



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Evaluación del Recurso Hídrico en la cuenca del río Mijares
(España) mediante el desarrollo de modelos Precipitación-
Escorrentía.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Roa Triana, Diego Fernando

Tutor/a: Paredes Arquiola, Javier

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

Trabajo Fin de Máster

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO MIJARES (ESPAÑA) MEDIANTE EL DESARROLLO DE MODELOS PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA.

Autor:

DIEGO FERNANDO ROA TRIANA

Tutor:

DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA

SEPTIEMBRE, 2025



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Evaluación del Recurso Hídrico en la cuenca del río Mijares (España) mediante la aplicación de modelos Precipitación-Escorrentía.

Título del TFM en inglés: Assessment of Water Resources in the Mijares River Basin (Spain) through the Application of Precipitation–Runoff Models.

Título del TFM en Valenciano: Avaluació del Recurs Hídric a la conca del riu Millars (Espanya) mitjançant l'aplicació de models Precipitació–Escorrentia.

Alumno: Diego Fernando Roa Triana

Tutor: Dr. Javier Paredes Arquiola

Cotutor/es: N/A

Director experimental: N/A

Fecha de Lectura: Setiembre 2025

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

El presente Trabajo Final de Máster se enmarca en el ámbito de la modelación hidrológica aplicada a la evaluación y gestión de los recursos hídricos, y tiene como objetivo principal analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Mijares (España) mediante la implementación del modelo conceptual precipitación-escorrentía HBV. Para ello, se hace uso de la herramienta *EvalHid*, desarrollada en el entorno del Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL, que permite simular el balance hídrico de cuencas hidrográficas complejas mediante una aproximación semidistribuida.

La cuenca del río Mijares, localizada en el noreste de la península ibérica y perteneciente a la Demarcación Hidrográfica del Júcar, se caracteriza por una elevada variabilidad climatológica y una marcada heterogeneidad espacial en cuanto a usos del suelo, topografía y cobertura vegetal. Esta heterogeneidad incide de forma directa en el régimen de escorrentía, la generación de caudales y las dinámicas de infiltración, lo que hace imprescindible contar con herramientas de modelación que permitan reproducir adecuadamente estos procesos. Para el presente estudio, se evaluará el recurso en diferentes puntos dentro del sistema de explotación Mijares – La Plana Castellón, entre ellos se han seleccionado tres puntos estratégicos de control y análisis: el embalse de Arenós, el embalse de Sichar y el embalse de M^a Cristina, los cuales constituyen los principales nodos de regulación dentro del sistema de explotación, tanto para abastecimiento urbano como para usos agrícolas.



El modelo HBV, de carácter conceptual y agregativo, ha sido ampliamente utilizado en diversos contextos hidrológicos debido a su equilibrio entre simplicidad estructural y capacidad de representar los procesos físicos dominantes en una cuenca. Su implementación en *EvalHid* requiere la definición de subcuencas homogéneas, la recopilación de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial y, opcionalmente, temperatura del aire, así como información morfométrica básica. La calibración del modelo se ha realizado utilizando series históricas de caudales aforados y/o restituidos a régimen natural, siguiendo criterios de ajuste basados en indicadores estadísticos como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Durante el desarrollo del trabajo, se pretende analizar distintas configuraciones de calibración, atendiendo a la coherencia hidrológica de los parámetros obtenidos y su representatividad respecto a las características físicas de cada subcuenca. Asimismo, se evaluará la sensibilidad del modelo ante la variabilidad climática, lo que permite identificar su robustez frente a distintos escenarios de cambio hidrológico.

Este estudio representa una contribución significativa en la aplicación de modelos precipitación-escorrentía al contexto mediterráneo español, caracterizado por una alta presión sobre los recursos hídricos y una creciente necesidad de herramientas para la planificación sostenible. La integración del modelo HBV en *EvalHid*, y su aplicación a la cuenca del río Mijares, ofrece una base sólida para la toma de decisiones en la gestión integrada del recurso, el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático y la evaluación de políticas hidráulicas en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar. En este sentido, el trabajo refuerza la utilidad de las herramientas de modelación hidrológica no solo como instrumentos de análisis, sino también como soporte técnico para una gestión más eficiente, equitativa y resiliente del recurso agua.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

El present Treball Final de Màster s'emmarca en l'àmbit de la modelació hidrològica aplicada a l'avaluació i gestió dels recursos hídrics, i té com a objectiu principal analitzar el comportament hidrològic de la conca del riu Millars (Espanya) mitjançant la implementació del model conceptual precipitació-escorrentia HBV. Per a això, s'utilitza l'eina EvalHid, desenvolupada en l'entorn del Sistema de Suport a la Decisió AQUATOOL, que permet simular el balanç hídric de conques hidrogràfiques complexes mitjançant una aproximació semidistribuïda.

La conca del riu Millars, localitzada al nord-est de la península Ibèrica i pertanyent a la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer, es caracteritza per una elevada variabilitat climatològica i una marcada heterogeneïtat espacial pel que fa als usos del sòl, la topografia i la cobertura vegetal. Aquesta heterogeneïtat incideix de manera directa en el règim d'escorrentia, la generació de cabals i les dinàmiques d'infiltració, fet que fa imprescindible disposar d'eines de modelació que permeten reproduir adequadament

aquests processos. Per al present estudi, s'avaluarà el recurs en diferents punts dins del sistema d'explotació Millars – La Plana Castelló, entre els quals s'han seleccionat tres punts estratègics de control i anàlisi: l'embassament d'Arenós, l'embassament de Sichar i l'embassament de M^a Cristina, que constitueixen els principals nodes de regulació dins del sistema d'explotació, tant per a l'abastiment urbà com per a usos agrícoles.

El model HBV, de caràcter conceptual i agregatiu, ha estat àmpliament utilitzat en diversos contextos hidrològics a causa del seu equilibri entre simplicitat estructural i capacitat de representar els processos físics dominants d'una conca. La seua implementació en EvalHid requereix la definició de subconques homogènies, la recopilació de sèries temporals de precipitació, evapotranspiració potencial i, opcionalment, temperatura de l'aire, així com informació morfomètrica bàsica. La calibració del model s'ha realitzat utilitzant sèries històriques de cabals aforats i/o restituïts a règim natural, seguint criteris d'ajust basats en indicadors estadístics com el coeficient d'eficiència de Nash-Sutcliffe (NSE).

Durant el desenvolupament del treball, es pretén analitzar diferents configuracions de calibratge, atenent a la coherència hidrològica dels paràmetres obtinguts i la seua representativitat respecte a les característiques físiques de cada subconca. Així mateix, s'avaluarà la sensibilitat del model davant la variabilitat climàtica, la qual cosa permet identificar la seua robustesa enfront de diversos escenaris de canvi hidrològic.

Aquest estudi representa una contribució significativa en l'aplicació de models precipitació-escorrentia al context mediterrani espanyol, caracteritzat per una alta pressió sobre els recursos hídrics i una creixent necessitat d'eines per a la planificació sostenible. La integració del model HBV en EvalHid, i la seua aplicació a la conca del riu Millars, ofereix una base sòlida per a la presa de decisions en la gestió integrada del recurs, el disseny d'estratègies d'adaptació al canvi climàtic i l'avaluació de polítiques hidràuliques en l'àmbit de la Confederació Hidrogràfica del Xúquer. En aquest sentit, el treball reforça la utilitat de les eines de modelació hidrològica no sols com a instruments d'anàlisi, sinó també com a suport tècnic per a una gestió més eficient, equitativa i resilient del recurs aigua.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

This Master's Thesis falls within the scope of hydrological modeling applied to the evaluation and management of water resources. Its main objective is to analyze the hydrological behavior of the Mijares River basin (Spain) through the implementation of the HBV conceptual rainfall-runoff model. To achieve this, the *EvalHid* tool is employed, which was developed within the AQUATOOL Decision Support System. *EvalHid* enables the simulation of the water balance in complex river basins using a semi-distributed approach.

The Mijares River basin, located in the northeast of the Iberian Peninsula and part of the Júcar River Basin District, is characterized by significant climatic variability and marked

spatial heterogeneity in land use, topography, and vegetation cover. This heterogeneity directly influences runoff patterns, streamflow generation, and infiltration dynamics, making it essential to employ modeling tools capable of accurately reproducing these processes. For this study, the water resource is evaluated at various points within the Mijares–Plana de Castellón exploitation system. Three strategic control and analysis points have been selected: the Arenós, Schar, and M^a Cristina reservoirs, which constitute the main regulation nodes of the system, both for urban supply and agricultural use.

The HBV model, conceptual and lumped in nature, has been widely applied in various hydrological contexts due to its balance between structural simplicity and its ability to represent dominant physical processes within a watershed. Its implementation in *EvalHid* requires the definition of homogeneous sub-basins, the collection of time series of precipitation, potential evapotranspiration, and optionally, air temperature, along with basic morphometric data. The model has been calibrated using historical flow series—either observed or reconstructed under natural conditions—following performance criteria based on statistical indicators such as the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient.

Throughout the development of this work, various calibration configurations are analyzed, paying close attention to the hydrological coherence of the resulting parameters and their representativeness of the physical characteristics of each sub-basin. Additionally, the model's sensitivity to climate variability is evaluated to assess its robustness under different hydrological change scenarios.

