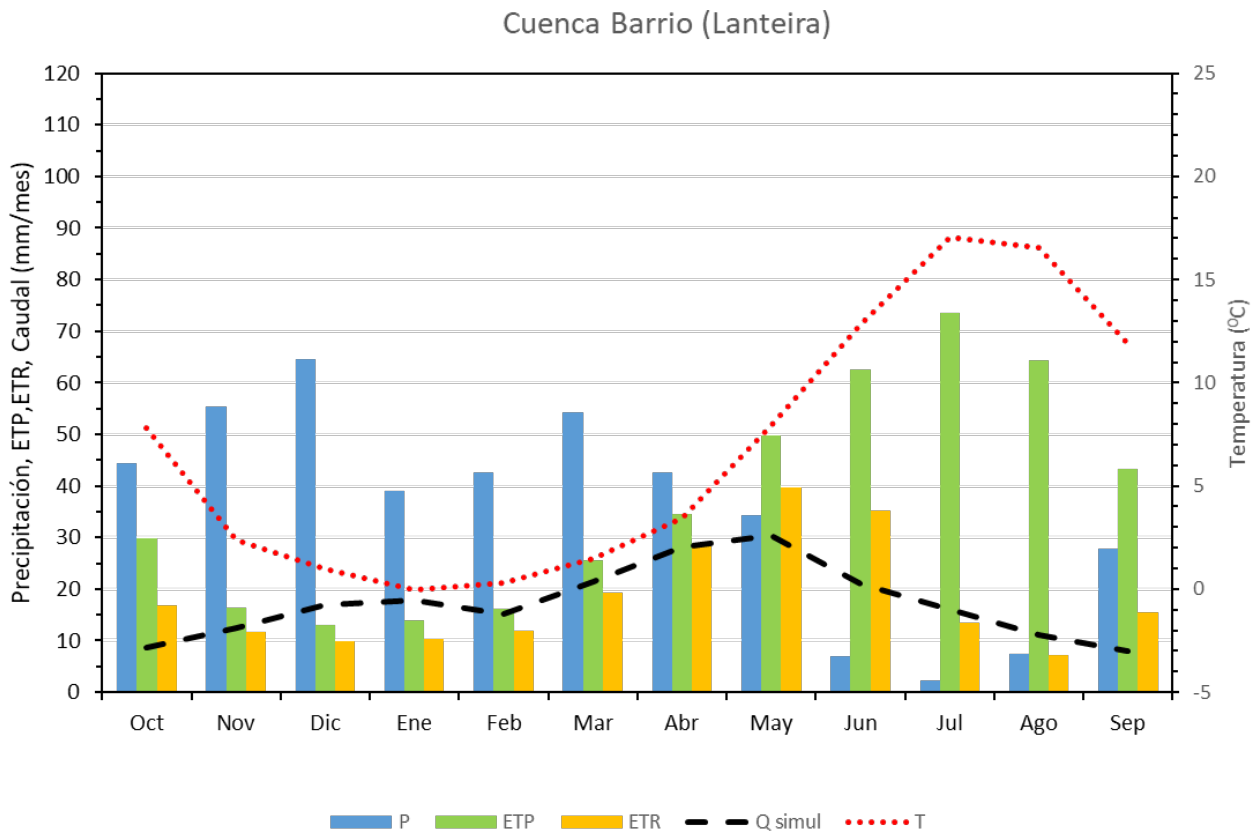


Figura 14. Hidrograma resultante de la simulación hidrológica de la cuenca del río del Barrio.

5.2 Simulación de distintos escenarios de gestión forestal

La cubierta forestal de pino mediterráneo de repoblación ocupa un 42% (75 km^2) de la superficie modelizada (180 km^2). La simulación de distintos escenarios de gestión forestal (10-80 %) mostró que el aumento del porcentaje de clareo reduce la interceptación y la evapotranspiración, aumentando la infiltración y la recarga subterránea.

Los balances promedio para distintos niveles de clareo (incrementos del 10 %) se presentan en la Tabla 8, donde se observa que la ganancia de caudal aumenta progresivamente con el porcentaje de clareo, mientras que la interceptación y evapotranspiración disminuyen de forma sistemática. Este efecto arroja gráficos de evolución como el mostrado en la figura 15.

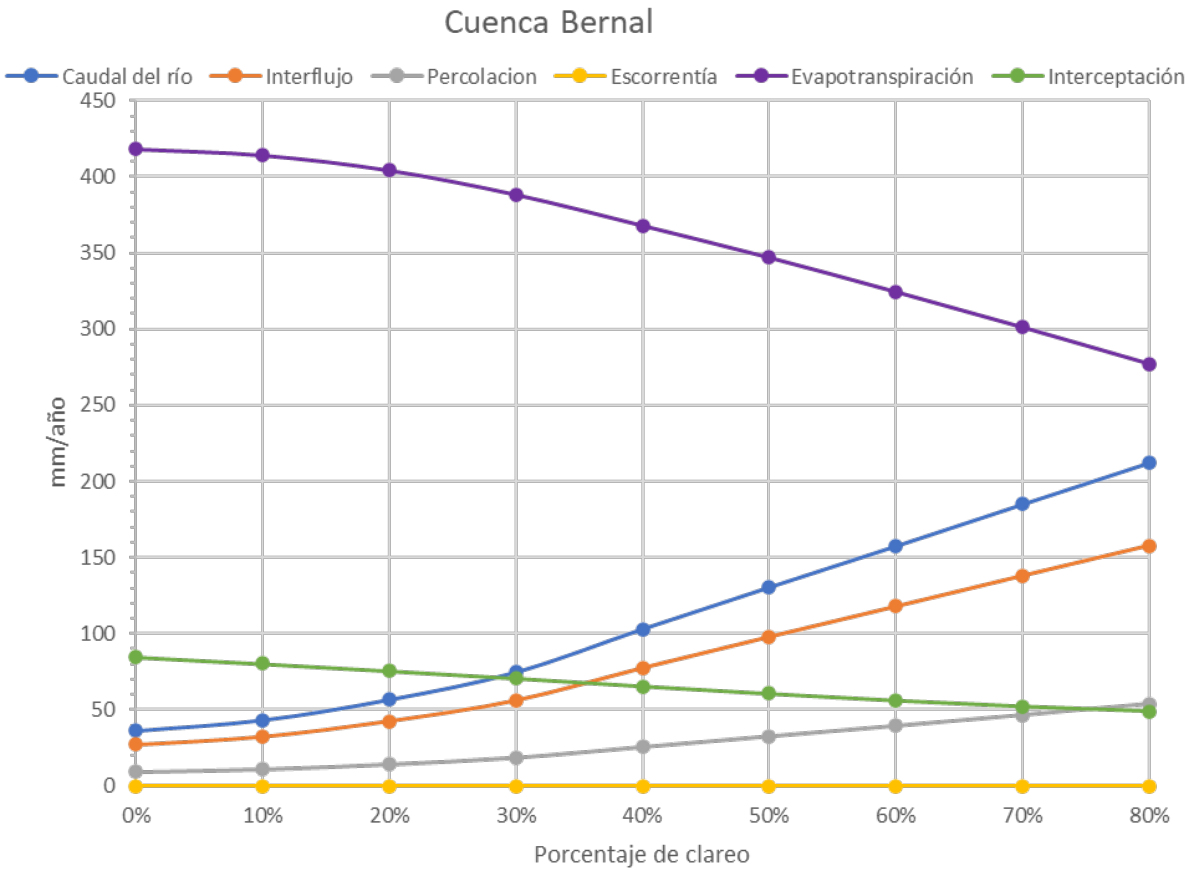


Figura 15. Evolución del balance hídrico con distintos escenarios de clareo en la cuenca del río Bernal.

Balance (mm/año)	Gestión forestal (clareo)								
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
BERNAL									
Infiltración	36,1	43,2	56,7	74,7	103,1	130,5	157,5	184,9	212,1
Interflujo	27,0	32,3	42,5	56,1	77,5	97,9	117,8	138,0	157,8
Percolación	9,1	10,9	14,1	18,6	25,6	32,6	39,5	46,6	54,0
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	418,0	414,0	404,1	388,2	367,9	346,9	324,4	301,2	277,1
Evapotranspiración	84,6	80,2	75,5	70,6	65,4	60,5	56,0	52,2	49,1
ALHORÍ									
Infiltración	383,6	387,7	392,1	397,3	403,2	409,8	417,2	425,7	436,5
Interflujo	248,4	253,9	256,1	258,8	261,9	265,4	269,2	273,5	275,7
Percolación	132,2	134,6	136,0	138,4	141,2	144,4	147,7	152,0	155,7
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	50,8	48,6	46,3	43,9	41,4	39,1	37,0	35,2	33,7
Evapotranspiración	178,7	176,9	174,8	172,0	168,5	164,2	159,0	152,3	142,5
ALCÁZAR									
Infiltración	369,8	371,3	373,9	376,4	379,2	382,5	386,1	390,3	395,6
Interflujo	342,7	340,7	346,6	348,9	351,5	354,5	357,8	361,6	366,4
Percolación	26,9	27,0	27,1	27,3	27,5	27,8	28,1	28,5	29,0
Escorrentía	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Interceptación	45,0	42,9	40,8	38,5	36,3	34,1	32,2	30,5	29,1
Evapotranspiración	77,8	77,9	77,8	77,6	77,0	75,9	74,2	71,7	68,1

Tabla 9. Balances resultantes para los distintos escenarios de clareo en todas las cuencas modelizadas.