This study constitutes a meaningful contribution to the application of rainfall–runoff models in the Spanish Mediterranean context, which is characterized by high pressure on water resources and an increasing need for tools that support sustainable planning. The integration of the HBV model in *EvalHid* and its application to the Mijares River basin provides a solid foundation for informed decision-making in integrated water resource management, the design of climate change adaptation strategies, and the assessment of hydraulic policies within the jurisdiction of the Júcar River Basin Authority. In this regard, the work reinforces the utility of hydrological modeling tools not only as analytical instruments but also as technical support for more efficient, equitable, and resilient water resource management.

Palabras clave español (máximo 5): Modelación hidrológica, Planificación Hidrológica, Calibración modelos hidrológicos, Evaluación de recursos hídricos.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Modelització hidrològica, Planificació Hidrològica, Calibració de models hidrològics, Avaluació de recursos hídrics.

Palabras clave inglés (máximo 5): Hydrological modelling, Water resources planning, Calibration of hydrological models, Water resources assessment.

Agradecimientos

La vida, con sus retos inesperados y sus caminos inexplorados, a menudo nos lleva por senderos que no habíamos planeado. Esta tesis es el reflejo de uno de esos viajes, un camino lleno de aprendizaje y un valor incalculable que no habría sido posible sin el apoyo de aquellos que me acompañaron en cada etapa.

Principalmente a mi tutor, Javier Paredes. Para el mi más profundo respeto y con quien estaré enormemente agradecido por haberme brindado esta oportunidad. Además de su guía y apoyo constante que fueron pilares fundamentales para alcanzar este objetivo. Más allá de su excelente labor como educador, quiero reconocer a la persona y al profesional ejemplar que es, que a través de su experiencia y conocimiento hicieron posible este trabajo.

A mis hermanos, gracias por ser mi apoyo incondicional y por estar siempre ahí para animarme a seguir adelante. Su presencia y cariño son una parte fundamental de mi vida y un motor constante en cada meta que me propongo.

También a mis amigos, quienes con el tiempo se han convertido en familia. Gracias por su complicidad, por las risas compartidas y por su apoyo en los momentos difíciles. Su compañía fue un oasis en esta etapa, recordándome que incluso en los desafíos hay espacio para la alegría y la conexión.

Y finalmente, a mi compañera de vida, la mujer que ha recorrido este camino a mi lado. Gracias por su apoyo incondicional, por encontrar siempre las palabras precisas para reconfortarme y por ser mi aliento en los momentos más retadores. Este logro es, en gran medida, suyo también.

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Estado del Arte	4
3.1. Modelación hidrológica en la gestión de recursos hídricos	4
3.2. Modelos precipitación-escorrentía	5
3.3. El modelo HBV	5
3.3.1. Orígenes y evolución del modelo	5
3.3.2. Antecedentes	5
3.3.3. Ventajas y limitaciones	7
4. Metodología	8
4.1. Metodología General	8
4.1.1. Recopilación de la información	8
4.1.2. Simulación inicial de caudales	9
4.1.3. Comparación de caudales	9
4.1.4. Calibración del modelo	9
4.1.5. Validación de los parámetros del modelo	11
4.2. La Herramienta <i>EvalHid</i>	11
4.2.1. Aplicación del HBV con <i>EvalHid</i>	11
4.2.2. Estructura conceptual del modelo HBV	12
4.3. Algoritmos de optimización y el algoritmo Differential Evolution	15
4.3.1. Introducción a los algoritmos de optimización	15

4.3.2. Descripción del algoritmo <i>Differential Evolution</i>	15
4.3.3. Funcionamiento del algoritmo <i>Differential Evolution</i>	16
5. Descripción de la Cuenca en Estudio	18
5.1. Características Principales	18
5.2. Masas de Agua en el Sistema de Explotación	20
5.2.1. Masas de Agua Superficial	20
5.2.2. Masas de Agua Subterránea	23
5.3. Usos y demandas	24
5.3.1. Abastecimientos	24
5.3.2. Usos agropecuarios	25
5.3.3. Producción de energía eléctrica	26
5.4. Infraestructura hidráulica principal	27
5.4.1. Embalses	27
5.4.2. Canales y Conducciones	27
5.5. Condiciones hidroclimáticas y uso del suelo	28
5.6. Balances y gestión operativa	28
5.7. Evaluación del recurso hídrico en el Plan Hidrológico de Cuenca	29
6. Datos Disponibles	31
6.1. Precipitación	31
6.2. Evapotranspiración Potencial	32
6.3. Aportaciones Arenós	33
6.4. Aportaciones Sichar	35
6.5. Aportaciones M ^a Cristina	38
7. Implementación Modelo HBV	41
7.1. Arenós	42

7.1.1. Modelo Agregado	43
7.1.2. Modelo Desagregado	45
7.2. Sichar	46
7.2.1. Modelo Agregado	47
7.2.2. Modelo Desagregado	49
7.3. M ^a Cristina	50
7.3.1. Modelo Agregado	51
7.3.2. Modelo Desagregado	53
8. Calibración Modelo HBV	55
8.1. Embalse de Arenós	55
8.1.1. Modelo Agregado	55
8.1.2. Comparación modelo agregado vs. desagregado Arenós	62
8.2. Embalse de Sichar	65
8.2.1. Modelo Agregado	66
8.2.2. Comparación modelo agregado vs. desagregado Sichar	69
8.3. Embalse M ^a Cristina	70
8.3.1. Modelo Agregado	71
8.3.2. Comparación modelo agregado vs. desagregado – M ^a Cristina	74
9. Resultados	77
9.1. Prueba de Homogeneización	77
9.2. Modelo Completo Cuenca Río Mijares	78
9.2.1. Comparación con Series Anuales Oficiales	80
9.2.2. Series Diarias	83
10. Conclusiones	85
Referencias	87

Índice de Tablas

1.	Parámetros del modelo HBV. Fuente: (Paredes-Arquiola et al., 2017) . .	14
2.	Masas de agua en el sistema Mijares. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)	21
3.	Aportación acumulada a la red fluvial ($\text{hm}^3/\text{año}$) en régimen natural según modelo PATRICAL en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b) . .	30
4.	Series históricas disponibles (P, ETP, Aportaciones).	31
5.	Periodos de datos hidrológicos utilizados en la modelación HBV para cada embalse.	41
6.	Masas de agua en la cuenca vertiente del embalse de Arenós. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)	42
7.	Masas de agua en la cuenca vertiente del embalse de Sichar. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)	47
8.	Masas de agua en la cuenca vertiente del embalse de M ^a Cristina. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)	51
9.	Índice de Nash para Calibración y Validación Arenós Serie Larga	56
10.	Parámetros calibrados para el embalse de Arenós (1978/79 - 2019/20).	57
11.	Índice de Nash para calibración y validación – Arenós serie corta. . . .	59
12.	Parámetros calibrados para el embalse de Arenós – Serie corta (2000/01 – 2019/20).	60
13.	Comparación índice de Nash modelo Agregado vs Desagregado - Arenós Serie Larga	63
14.	Comparación del índice de Nash-Sutcliffe para el modelo agregado y desagregado – Arenós (serie corta).	65
15.	Índice de Nash para calibración y validación – Sichar.	66
16.	Parámetros calibrados para el embalse de Sichar (1986/87 – 2019/20).	67
17.	Comparación del índice de Nash para el modelo agregado y desagregado – Sichar.	70

18. Índice de Nash para calibración y validación – M ^a Cristina.	71
19. Parámetros calibrados para el embalse de M ^a Cristina (1959/60 – 2015/16). 72	
20. Comparación del índice de Nash para el modelo agregado y desagregado – M ^a Cristina.	76
21. Masas de agua incluidas en el modelo integral de la cuenca del río Mijares. Fuente: Elaboración propia.	79
22. Índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) para diferentes configuraciones de parámetros del modelo HBV integrado.	81
23. Comparación Aportación acumulada a la red fluvial (hm ³ /año) en régimen natural con los resultados del modelo HVB completo en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)	82

Índice de Figuras

1.	Esquema Resumen de la Metodología. Fuente: Elaboración Propia. . .	8
2.	Sistema de explotación Mijares - Plana de Castellón dentro de la DHJ. Fuente: Elaboración Propia.	18
3.	Sistema de explotación Mijares - Plana de Castellón. Fuente: Elaboración Propia.	19
4.	Masas de Agua Superficial en el S.E. Mijares-Plana de Castellón. Fuente: Elaboración Propia.	20
5.	Masas de Agua Subterránea en el S.E. Mijares-Plana de Castellón. Fuente: Elaboración Propia.	24
6.	Unidades de Demanda Urbana - S.E. Mijares - Plana de Castellón. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b	25
7.	Unidades de Demanda Agrícola (UDA). Fuente:Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b	26
8.	Serie histórica mensual de aportaciones al embalse de Arenós. Fuente: Elaboración propia.	33
9.	Año medio de aportaciones mensuales al embalse de Arenós en régimen natural. Fuente: Elaboración propia.	34
10.	Serie histórica de aportaciones anuales al embalse de Arenós en régimen natural. Fuente: Elaboración propia.	35
11.	Serie histórica mensual de aportaciones al embalse de Sichar. Fuente: Elaboración propia.	36
12.	Año medio de aportaciones mensuales al embalse de Sichar. Fuente: Elaboración propia.	37
13.	Serie histórica de aportaciones anuales al embalse de Sichar en régimen natural. Fuente: Elaboración propia.	38
14.	Serie histórica mensual de aportaciones al embalse de M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia.	39
15.	Año medio de aportaciones mensuales al embalse de M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia.	39