Balance (mm/año)	Gestión forestal (clareo)								
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
PUEBLO									
Infiltración	209,1	211,8	215,2	219,5	225,0	232,7	244,4	261,1	280,3
Interflujo	96,5	97,4	98,8	100,5	102,7	105,6	110,1	116,5	123,7
Percolación	112,8	114,4	116,4	119,0	122,3	127,1	134,2	144,5	156,5
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	55,5	52,8	49,4	45,8	42,1	38,2	34,6	31,5	28,9
Evapotranspiración	174,8	174,5	174,3	173,6	171,8	168,0	159,9	146,3	129,6
BARRIO									
Infiltración	250,0	252,9	256,6	261,0	266,7	274,4	285,5	300,7	317,7
Interflujo	118,2	119,4	120,9	122,8	125,1	128,1	132,5	138,7	145,6
Percolación	131,8	133,4	135,6	138,2	141,6	146,3	152,9	161,9	172,0
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	59,1	56,4	53,4	50,2	46,8	43,4	40,2	37,4	35,1
Evapotranspiración	183,0	182,5	181,8	180,6	178,3	174,0	166,2	153,6	138,9
GALLEGO									
Infiltración	199,7	203,3	207,8	213,3	220,5	230,1	243,3	263,9	289,6
Interflujo	100,2	101,7	103,6	105,8	108,6	112,2	117,3	124,7	133,2
Percolación	99,7	101,8	104,4	107,7	112,1	118,1	126,2	139,2	156,3
Escorrentía	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Interceptación	65,2	61,0	56,3	51,3	46,1	40,7	35,6	31,2	27,6
Evapotranspiración	177,3	177,6	177,7	177,1	175,2	171,2	162,7	146,5	124,2
BENÉJAR									
Infiltración	146,9	149,5	152,0	155,5	159,8	165,4	172,5	183,0	198,2
Interflujo	62,5	64,0	64,4	65,7	67,2	69,2	71,5	74,9	79,4
Percolación	84,4	86,0	87,6	89,8	92,6	96,3	101,0	108,1	118,7
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	59,1	56,2	53,0	49,5	45,6	41,7	37,9	34,6	31,9
Evapotranspiración	141,2	142,2	142,1	142,1	141,6	140,1	136,6	129,3	116,8
HONDO									
Infiltración	217,4	222,4	228,6	236,2	245,7	257,6	271,9	290,9	316,2
Interflujo	114,9	117,3	120,2	123,7	128,0	133,2	139,4	147,6	157,9
Percolación	102,5	105,1	108,4	112,5	117,7	124,4	132,5	143,3	158,2
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	85,4	80,1	74,3	68,0	61,1	54,1	47,6	42,0	37,6
Evapotranspiración	190,0	190,1	189,7	188,4	185,7	181,2	173,1	159,7	138,7
CASTAÑOS									
Infiltración	219,9	223,3	227,6	232,8	239,3	247,0	256,1	267,1	281,7
Interflujo	112,5	114,1	116,2	118,7	121,7	125,2	129,3	134,2	140,4
Percolación	107,9	109,6	111,8	114,6	118,0	122,1	127,1	133,3	141,6
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	79,8	76,2	72,3	68,0	63,5	58,7	54,2	50,4	47,4
Evapotranspiración	167,8	167,7	167,4	166,4	164,5	161,5	156,9	149,6	138,1
VIÑAS									
Infiltración	172,7	177,5	183,8	191,7	201,8	214,2	229,5	249,4	275,3
Interflujo	83,0	84,3	86,9	90,1	94,0	98,9	104,9	112,7	122,9
Percolación	90,3	93,1	96,8	101,6	107,7	115,3	124,6	136,6	152,2
Escorrentía	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Interceptación	86,7	81,2	75,1	68,5	61,4	53,9	47,1	41,3	36,7
Evapotranspiración	193,2	193,7	193,6	192,1	189,2	184,2	175,7	161,7	140,4

Tabla 9. Balances resultantes para los distintos escenarios de clareo en todas las cuencas modelizadas.

La ganancia de caudal en las cuencas modelizadas varió entre el 1-6% para clareos del 20% de la masa forestal actual, y del 7 al 60%, si las intervenciones de reducción de densidad forestal llegan al 80%.

El impacto del clareo en la cuenca del río Bernal, llegaría a doblar el caudal del río con una gestión forestal del 20% y quintuplicarlo si ésta fuera del 80%.

CUENCAS	GANANCIA DE CAUDAL		
	CLAREO 20%	CLAREO 50%	CLAREO 80%
BERNAL	57%	262%	487%
ALHORÍ	2%	8%	14%
ALCÁZAR	1%	4%	7%
PUEBLO	3%	10%	34%
BARRIO	3%	9%	27%
GALLEGO	4%	13%	45%
BENÉJAR	4%	13%	35%
HONDO	5%	19%	45%
CASTAÑOS	4%	11%	28%
VIÑAS	6%	21%	59%

Tabla 10. Resultados del clareo del 20 y 80%.