16. Serie histórica de aportaciones anuales al embalse de M ^a Cristina en régimen natural. Fuente: Elaboración propia.	40
17. Serie de precipitación diaria media ponderada – Modelo agregado Arenós. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET. . .	43
18. Serie de evapotranspiración potencial diaria – Modelo agregado Arenós. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.	44
19. Delimitación de la cuenca vertiente del embalse de Arenós. Fuente: Elaboración propia.	45
20. Delimitación espacial de la cuenca desagregada del embalse de Arenós.	46
21. Serie de precipitación diaria media ponderada – Modelo agregado Sichar. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET. . .	48
22. Serie de evapotranspiración potencial diaria – Modelo agregado Sichar. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.	48
23. Delimitación de la cuenca vertiente del embalse de Sichar. Fuente: Elaboración propia.	49
24. Delimitación espacial de la cuenca desagregada del embalse de Sichar.	50
25. Serie de precipitación diaria media ponderada – Modelo agregado M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET. .	52
26. Serie de evapotranspiración potencial diaria – Modelo agregado M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET. .	52
27. Delimitación de la cuenca vertiente del embalse de M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia.	53
28. Delimitación espacial de la cuenca desagregada del embalse de María Cristina.	54
29. Set de Calibración y Validación Serie Larga Arenós (1978/79 - 2019/20)	56
30. Comparación serie mensual simulados vs observados Arenós (1978/79 - 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	57
31. Comparación serie anual simulados vs observados Arenós (1978/79 - 2019/20) Fuente: Elaboración propia.	58
32. Comparación año medio simulado vs observado Arenós (1978/79 - 2019/20) Fuente: Elaboración propia.	58

33. Set de calibración y validación serie corta Arenós (2000/01 – 2019/20).	59
34. Comparación mensual de aportaciones simuladas vs observadas – Arenós (2000/01 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	60
35. Comparación de aportaciones anuales simuladas vs observadas – Arenós (2000/01 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	61
36. Año medio mensual de aportaciones simuladas vs observadas – Arenós (2000/01 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	61
37. Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie larga). Fuente: Elaboración propia.	62
38. Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie larga). Fuente: Elaboración propia.	63
39. Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie corta). Fuente: Elaboración propia.	64
40. Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie corta). Fuente: Elaboración propia.	65
41. Set de calibración y validación Sichar (1986/87 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	66
42. Comparación serie mensual simulados vs observados – Sichar (1986/87 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	67
43. Comparación serie anual simulados vs observados – Sichar (1986/87 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	68
44. Comparación año medio simulado vs observado – Sichar (1986/87 – 2019/20). Fuente: Elaboración propia.	68
45. Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – Sichar. Fuente: Elaboración propia.	69
46. Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – Sichar. Fuente: Elaboración propia.	70
47. Set de calibración y validación M ^a Cristina (1959/60 – 2015/16). Fuente: Elaboración propia.	71
48. Comparación serie mensual simulados vs observados – M ^a Cristina (1959/60 – 2015/16). Fuente: Elaboración propia.	72

49. Comparación serie anual simulados vs observados – M ^a Cristina (1959/60 – 2015/16). Fuente: Elaboración propia.	73
50. Comparación del año hidrológico medio mensual – María Cristina. Fuente: Elaboración propia.	74
51. Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia.	75
52. Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – M ^a Cristina. Fuente: Elaboración propia.	75
53. Disposición espacial de las subcuencas incluidas en el modelo integral de la cuenca del río Mijares.	78
54. Comparación de la serie oficial de aportaciones anuales del S.E. Mijares–La Plana de Castellón frente a las series simuladas con el modelo HBV integrado. Fuente: Elaboración propia.	81
55. Comparación de la serie oficial de aportaciones anuales del S.E. Mijares–La Plana de Castellón frente a la serie simulada con el modelo HBV integrado (parámetros Arenós). Fuente: Elaboración propia.	82
56. Serie diaria de aportación en la cuenca del río Mijares (modelo HBV integrado con <i>EvalHid</i>).	84

1 Introducción

La gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos constituye uno de los principales desafíos en las regiones mediterráneas, donde la disponibilidad de agua está condicionada por la alta variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones, así como por el incremento de la demanda y los efectos del cambio climático. En este contexto, la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) representa un ámbito estratégico tanto por su complejidad hidrográfica como por la presión a la que están sometidos sus sistemas de explotación, especialmente en cuencas como la del río Mijares (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a, 2023b).

La evaluación precisa del recurso hídrico almacenado en los embalses es fundamental para la toma de decisiones relativas a la asignación, explotación y preservación de los caudales ecológicos, así como para garantizar el equilibrio entre los diferentes usos (urbano, agrícola, industrial y ambiental). Para ello, la modelización hidrológica constituye una herramienta esencial, permitiendo simular el comportamiento de la cuenca bajo distintos escenarios y aportando una base cuantitativa para la planificación y gestión integral del agua (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a).

En el presente trabajo se aborda la evaluación del recurso hídrico en diferentes localizaciones del Sistema de Recursos Hídricos de la cuenca del río Mijares. Dentro de esos puntos, es de gran interés la evaluación en los embalses: **Arenós, Siches y M^a Cristina**. Estos embalses desempeñan un papel estratégico dentro del sistema de explotación *Mijares-Plana de Castellón*, al constituir la principal infraestructura de almacenamiento y regulación hídrica de la cuenca. Su gestión resulta clave para asegurar la satisfacción de las demandas de agua potable, el riego agrícola, el soporte a usos industriales y urbanos, así como para mantener los caudales ecológicos y minimizar los efectos de eventos extremos, como sequías e inundaciones (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

Para la estimación y análisis del recurso almacenado y su régimen de explotación, se utilizará la herramienta *EvalHid* y en particular el modelo hidrológico HBV, el cual será alimentado con registros históricos de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) disponibles para la zona de estudio y calibrado a partir de los caudales observados en los diferentes puntos de control. La calibración del modelo se realizará mediante algoritmos de optimización, con el objetivo de obtener una representación robusta del régimen hidrológico y de los balances hídricos asociados.

La relevancia de este trabajo radica en la aplicación de metodologías contrastadas a nivel internacional para la estimación y gestión de los recursos hídricos, así como en

su contribución al cumplimiento de los objetivos establecidos por la Directiva Marco del Agua (DMA) y el Plan Hidrológico de la Demarcación del Júcar (PHJ), en línea con las recomendaciones técnicas más recientes para el desarrollo y evaluación de modelos hidrológicos. (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a, 2023b; Kim et al., 2020; Mohammadi et al., 2020)

Por último, el enfoque metodológico propuesto permitirá no solo analizar la situación actual de los recursos hídricos en la cuenca del Mijares, sino también establecer las bases para estudios futuros sobre el impacto del cambio climático, la gestión de sequías y la planificación adaptativa de los recursos en contextos de elevada incertidumbre.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

- Evaluar la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico en diferentes puntos del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón, haciendo especial énfasis aguas arriba de los embalses de Arenós, Schar y M^a Cristina, mediante la implementación, calibración y validación del modelo HBV con la herramienta *EvalHid*, en el contexto de la planificación hidrológica de la DHJ.

2.2 Objetivos específicos

- Recopilar y analizar los datos históricos de precipitación, evapotranspiración potencial y caudales observados en la cuenca del río Mijares, relevantes para las principales infraestructuras y puntos de control del sistema, incluyendo los embalses de Arenós, Schar y M^a Cristina.
- Describir las principales características hidrológicas, fisiográficas y de uso del suelo en la cuenca de aporte y en las localizaciones seleccionadas del sistema.
- Implementar el modelo conceptual HBV para la simulación del balance hídrico y la estimación de caudales en las distintas localizaciones bajo estudio, utilizando la herramienta *EvalHid*.
- Calibrar y validar el modelo HBV, a través de la herramienta *EvalHid*, empleando algoritmos de optimización y series de caudales observados, evaluando la precisión y robustez de las simulaciones obtenidas en cada localización.
- Analizar los resultados obtenidos y discutir la aplicabilidad del modelo en el contexto de la gestión integral del recurso hídrico, considerando el marco normativo vigente y los retos asociados a la variabilidad climática.

3 Estado del Arte

3.1 Modelación hidrológica en la gestión de recursos hídricos

La modelación hidrológica se ha consolidado como una herramienta fundamental para la gestión integrada de los recursos hídricos, en particular en regiones sometidas a una elevada variabilidad climática como las cuencas mediterráneas. Su aplicación permite simular el comportamiento del ciclo hidrológico en diferentes escenarios climáticos, de uso del suelo o de presión antrópica, y evaluar con ello la disponibilidad, fiabilidad y sostenibilidad del recurso hídrico en distintas escalas espaciales y temporales (Kim et al., 2020).

En el contexto de la planificación hidrológica, esta modelación permite evaluar balances hídricos, identificar zonas de riesgo por sequías o inundaciones, y analizar la eficacia de distintas estrategias de gestión del recurso. Además, los modelos hidrológicos constituyen la base para sistemas de ayuda a la decisión, como los empleados en la DHJ, y son esenciales para el cumplimiento de las exigencias de la DMA en cuanto a la caracterización de masas de agua y garantía de caudales ecológicos (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a).

El proceso de modelación implica la integración de datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudales), características físicas de la cuenca (topografía, uso del suelo, geología) y condiciones de contorno, junto con algoritmos matemáticos que describen el movimiento y almacenamiento del agua. Dependiendo del grado de detalle requerido, se puede optar por modelos distribuidos, semidistribuidos o agregados, en función del nivel de subdivisión espacial y la disponibilidad de información.

Los resultados de un modelo hidrológico bien calibrado y validado son fundamentales para estimar aportaciones en régimen natural, planificar la explotación de embalses, evaluar impactos del cambio climático y definir políticas de asignación de recursos. En este sentido, la modelación hidrológica se configura como una herramienta esencial para la toma de decisiones en la gestión sostenible del agua, particularmente en entornos con alta competencia por el recurso y creciente incertidumbre hidroclimática.

3.2 Modelos precipitación-escorrentía

La modelación hidrológica precipitación-escorrentía constituye un enfoque esencial para comprender y prever el comportamiento de las cuencas hidrográficas en términos de generación de caudales. Estos modelos permiten estimar la respuesta de una cuenca frente a eventos meteorológicos específicos, tales como lluvias o derretimiento de nieve, estableciendo una relación funcional entre entradas como la precipitación y la evapotranspiración potencial, y salidas como la escorrentía superficial y subterránea (Kim et al., 2020).

Los modelos precipitación-escorrentía se pueden clasificar principalmente en tres tipos según su enfoque metodológico: físicos, empíricos y conceptuales (Mohammadi et al., 2020). Los modelos físicos están basados en leyes físicas fundamentales, como la conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, requiriendo una detallada descripción de las características de la cuenca, como topografía, tipos de suelo y cobertura vegetal. Por otro lado, los modelos empíricos utilizan relaciones estadísticas derivadas directamente de registros históricos, sin profundizar en los procesos internos del ciclo hidrológico. Finalmente, los modelos conceptuales ofrecen un equilibrio entre complejidad y simplicidad, representando los procesos hidrológicos mediante almacenamiento y transferencia de agua en distintos reservorios (Paredes-Arquiola et al., 2017).

3.3 El modelo HBV

3.3.1 Orígenes y evolución del modelo

El modelo HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) es un modelo conceptual, semi-distribuido y determinista, desarrollado originalmente por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para la simulación de la escorrentía en cuencas hidrográficas (Bergström, 1995). Su filosofía se basa en representar los procesos dominantes del ciclo hidrológico mediante una estructura modular simple y con un número reducido de parámetros, lo que permite su aplicación tanto en estudios académicos como en la gestión operativa del recurso hídrico.

3.3.2 Antecedentes

La modelación hidrológica ha evolucionado de manera notable en las últimas décadas, consolidándose como una herramienta imprescindible para la gestión sostenible de los

recursos hídricos frente a desafíos como el cambio climático, la variabilidad extrema y las presiones sectoriales. Dentro de este panorama, los modelos conceptualizados precipitación-escorrentía, y en particular el modelo HBV, han cobrado relevancia por su equilibrio entre precisión, versatilidad y requerimientos de datos razonables. Desde sus primeras aplicaciones en regiones alpinas hasta su adaptación a cuencas mediterráneas, estos modelos han demostrado una capacidad de ajuste adecuada incluso en escenarios de datos limitados (Bergström, 1995; Kim et al., 2020; Mohammadi et al., 2020).

Estudios recientes realizados en cuencas semiáridas del norte de África han empleado estrategias de validación cruzada anidada (*nested cross-validation*) para evaluar la estabilidad espacial y temporal del modelado con HBV, utilizando indicadores como el NSE y el KGE. Los resultados muestran que, si bien el modelo tiende a mantener una buena capacidad predictiva entre subcuencas, su desempeño puede decrecer en entornos con procesos hidrológicos complejos, como la interacción entre el suelo y el afloramiento o la dinámica del manto nivoso (El Amrani et al., 2024).

De manera similar, en regiones mediterráneas como Turquía, el modelo HBV-Light ha sido aplicado para evaluar el impacto del cambio climático, obteniendo resultados con valores de eficiencia NSE entre 0,66 y 0,69 en periodos de calibración y validación. Las proyecciones a futuro bajo escenarios RCP (*Representative Concentration Pathways*) 4.5 y 8.5 indicaron una tendencia decreciente en los caudales medios anuales, lo cual demuestra la utilidad del modelo en el análisis de escenarios prospectivos (Kula et al., 2023).

Un elemento clave para mejorar la calibración automática del HBV ha sido la comparación de algoritmos evolutivos de última generación. Un estudio reciente en Polonia comparó variantes de *Differential Evolution* (DE) con *Particle Swarm Optimization* (PSO), concluyendo que las versiones adaptadas de DE superan en desempeño a PSO, especialmente frente a la alta dimensionalidad de los modelos conceptuales como HBV o GR4J (Kamienna et al., 2022). Estos resultados respaldan la elección del algoritmo DE en el presente trabajo.

Asimismo, se han desarrollado enfoques híbridos que integran el modelo HBV con técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales. Estas estrategias buscan combinar la representatividad física del modelo conceptual con la capacidad adaptativa de los modelos de aprendizaje automático. Por ejemplo, se ha demostrado que estructuras diferenciables y regionalizadas pueden lograr niveles de precisión similares a los modelos LSTM (*Long Short-Term Memory*), manteniendo interpretabilidad y vínculos con procesos físicos reales (Feng et al., 2022).

En el contexto español, la herramienta *EvalHid*, integrada en el sistema AQUATOOL, ha facilitado la implementación de modelos como HBV en la planificación hidrológica oficial. *EvalHid* permite la configuración modular de subcuencas, el acoplamiento con balances de explotación y la interoperabilidad con el sistema SIMGES, siendo utilizada por organismos como la Confederación Hidrográfica del Júcar (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a, 2023b; Paredes-Arquiola et al., 2017). No obstante, persisten desafíos en la integración completa con bases de datos oficiales y en la modelación de procesos como la evapotranspiración real o la recarga subterránea.

En resumen, el modelo HBV continúa siendo una referencia sólida en la evaluación de recursos hídricos, tanto en estudios académicos como en aplicaciones institucionales. Su efectividad depende en gran medida de la calidad de los datos, la adecuada calibración y la consideración de los procesos específicos de cada cuenca. El presente trabajo se alinea con esta corriente de desarrollo, aplicando el modelo HBV en una cuenca mediterránea compleja, calibrado mediante *Differential Evolution* e interpretado bajo los objetivos de la planificación hidrológica vigente.

3.3.3 Ventajas y limitaciones

Entre las ventajas del HBV se destacan su simplicidad relativa, bajo requerimiento de datos, posibilidad de uso en condiciones de escasez de información y buena capacidad de reproducción de caudales en distintos entornos climáticos. No obstante, como modelo conceptual, simplifica muchos procesos físicos y depende en gran medida de la calibración, lo que puede limitar su extrapolación a condiciones futuras sin re-calibración (Kim et al., 2020; Mohammadi et al., 2020).

4 Metodología

4.1 Metodología General

La metodología seguida en este trabajo se ha estructurado en cinco etapas secuenciales, desde la recopilación y preprocesamiento de datos hasta la validación del modelo hidrológico HBV. Estas fases han sido diseñadas con el objetivo de garantizar una correcta implementación del modelo, su ajuste a las condiciones reales de la cuenca del Mijares y su posterior evaluación como herramienta de apoyo a la gestión del recurso hídrico.

En la Figura 1 se ilustra el proceso de implementación del modelo HBV en su diferentes fases.

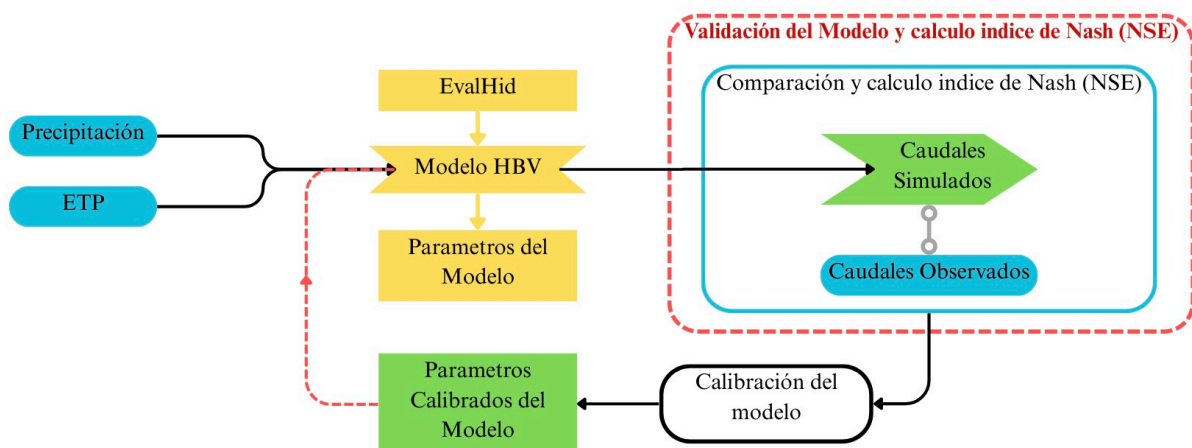


Figura 1: Esquema Resumen de la Metodología. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.1 Recopilación de la información

En primer lugar, se lleva a cabo la recopilación de información meteorológica e hidrológica necesaria para la configuración del modelo. Esta información incluye:

- Series diarias de precipitación, temperatura mínima y máxima, obtenidas del sistema de Rejilla ROCIO de la AEMET, el cual son un conjunto de datos de un sistema de rejillas de alta resolución que cubre a España e Islas Baleares.
- Series diarias de evapotranspiración potencial obtenidas usando el método de Hargreaves a partir de los datos de temperatura mínima, máxima y media diaria obtenidos del sistema de Rejilla ROCIO de la AEMET.