Las cuencas de la vertiente norte de Sierra Nevada, cuentan con una precipitación media anual de 498 mm y una cobertura actual de pino de repoblación del 42%. Se puede concluir en este apartado que, la escorrentía total que se proporciona al acuífero de Guadix-La Calahorra representa un volumen medio de 43 hm^3/año, equivalente al 46% de la precipitación.

La simulación de distintos niveles de clareo en los bosques de repoblación de las diez cuencas hidrológicas modelizadas, indica que el caudal de los ríos y por tanto la recarga a los acuíferos aguas abajo, podría incrementarse entre un 9% y un 29% respecto a la situación actual (Tabla 10). En concreto, un clareo del 40% permitiría aumentar los recursos hídricos en 3,7 hm^3/año, suficientes para abastecer durante un año aproximadamente a 50.000 habitantes, mientras que un clareo del 80% generaría un incremento de 12,5 hm^3/año, capaz de cubrir las necesidades de unos 170.000 habitantes durante un año.

CUENCA	Caudal medio (1997-2022)	Coef. Escorrentía (Q/PP)	%Recarga acuíferos Guadix	Recarga para distintos escenarios de clareo				
				40%	50%	60%	70%	80%
BERNAL	0,5	6,6%	1,2%	1,39	1,78	2,16	2,54	2,93
ALHORÍ	8,9	61,8%	20,8%	9,42	9,57	9,75	9,95	10,08
ALCÁZAR	10,0	75,1%	23,4%	10,23	10,32	10,42	10,53	10,67
PUEBLO	3,8	48,4%	9,0%	4,06	4,20	4,40	4,70	5,05
BARRIO	4,6	51,4%	10,8%	4,84	4,98	5,18	5,46	5,77
GALLEGO	3,0	46,1%	6,9%	3,26	3,40	3,60	3,89	4,26
BENÉJAR	4,0	42,3%	9,5%	4,40	4,56	4,75	5,04	5,46
HONDO	3,9	44,1%	9,1%	4,38	4,59	4,84	5,18	5,63
CASTAÑOS	3,2	47,8%	7,7%	3,56	3,67	3,80	3,96	4,17
VIÑAS	0,8	39,0%	1,9%	0,92	0,98	1,05	1,14	1,26
Aportación (hm3/año)	42,7	46,3%	100,0%	46,47	48,05	49,96	52,40	55,28
Incremento (%)				8,6%	12,4%	16,8%	22,5%	29,2%

Tabla 11. Resultados de la recarga o aportación a los acuíferos de Guadix y Llanos de La Calahorra tras la gestión forestal.

5.3 Parcelas experimentales de pinar en Jérez del Marquesado

Los resultados muestran que la humedad del suelo (contenido hídrico) y la transpiración del arbolado respondieron de forma consistente a la precipitación, a la actividad de la vegetación condicionada por la gestión forestal y a la aplicación del careo. Durante el periodo de estudio (julio–diciembre de 2025), se observaron diferencias significativas en el contenido hídrico del suelo entre parcelas control (CU y CD) y parcelas tratadas (TU y TD), especialmente en la parcela situada aguas abajo de la acequia, donde el efecto combinado de la gestión forestal y el careo incrementó notablemente la disponibilidad de agua en el perfil del suelo (Figura 16).

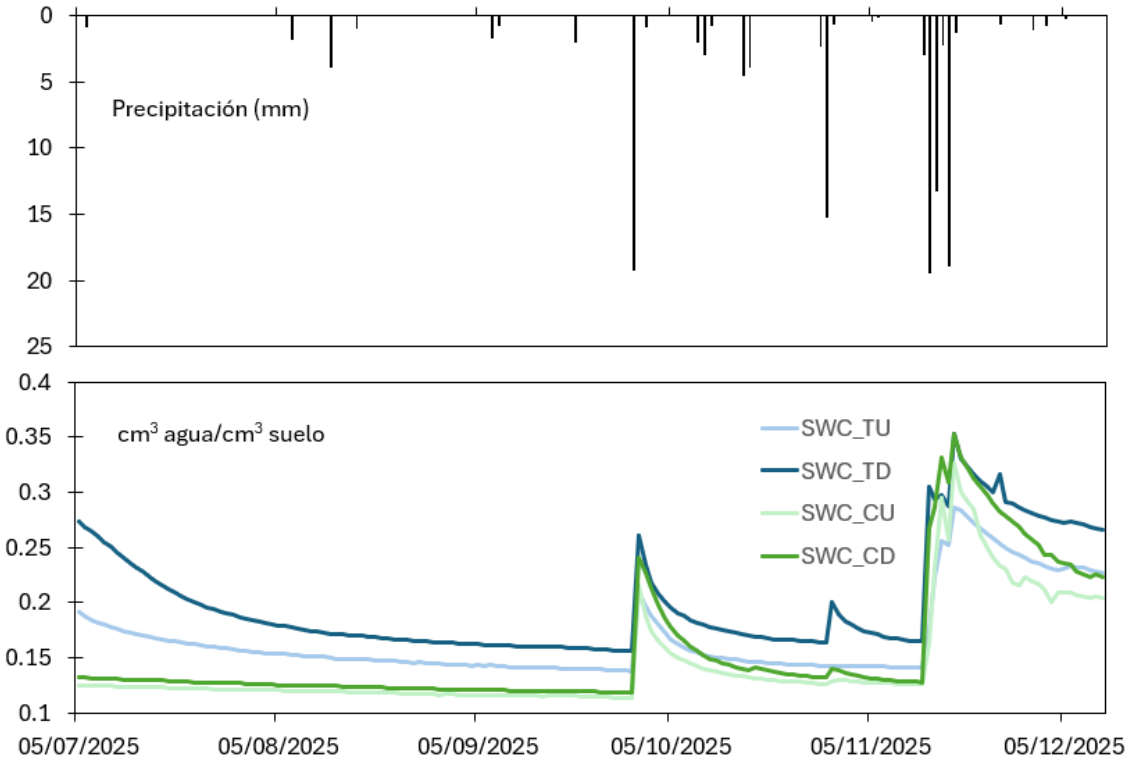


Figura 16. Dinámica de la precipitación acumulada diaria (arriba) y el contenido hídrico medio diario (dato puntual a las 8 de la mañana) de las parcelas demostrativas (abajo) desde el 5 de julio hasta el 11 de diciembre de 2025.

En términos medios, se registraron aumentos de 2,5 y 7,1 mm/día en las parcelas tratadas respecto a las de control, lo que implica una mayor disponibilidad hídrica para el arbolado y un mejor mantenimiento de su actividad fisiológica.

Asimismo, la transpiración del arbolado reflejó claramente el impacto de los tratamientos, alcanzando valores significativamente superiores en la parcela TD en comparación con la parcela gestionada sin careo (TU). En esta última, la reducción de densidad arbórea disminuyó las pérdidas por interceptación, incrementando la humedad del suelo y la transpiración respecto a las parcelas control. En la parcela TD, la fuerte relación lineal entre la transpiración y la evapotranspiración potencial (R^2 = 0,95) indica que la humedad del suelo no limitó la respuesta fisiológica del pinar durante el verano de 2025, evidenciando que el careo permitió sostener una actividad fisiológica óptima durante el periodo de sequía estival.

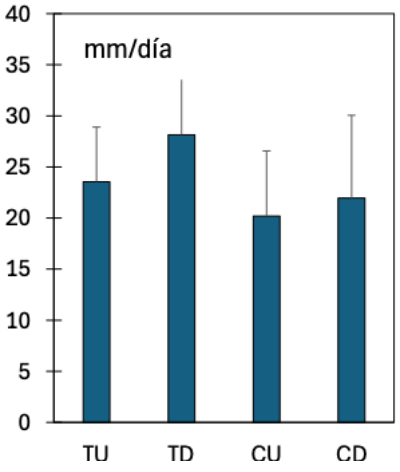


Figura 17. Contenido hídrico medio diario (barras representan la desviación típica) de las parcelas demostrativas desde el 5 de julio hasta el 11 de diciembre de 2025.

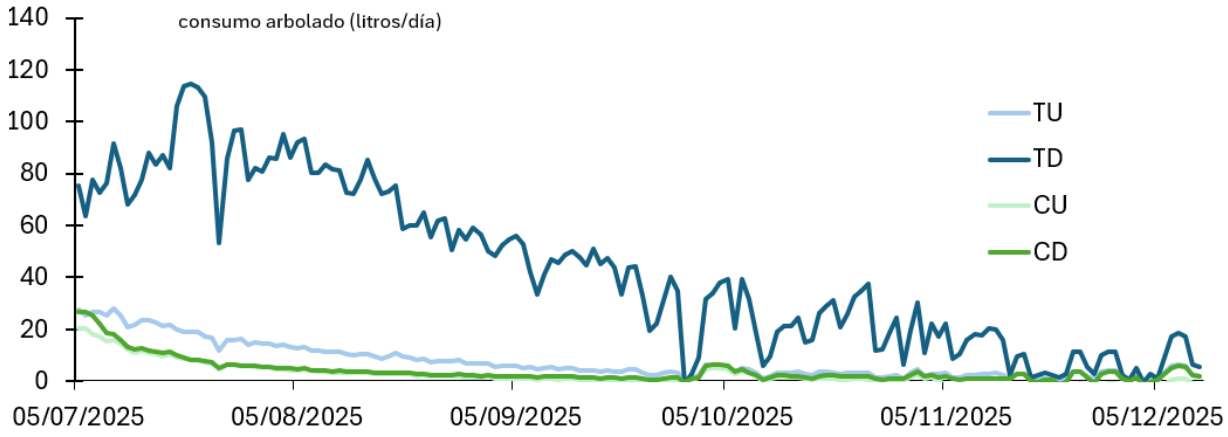


Figura 18. Dinámicas diarias de transpiración del arbolado en las parcelas experimentales.