- Aportaciones en los embalses de Arenós, Sicha y M^a Cristina, suministrados por la Confederación Hidrográfica del Júcar, obtenidos por los respectivos balances o la restitución de caudales a régimen natural.
- Características fisiográficas de la cuenca (área de drenaje, uso del suelo, presiones antropicas, estructuras hidráulicas), derivadas de herramientas SIG y documentación oficial del Plan Hidrológico. Si bien esta información no constituyen variables explícitas del modelo HBV, proporcionan información fundamental para el cálculo e interpretación de las variables de entrada principales y permiten contextualizar de forma más precisa los valores calibrados de los parámetros del modelo, mejorando así su representatividad hidrológica y su adecuación a las condiciones reales de la cuenca.

Esta información se organizó en series temporales continuas y se homogeneizó para su uso en la herramienta *EvalHid*, que actúa como interfaz de implementación del modelo HBV.

4.1.2 Simulación inicial de caudales

Con las series diarias de Precipitación y ETP, se procede a una primera ejecución del modelo HBV con parámetros iniciales estimados a partir de literatura técnica y estudios previos realizados en cuencas de características similares (Bergström, 1995; Mohammadi et al., 2020). Esta simulación preliminar se realiza con el set de calibración el cual corresponde al 80 % de los datos disponibles, permitiendo obtener una primera aproximación de los caudales simulados con una acumulación mensual, permitiendo la siguiente fase de comparación de los caudales.

4.1.3 Comparación de caudales

Los caudales simulados se comparan con las series mensuales de aportaciones a los embalses. Esta comparación se realizó con el fin de evaluar la capacidad predictiva inicial del modelo. Se utilizó como indicador estadístico el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), permitiendo identificar las discrepancias entre ambos registros y ocupando el lugar de función objetivo en el proceso de calibración.

4.1.4 Calibración del modelo

La etapa de calibración consiste en el ajuste automático de los parámetros del modelo HBV con el objetivo de minimizar las discrepancias entre los caudales simulados y los

observados durante un periodo representativo. Para ello, se implementó el algoritmo de optimización *Differential Evolution* (DE), ampliamente reconocido por su eficacia en problemas de ajuste no lineal y búsqueda global en espacios paramétricos complejos (Kamienna et al., 2022; Storn & Price, 1997).

La calibración se llevó a cabo de forma individual para cada una de las subcuencas asociadas a los puntos de control seleccionados, empleando periodos históricamente representativos que incluyen tanto años secos como húmedos. Esta estrategia permite capturar adecuadamente la variabilidad interanual y garantizar la robustez del ajuste hidrológico.

El periodo de calibración fue definido en función de la disponibilidad y calidad de los datos en cada subcuenca, destinando aproximadamente el 80 % de los registros disponibles para dicha etapa. El 20 % restante se reservó para la validación del modelo.

Como función objetivo se empleó el índice clásico de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), ampliamente utilizado en modelación hidrológica para evaluar la calidad del ajuste entre las series simuladas y observadas. Este índice toma valores entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo que representa una correspondencia perfecta entre simulaciones y observaciones.

El NSE se calcula según la siguiente expresión:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Donde $Q_{obs,i}$ y $Q_{sim,i}$ representan los caudales observados y simulados, respectivamente, en el instante i , y $\bar{Q}_{obs}$ es el valor medio de los caudales observados.

Esta configuración permite evaluar de manera integrada el comportamiento del modelo a lo largo del periodo de simulación, incluyendo tanto valores medios como extremos, sin aplicar ningún tipo de truncamiento o ponderación diferencial. Si bien los eventos de gran magnitud pueden influir significativamente en el valor del NSE, se considera que su inclusión es necesaria para representar fielmente la dinámica hidrológica en cuencas mediterráneas, caracterizadas por su alta estacionalidad e intensidad de eventos.

En consecuencia, la calibración basada en el NSE clásico favorece configuraciones paramétricas que optimizan el ajuste global del sistema, permitiendo una evaluación directa y comparativa del desempeño del modelo en diferentes subcuencas y configuraciones espaciales.

4.1.5 Validación de los parámetros del modelo

Una vez finalizada la fase de calibración, se procede a la validación del modelo mediante una simulación independiente utilizando el conjunto de validación, correspondiente al 20 % de los datos que no son empleados en la etapa de calibración. Esta etapa permite comprobar de forma rigurosa la capacidad predictiva del modelo mediante el cálculo del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), un indicador ampliamente reconocido para evaluar el desempeño hidrológico.

La validación estadística asegura que los parámetros obtenidos durante la calibración proporcionan resultados consistentes y estables, reproduciendo adecuadamente los caudales observados en un periodo independiente. De este modo, se confirma la robustez del modelo y su fiabilidad como herramienta para la simulación y el análisis hidrológico en la cuenca del río Mijares.

4.2 La Herramienta *EvalHid*

En el presente trabajo, la implementación del modelo HBV se realiza mediante la herramienta *EvalHid*, desarrollada por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos de la Universitat Politècnica de València. *EvalHid* permite construir modelos precipitación-escorrentía agregados o semidistribuidos, y dispone de múltiples opciones para seleccionar el tipo de modelo conceptual (HBV, Témez, Sacramento, entre otros), en función de la complejidad de la cuenca y la disponibilidad de datos (Paredes-Arquiola et al., 2017).

4.2.1 Aplicación del HBV con *EvalHid*

En el entorno español, el modelo HBV ha sido implementado con éxito a través de la herramienta *EvalHid*, integrada en el sistema AQUATOOL. Esta plataforma permite aplicar HBV de forma semidistribuida en cuencas complejas como la del río Mijares, facilitando el manejo de datos, la estructuración en subcuencas, la configuración de parámetros y la generación de resultados de aportaciones superficiales (Paredes-Arquiola et al., 2017).

Su integración con herramientas de simulación de gestión (SIMGES) y asignación de recursos (OPTIGES) permite utilizar los resultados hidrológicos de HBV como base para la planificación integral de los recursos hídricos.

EvalHid está diseñado para integrarse en el sistema de soporte de decisión *AQUATOOL*, ampliamente utilizado por organismos de cuenca en España para la planificación hidrológica. Esta integración permite acoplar los resultados de simulación hidrológica con herramientas de gestión de embalses, explotación de acuíferos y análisis de asignaciones y demandas hídricas.

4.2.2 Estructura conceptual del modelo HBV

El modelo *HBV* (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*) es un modelo hidrológico conceptual y agregado de tipo precipitación–escorrentía, utilizado ampliamente en previsión hidrológica y estudios de balance hídrico. Desarrollado originalmente por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) en los años 70 (Bergström, 1976; 1995), el modelo ha evolucionado en diversas versiones. En este trabajo se utiliza una adaptación desarrollada por el Instituto de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Stuttgart, implementada en la herramienta *EvalHid* (Paredes-Arquiola et al., 2017).

El modelo puede aplicarse a escala diaria o mensual y requiere como datos de entrada: series temporales de precipitación y temperatura, así como estimaciones de temperatura y evapotranspiración potencial medias mensuales a largo plazo. Su estructura se basa en celdas de almacenamiento y funciones de transferencia entre compartimentos (Paredes-Arquiola et al., 2017).

Módulo de humedad del suelo: La precipitación P se divide en dos fracciones: (i) almacenamiento en el suelo SM , disponible para la evapotranspiración, y (ii) filtración hacia capas más profundas. La infiltración efectiva se estima según:

$$Inf = P \cdot \left(\frac{SM}{FC} \right)^{\beta}$$

donde:

- FC : capacidad de campo del suelo [mm].
- β : parámetro de forma adimensional.
- SM : contenido de humedad del suelo [mm].

Módulo de evapotranspiración: La evapotranspiración real ET_{real} se calcula en función de la evapotranspiración potencial y del contenido de humedad. Si $SM < PWP$, la evapotranspiración se reduce:

$$ET_{\text{real}} = \begin{cases} ETP, & \text{si } SM > PWP \\ ETP \cdot \left(\frac{SM}{PWP}\right), & \text{si } SM \leq PWP \end{cases}$$

Donde PWP es el punto de marchitez del suelo.

Balance de humedad en el suelo: La humedad del suelo resultante incorporando la precipitación, retirando la evapotranspiración real y la infiltración, resulta:

$$SM_{\text{nuevo}} = SM_{\text{ant}} + P - \text{Inf} - ET_{\text{real}}$$

Si $SM_{\text{nuevo}} > FC$, el exceso se asigna como escorrentía directa:

$$Q_s = SM_{\text{nuevo}} - FC$$

Escorrentía subsuperficial: El flujo subsuperficial se modela mediante una celda superior con dos descargas:

- Descarga rápida: $Q_0 = K_0 \cdot (S_1 - L_m)$, si $S_1 > L_m$,
- Descarga lenta: $Q_1 = K_1 \cdot S_1$,

y una percolación hacia una celda profunda:

$$Q_{\text{perc}} = K_{\text{perc}} \cdot S_1$$

Escorrentía subterránea: La celda profunda produce un flujo base:

$$Q_2 = K_2 \cdot S_2$$

Escorrentía total: La escorrentía total generada por el modelo es:

$$Q_{\text{total}} = Q_s + Q_0 + Q_1 + Q_2$$

El caudal o volumen final se obtiene multiplicando por la superficie de la cuenca.