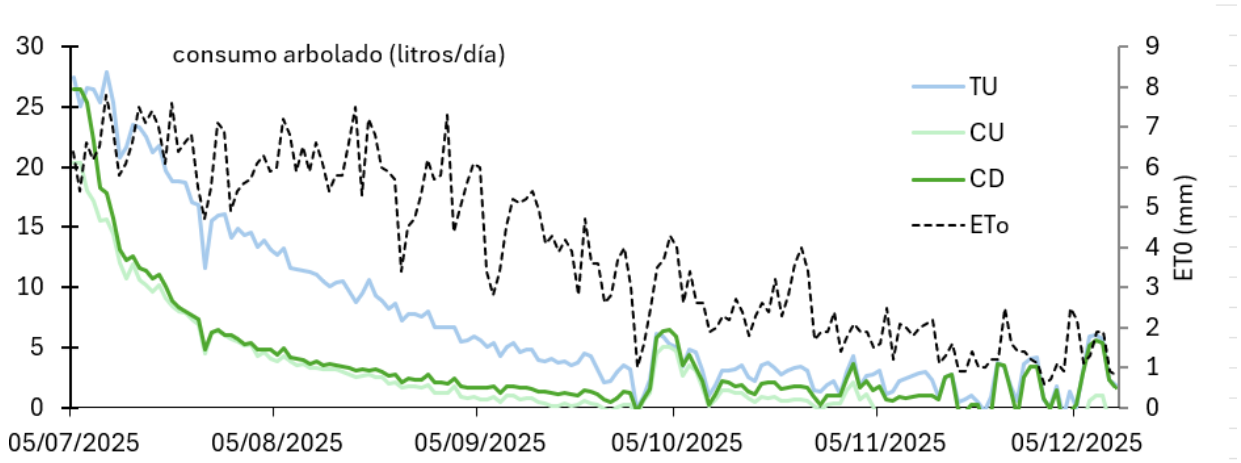


Figura 19. Dinámicas diarias de transpiración del arbolado en las parcelas experimentales sin incluir la parcela TD, para facilitar la comprensión del efecto de la gestión forestal. Se presenta igualmente el dato de la evapotranspiración potencial (ETo).

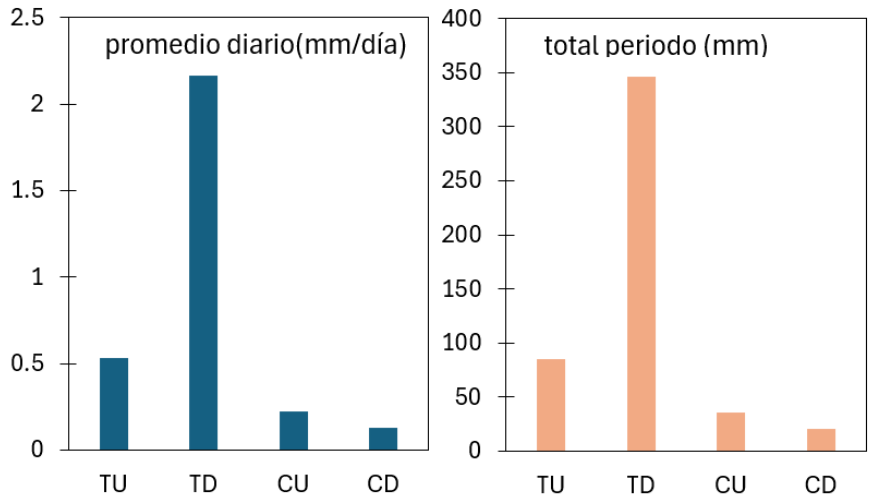


Figura 20. Datos de transpiración en altura de agua (mm) para las parcelas experimentales, tanto el promedio diario (izquierda), como el sumatorio total para el periodo conjunto de toma de datos (5 julio-11 diciembre 2025).

5.4 Parcela experimental en la chopera de Purullena

Los datos volcados de los sensores instalados han permitido hacer los gráficos que se representan en la Figura 19. Las bruscas variaciones del nivel piezométrico registradas en el pozo se deben a su puesta en funcionamiento, que ha sido necesaria para regar la chopera debido a las restricciones impuestas para el riego, en esta comarca, por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, debido al periodo de sequía en el que se ha desarrollado este proyecto. Al no haberse regado la parcela de chopos, con el procedimiento habitual, que es el de riego por inundación con aguas superficiales aportadas por acequias de la comunidad de regantes y al haberse puesto en marcha el pozo para el riego de la propia parcela, la información generada deja de tener validez para el objetivo que se había propuesto. Esta cuestión ha impedido poder hacer los cálculos del retorno de riego que llegaba al acuífero después de los riegos. Esta experiencia nos ha puesto en evidencia que, para hacer este tipo de estudios, que serían esenciales para evaluar cuánta del agua de riego de las choperas termina recargando a los acuíferos, habría que controlar parcelas específicas gestionadas para tal fin.

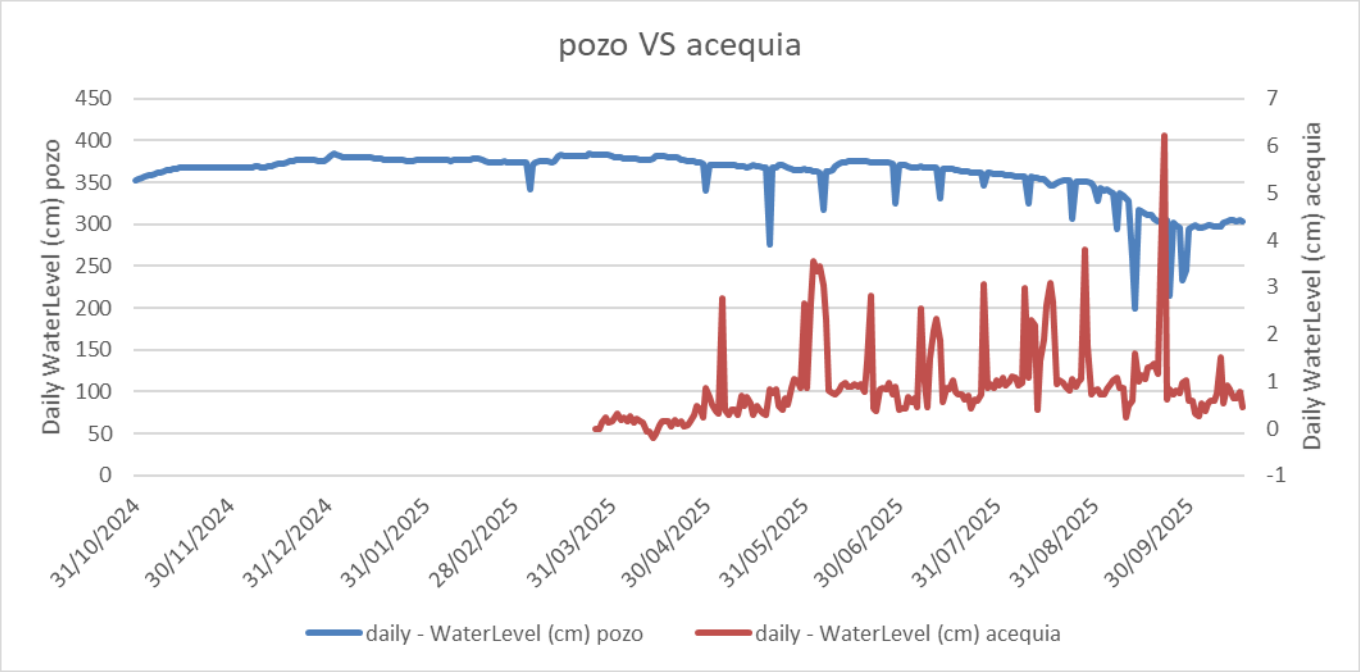


Figura 21. Evolución del nivel piezométrico en el pozo y de la altura de la lámina de agua en la boquera de riego.

6. Resumen y conclusiones

Con la acción A9.2 del proyecto REVIERTE se ha evaluado el impacto hidrológico-forestal de la gestión activa en los pinares de repoblación de la vertiente norte de Sierra Nevada, así como el potencial de recarga asociado a los retornos de riego en choperas de la vega de Purullena. Para ello se integraron datos de caudal, temperatura, composición isotópica, instrumentación en parcelas experimentales y modelización hidrológica distribuida mediante el modelo TETIS v9.0, aplicado a diez cuencas representativas.

Las cuencas estudiadas presentan una precipitación media anual cercana a 500 mm y una cobertura de pino de repoblación del 41%. La escorrentía total actual hacia los acuíferos de Guadix y los Llanos de la Calahorra se estima en 43 hm^3/año, equivalente al 46% de la precipitación total. El análisis de los balances hidrológicos muestra una elevada variabilidad espacial influida por la altitud, la proporción de nieve, la densidad del pinar y el grado de alteración de los materiales metamórficos. Las tasas de interceptación están comprendidas entre el 8 y el 19%, mientras que la evapotranspiración real alcanza valores del 25 al 40% en la mayoría de las cuencas, excepto en el Bernal, donde llega al 93%, limitando allí la recarga.