Parámetros del modelo El HBV opera con un número moderado de parámetros empíricos que deben ser calibrados para cada cuenca, consignados en la Tabla 1:

Tabla 1: Parámetros del modelo HBV.
Fuente: (Paredes-Arquiola et al., 2017)

Zona	Parámetro	Descripción	Unidades
Suelo	FC	Capacidad de campo	mm
	β	Coeficiente de forma	—
	PWP	Punto de marchitez	mm
Celda subsuperficial	L_m	Umbral descarga rápida	mm
	K_0	Coef. descarga rápida	—
	K_1	Coef. recesión (tanque superior)	—
	K_{perc}	Coef. percolación	—
Celda profunda	K_2	Coef. recesión (tanque inferior)	—

Estos parámetros influyen en la distribución temporal del caudal simulado y deben ajustarse cuidadosamente mediante técnicas de calibración automática o manual, utilizando series temporales de caudales observados.

Condiciones y restricciones

- $PWP < FC$
- $K_0 > K_1 > K_2$
- $K_0 + K_1 + K_{perc} \leq 1$
- Todos los coeficientes de descarga deben ser ≤ 1

Además, es necesario definir condiciones iniciales:

- Humedad inicial del suelo SM_0
- Almacenamientos iniciales $S_{1,0}, S_{2,0}$

4.3 Algoritmos de optimización y el algoritmo *Differential Evolution*

4.3.1 Introducción a los algoritmos de optimización

En el contexto de la modelación hidrológica, la calibración de modelos conceptuales como el HBV requiere determinar un conjunto de parámetros que no siempre pueden medirse directamente. Debido a la complejidad de las funciones objetivo implicadas—habitualmente no lineales, multimodales y con múltiples mínimos locales—, se recurre a algoritmos de optimización que permitan encontrar el conjunto de parámetros que minimice el error entre los caudales observados y simulados (Mohammadi et al., 2020).

Los algoritmos de optimización se clasifican, de manera general, en métodos deterministas y estocásticos. Los primeros, como el método del gradiente descendente, son eficientes cuando la función objetivo es suave y diferenciable, pero pueden quedar atrapados en óptimos locales. En cambio, los métodos estocásticos—como los algoritmos genéticos, de enjambre de partículas o de evolución diferencial—no requieren información derivativa y son más robustos frente a funciones objetivo con discontinuidades o ruido, lo cual los hace especialmente útiles en aplicaciones hidrológicas bajo condiciones de incertidumbre (Kim et al., 2020).

4.3.2 Descripción del algoritmo *Differential Evolution*

El algoritmo *Differential Evolution* (DE), propuesto por Storn y Price en 1997 (Storn & Price, 1997), es un algoritmo evolutivo estocástico diseñado para resolver problemas de optimización en espacios continuos. Su eficacia ha sido demostrada en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la calibración de modelos hidrológicos, donde se busca un balance entre precisión, eficiencia computacional y robustez frente a la variabilidad de los datos (Mohammadi et al., 2020).

A diferencia de otros métodos evolutivos, DE utiliza diferencias entre individuos de la población para generar nuevas soluciones, lo que favorece una mejor exploración del espacio de búsqueda. Entre sus ventajas se destacan la simplicidad de implementación, el reducido número de parámetros de control y su capacidad para converger hacia soluciones globales sin necesidad de derivadas.

4.3.3 Funcionamiento del algoritmo *Differential Evolution*

El algoritmo *Differential Evolution* (DE) es una técnica de optimización estocástica basada en población, ampliamente utilizada para el ajuste de modelos no lineales. Su funcionamiento se basa en la evolución de una población de soluciones candidatas a través de iteraciones sucesivas, mediante tres operadores principales: *mutación*, *recombinación* y *selección* (Storn & Price, 1997).

En este trabajo se ha empleado la formulación clásica del algoritmo DE, sin variantes adaptativas o híbridas. Aunque existen múltiples estrategias alternativas que modifican los mecanismos de generación de vectores mutantes, selección de individuos, o inclusión de perturbaciones adaptativas, se ha optado por aplicar la versión estándar para facilitar su implementación y reproducibilidad.

El proceso general de funcionamiento se describe a continuación:

- **Inicialización:** Se genera una población inicial de N vectores $\vec{x}_i$ (para $i = 1, \dots, N$), cada uno de dimensión D , con valores distribuidos aleatoriamente en el espacio de búsqueda definido por los límites de cada parámetro del modelo HBV. En esta etapa, se evalúa la función objetivo de cada individuo utilizando el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ver sección de calibración), almacenando el valor correspondiente para su uso en la etapa de selección.
- **Bucle evolutivo:** Una vez creada la población inicial, comienza el proceso iterativo. En cada generación se recorre toda la población y, para cada individuo objetivo (o *target*), se aplican los siguientes pasos:
 - **Mutación:** Se seleccionan aleatoriamente tres individuos distintos $\vec{x}_a$, $\vec{x}_b$, y $\vec{x}_c$ de la población actual, y se genera un vector mutante:

$$\vec{v}_i = \vec{x}_a + F \cdot (\vec{x}_b - \vec{x}_c)$$

donde $F \in [0, 2]$ es el factor de escala que controla la amplitud de la perturbación diferencial. Este paso introduce variabilidad y explora nuevas regiones del espacio de soluciones.

- **Recombinación:** Se genera un vector de prueba $\vec{u}_i$ combinando el vector mutante $\vec{v}_i$ con el individuo objetivo $\vec{x}_i$, según una tasa de recombinación $CR \in [0, 1]$:

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & \text{si } rand_j(0, 1) \leq CR \text{ o } j = j_{rand} \\ x_{i,j} & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Este operador permite incorporar características nuevas manteniendo parte de la información original.

- **Selección:** Se evalúa la función objetivo sobre el nuevo vector de prueba $\vec{u}_i$ (recordando que la evaluación de $\vec{x}_i$ ya fue realizada previamente). El individuo con mejor desempeño (mayor índice de Nash) se conserva para la siguiente generación:

$$\vec{x}_i^{(t+1)} = \begin{cases} \vec{u}_i & \text{si } f(\vec{u}_i) \geq f(\vec{x}_i) \\ \vec{x}_i & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

El criterio de selección se basa en la maximización del índice de Nash Sutcliffe (NSE) se busca que $f(\vec{u}_i)$ sea mayor que $f(\vec{x}_i)$

- **Criterio de parada:** Este proceso se repite durante un número predefinido de generaciones (o iteraciones), o hasta que se alcance un criterio de convergencia relacionado con la mejora del valor de la función objetivo.

Gracias a su simplicidad, su eficiencia exploratoria y su capacidad para evitar óptimos locales, el algoritmo *Differential Evolution* ha demostrado ser una de las herramientas más efectivas para la calibración de modelos hidrológicos como el HBV, especialmente en contextos con múltiples parámetros y superficies de error complejas.

5 Descripción de la Cuenca en Estudio

5.1 Características Principales

La cuenca del río Mijares forma parte de la vertiente mediterránea de la península ibérica y se extiende a lo largo de aproximadamente 4.818 km², comprendiendo tanto la cuenca principal del Mijares como subcuencas anexas como las del río Vero, río Seco, Belcaire, la Rambla de la Viuda y las subcuencas litorales comprendidas entre Benicasim, incluido su término municipal, y el límite provincial entre Castellón y València como se puede ver en la Figura 2. Esta unidad hidrográfica desempeña un papel estratégico en la gestión de los recursos hídricos de la provincia de Castellón y se encuentra adscrita a la Confederación Hidrográfica del Júcar como el sistema de explotación Mijares - Plana de Castellón (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a).

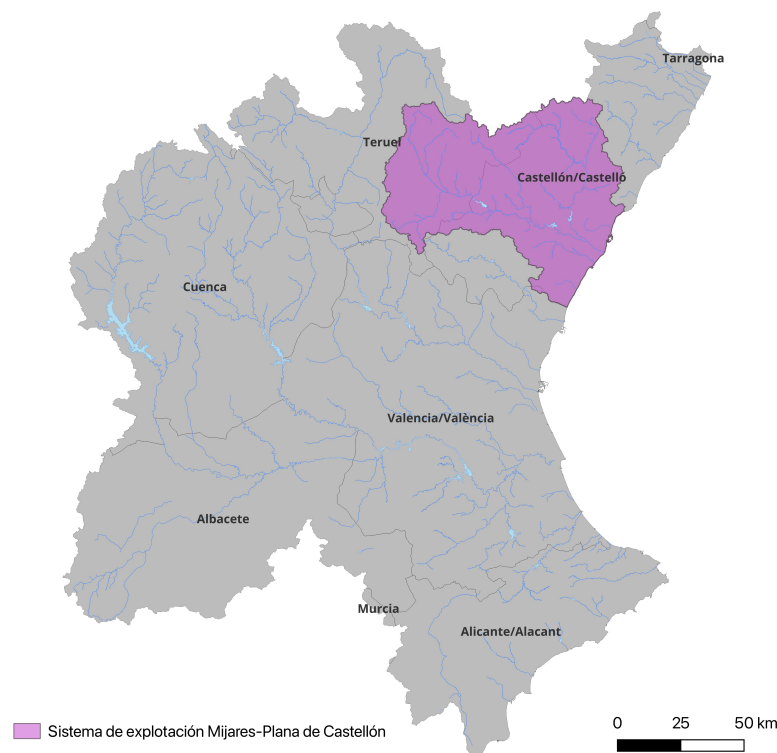


Figura 2: Sistema de explotación Mijares - Plana de Castellón dentro de la DHJ.
Fuente: Elaboración Propia.

El sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón constituye una unidad funcional compleja que integra elementos tanto naturales como artificiales, con el objetivo de gestionar de forma coordinada los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Está

diseñado para satisfacer una amplia gama de usos, entre los que destacan el agrícola, urbano, industrial y ambiental. El sistema abarca el cauce principal del río Mijares, sus afluentes, el acuífero detrítico de la Plana de Castellón y una infraestructura hidráulica compuesta por embalses, azudes, canales y redes de distribución. En su configuración oficial, se han identificado un total de 52 masas de agua superficial de categoría río, 2 de categoría lago, 3 de categoría costera, así como 14 masas de agua subterránea, lo que evidencia la diversidad y complejidad del sistema en términos de planificación y gestión integrada (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

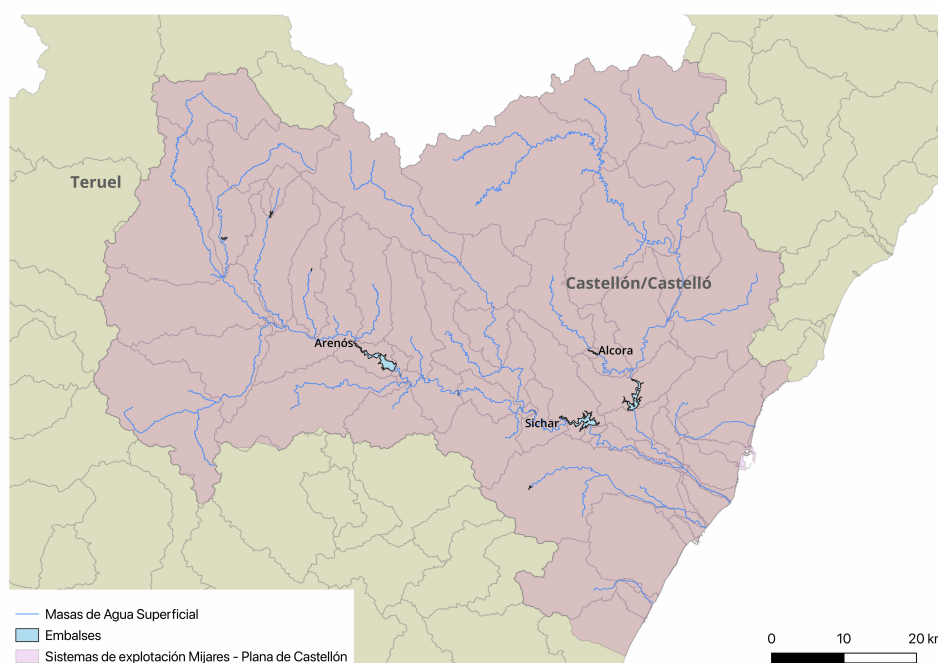


Figura 3: Sistema de explotación Mijares - Plana de Castellón.
Fuente: Elaboración Propia.

Desde el punto de vista operativo, el sistema presenta una zonificación funcional: la cuenca alta, que actúa como área de recarga y almacenamiento; la cuenca media, caracterizada por su encajonamiento y respuesta rápida ante eventos intensos de precipitación; y la cuenca baja, donde se localizan los principales focos de demanda. Las transferencias entre subsistemas están reguladas mediante estructuras como los embalses de Arenós, Sichear y Mª Cristina, los cuales constituyen nodos clave del sistema de explotación.

5.2 Masas de Agua en el Sistema de Explotación

El sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón comprende una amplia diversidad de masas de agua superficial y subterránea que han sido definidas oficialmente en el marco del Plan Hidrológico de la Demarcación del Júcar. Estas masas de agua representan unidades básicas para el análisis del estado ecológico, químico y cuantitativo del recurso, y son fundamentales para la planificación y gestión integrada del sistema. A continuación, se presenta un inventario detallado de las masas de agua superficial presentes en el ámbito del sistema, incluyendo su codificación, denominación, categoría y superficie asociada. Adicionalmente una descripción de las masas de agua subterránea presentes en el sistema.

5.2.1 Masas de Agua Superficial

En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de las masas de agua superficial en el ámbito del sistema, mientras que el inventario detallado de cada una de ellas se presenta en la Tabla 2.

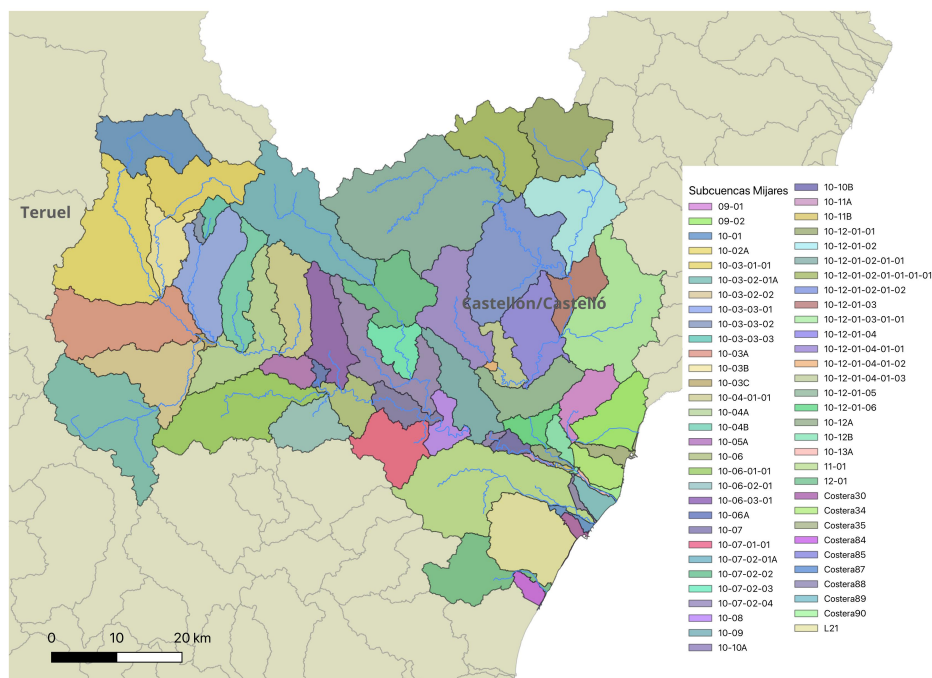


Figura 4: Masas de Agua Superficial en el S.E. Mijares-Plana de Castellón.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2: Masas de agua en el sistema Mijares.
Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)

CodMasa	Denominación de la Masa	Categoría	Superficie (km ²)
09-01	Río Sec: cabecera - autopista AP-7	Río	51.88
09-02	Río Sec: autopista AP-7 - mar	Río	77.85
10-01	Río Mijares: cabecera - barranco del Charco	Río	109.08
10-02A	Río Mijares: barranco del Charco - río Valbona	Río	222.1
10-03-01-01	Río Alcalá: cabecera - río Valbona	Río	107.69
10-03-02-01A	Río Albentosa: cabecera - Manzanera	Río	205.31
10-03-02-02	Río Albentosa: Manzanera - río Mijares	Río	117.41
10-03-03-01	Río Mora: embalse de Mora de Rubielos - río Mijares	Río	116.12
10-03-03-02	Embalse de Mora de Rubielos	Lago	5.86
10-03-03-03	Barranco de Fuendenarices	Río	14.8
10-03A	Río Mijares: río Valbona - manantial de Babor	Río	169.3
10-03B	Río Valbona	Río	61.52
10-03C	Río Mijares: manantial de Babor - río Mora	Río	3.07
10-04-01-01	Río del Morrón	Río	84.32
10-04A	Río Mijares: río Mora - embalse de Arenós	Río	115.47
10-04B	Río Palomarejas: embalse de Balagueras - río Mijares	Río	70.85
10-05A	Embalse de Arenós	Lago	28.83
10-06	Río Mijares: embalse de Cirat - embalse de Vallat	Río	47.57
10-06-01-01	Barranco de la Maymona	Río	172.71
10-06-02-01	Río Montán	Río	67.28
10-06-03-01	Río Cortes	Río	81.72
10-06A	Río Mijares: embalse de Arenós - embalse de Cirat	Río	6.61
10-07	Río Mijares: embalse de Vallat - embalse de Ribesalbes	Río	36.15
10-07-01-01	Río Pequeño	Río	79.89
10-07-02-01A	Río Villahermosa: cabecera - barranco de la Canaleta	Río	199.5
10-07-02-02	Río Villahermosa: barranco de la Canaleta - barranco de Juaneta	Río	93.58

CodMasa	Denominación de la Masa	Categoría	Superficie (km ²)
10-07-02-03	Río Villahermosa: barranco de Juaneta - Ludiente	Río	45.98
10-07-02-04	Río Villahermosa: Mas del Plano de Herrera - río Mijares	Río	109.26
10-08	Río Mijares: embalse de Ribesalbes - embalse de Schar	Río	34.31
10-09	Embalse de Schar	Lago	85.17
10-10A	Río Mijares: embalse de Schar - toma del tramo común	Río	4.59
10-10B	Río Mijares: toma del tramo común - canal cota 100	Río	13.85
10-11A	Río Mijares: canal cota 100 - azud Vila-real	Río	3.22
10-11B	Río Mijares: azud Vila-real - rambla de la Viuda	Río	2.1
10-12-01-01	Rambla de la Viuda: cabecera - rambla de la Belluga	Río	118.66
10-12-01-02	Rambla de la Viuda: rambla de la Belluga - río Monleón	Río	127.57
10-12-01-02-01-01	Río Monleón: cabecera - barranco del Forcall	Río	358.76
10-12-01-02-01-01-01-01	Río Seco (Monleón)	Río	107.31
10-12-01-02-01-02	Río Monleón: barranco del Forcall - rambla de la Viuda	Río	186.91
10-12-01-03	Rambla de la Viuda: río Monleón - barranco de Cabanes	Río	53.78
10-12-01-03-01-01	Barranco de Cabanes	Río	204.49
10-12-01-04	Rambla de la Viuda: barranco de Cabanes - embalse de M ^a Cristina	Río	97.05
10-12-01-04-01-01	Río Lucena: cabecera - embalse de l'Alcora	Río	111.16
10-12-01-04-01-02	Embalse de l'Alcora	Lago	2.31
10-12-01-04-01-03	Río Lucena: embalse de l'Alcora - rambla de la Viuda	Río	35.05
10-12-01-05	Embalse de M ^a Cristina	Lago	76.73
10-12-01-06	Rambla de la Viuda: embalse de M ^a Cristina - autovía CV-10	Río	28.05
10-12A	Rambla de la Viuda: autovía CV-10 - río Mijares	Río	9.8
10-12B	Río Mijares: rambla de la Viuda - delta del Mijares	Río	18.56