Las simulaciones de escenarios de gestión forestal evidencian que la reducción de la densidad arbórea disminuye significativamente la interceptación y la evapotranspiración, incrementando la infiltración, el flujo base y, también la recarga subterránea. La ganancia de caudal varía entre el 1 y el 6% para clareos del 20% y puede alcanzar incrementos de entre el 7 y el 60% con clareos del 80%, dependiendo de las características de cada cuenca. De forma agregada, un clareo del 40% podría aumentar los recursos hídricos en 3,7 hm^3/año, mientras que un clareo del 80% generaría hasta 12,5 hm^3/año, lo que equivaldría al consumo para abastecimiento anual a una población de entre 50.000 y 170.000 habitantes respectivamente.

Las parcelas experimentales de pinar en Jérez del Marquesado confirman la coherencia entre las simulaciones y las observaciones de campo. Las parcelas tratadas presentan aumentos de entre 2,5 y 7,1 mm/día en el contenido hídrico del suelo con respecto a las parcelas control, mostrando además mayores tasas de transpiración del arbolado, especialmente cuando se combina el clareo con la recarga inducida por acequias de careo.

En la parcela clareada, situada aguas abajo de la acequia de careo, la relación lineal entre la transpiración y la evapotranspiración potencial indica ausencia de limitación hídrica durante el verano, demostrando que la gestión forestal permite sostener la actividad fisiológica incluso en el periodo seco. En cambio, la monitorización de la chopera de Purullena no permitió evaluar los retornos de riego, debido a la necesidad de activar el pozo de la parcela para garantizar el suministro hídrico durante las restricciones impuestas por la sequía, lo que invalidó los datos de recarga asociados al riego superficial. Esto subraya la importancia de disponer de parcelas controladas con pozos no operativos y de llegar a acuerdos con los propietarios para hacer una gestión pactada a lo largo de todo el periodo de estudio.

En conjunto, los resultados demuestran que la selvicultura ecohidrológica en la vertiente norte de Sierra Nevada es una herramienta eficaz para mejorar la recarga de los acuíferos y aumentar los caudales circulantes, incluso en cuencas con precipitaciones moderadas. Los clareos intensos, junto con la recuperación y operación adecuada de las acequias de careo, pueden optimizar las relaciones agua–bosque, reducir la vulnerabilidad frente a incendios, mejorar el estado ecológico del pinar y contribuir de manera significativa a la disponibilidad de recursos hídricos en un territorio especialmente sensible a la sequía. No obstante, se requiere una validación continuada en el tiempo para obtener una estimación robusta del impacto real de estas actuaciones en la recarga y en el comportamiento hidrológico de las cuencas. El mantenimiento de las parcelas de control contribuirá a disponer de información muy valiosa que deberá ser considerada en la gestión de los montes de la ladera norte de Sierra Nevada.

Referencias bibliográficas

Blanco, J.A. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. Ecosistemas 26(2): 1-9. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01

Del Campo, A., Otsuki, K., Serengil, Y., Blanco, J.A, Yousefpour, R. y Wei, X. (2022). A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. Forest Ecology and Management 519, 120324.

González-Sanchis, M., Ruiz-Pérez, G., Del Campo, A., García-Prats, A., Francés, F. y Llul, C. (2019). Managing Low productive forests at catchment scale: Considering wáter, biomass and fire risk to achieve economic feasibility. Journal of enviroment management 231, 653-665.

Martos-Rosillo, S., Martín, J.M., Ramos, B., Abellán, J., González, A., Jódar, J., Peinado, T., Cifuentes, V., García, F.J. y Durán, J.J. (2020). Recuperación de sistemas ancestrales de manejo del agua que utilizan soluciones basadas en la naturaleza. Las acequias de careo de Jérez del Marquesado (Granada). XI Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua.

Ruiz-Pérez, G., González-Sanchis, M., Del Campo A.D. y Francés, F. (2016). Can a parsimonious model implemented with satellite data be used for modelling the vegetation dynamics and water cycle in water-controlled environments?

Padilla, A., y Delgado, J. (2012). Programa Trasero - Tratamiento y gestión de series de datos temporales. Diputación Provincial de Málaga: Trasero 2.0.

Peral, C., Navascués, B. y Ramos, P. (2017) Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. AEMET Nota Técnica n° 24. Available at: http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf.

Schenk, E.R., O'Donnell,F., Springer, A.E. and Stevens, L.E.(2020).The impacts of tree stand thinning on groundwater recharge in aridland forests. Ecological Engineering, volume 145.https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105701.



revierte

GOBIERNO DE ESPAÑA
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
Fundación Biodiversidad
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Revierte cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.