CodMasa	Denominación de la Masa	Categoría	Superficie (km ²)
10-13A	Río Mijares: delta del Mijares - mar	Río	3.42
11-01	Río Vero: embalse de Onda - mar	Río	239.54
12-01	Río Belcaire	Río	90.23
L21	Marjal de Nules-Burriana	Lago	131.29

5.2.2 Masas de Agua Subterránea

El sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón integra un total de 14 masas de agua subterránea, de las cuales destacan por su importancia hidrogeológica y volumen de extracción las unidades Javalambre Oriental, Mosqueruela, Maestrazgo Occidental, Lucena–l’Alcora, Onda–Espadán, Plana de Castelló y Azuébar–Vall d’Uixó (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b). Estas unidades presentan características geológicas diversas, predominando las formaciones carbonatadas del Jurásico y Cretácico, con elevada permeabilidad. El acuífero detrítico de la Plana de Castellón, en particular, representa un componente fundamental del sistema, con una intensa explotación tanto para riego como para abastecimiento urbano, siendo este último suministrado principalmente por captaciones del Consorcio de la Plana y varios pozos municipales de gran caudal (Universidad Politécnica de Valencia, 2006). En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de estas masas subterráneas. Además, se han identificado importantes interacciones entre aguas superficiales y subterráneas, incluyendo recarga por infiltración de lluvia, retornos de riego y filtraciones desde embalses como el de Schar. La gestión de estas masas enfrenta desafíos como la sobreexplotación localizada y la intrusión marina, especialmente en las zonas costeras del acuífero de la Plana.

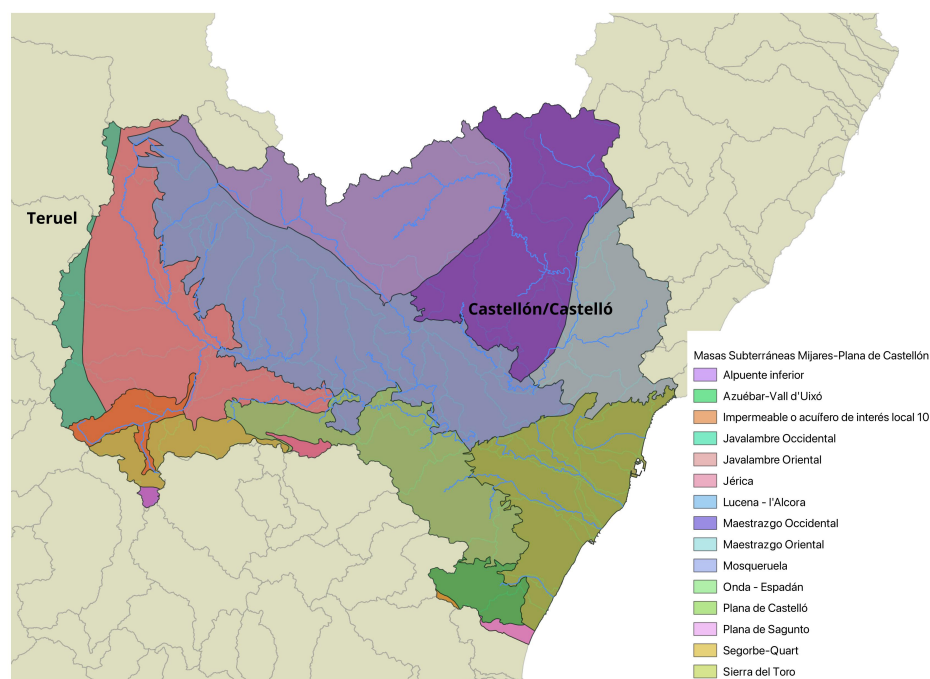


Figura 5: Masas de Agua Subterránea en el S.E. Mijares-Plana de Castellón.
Fuente: Elaboración Propia.

5.3 Usos y demandas

El sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón presenta una tipología de demandas diversificada, agrupadas conforme a la clasificación establecida en el Reglamento de la Planificación Hidrológica. A continuación, se describen las principales categorías de uso: abastecimiento, agropecuarios y producción de energía eléctrica.

5.3.1 Abastecimientos

Las demandas urbanas en el sistema Mijares–Plana de Castellón se satisfacen mayoritariamente a partir de aguas subterráneas, las cuales constituyen el recurso predominante para el consumo humano en la región. Se han identificado once Unidades de Demanda de Uso Urbano (UDU), entre las que destacan el abastecimiento a Castellón de la Plana, el Consorcio de Aguas de la Plana y la Plana de Castellón.

En términos cuantitativos, las estimaciones para los distintos escenarios de planificación muestran valores del orden de 41,8 hm³/año en la actualidad, con ligeras variaciones en los escenarios futuros. Este volumen incluye aportaciones procedentes

tanto de captaciones subterráneas como de plantas desalinizadoras y, en menor medida, de recursos superficiales(Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

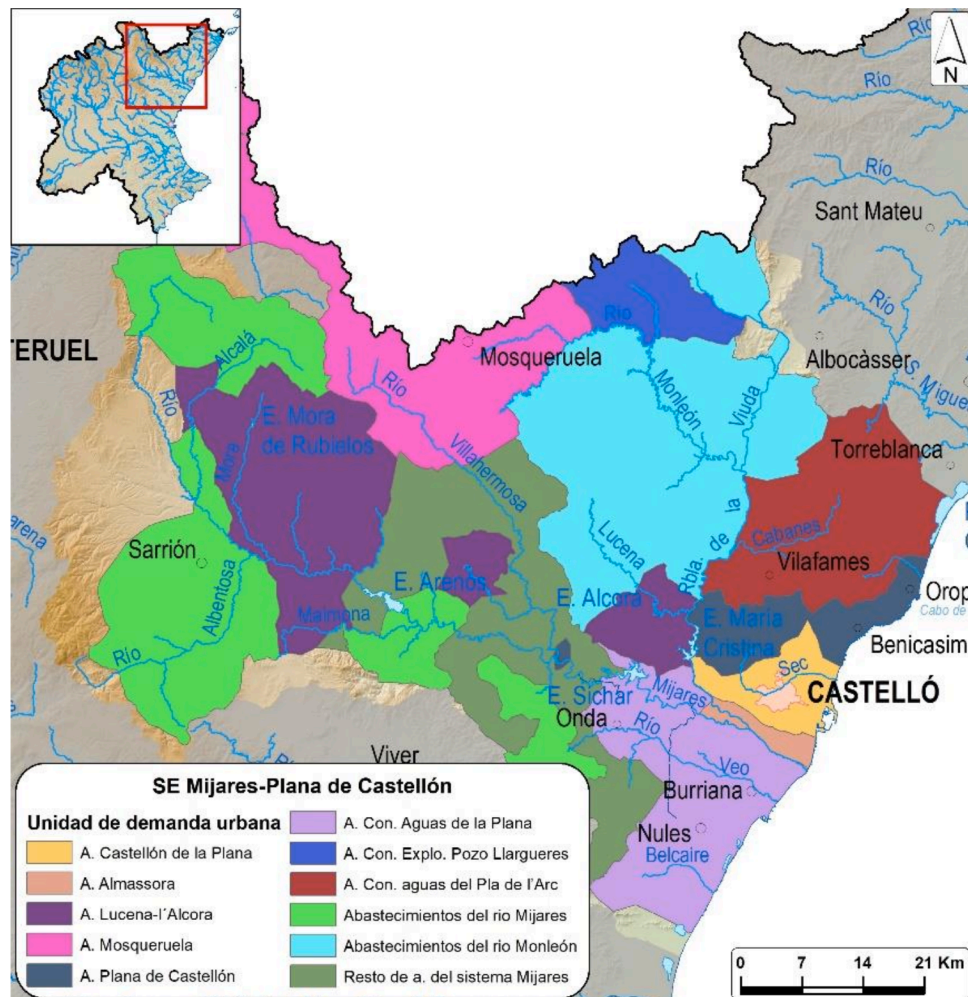


Figura 6: Unidades de Demanda Urbana - S.E. Mijares - Plana de Castellón.
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b

5.3.2 Usos agropecuarios

Los usos agropecuarios incluyen tanto el regadío agrícola como los usos ganaderos. El sistema cuenta con una extensa superficie agrícola en régimen de riego, articulada en diferentes unidades de demanda (UDA), que incluyen zonas como los regadíos tradicionales del Mijares, los canales de la cota 100 y cota 220, la zona regable del Pantano de M^a Cristina, la CGR la Vall d'Uixó y la CR Moncofa.

El volumen total de demanda agrícola estimado alcanza los 176 hm³/año en el escenario actual, manteniéndose relativamente constante en los horizontes futuros, debido a la consolidación de los derechos existentes y las medidas previstas de modernización. En lo referente al uso ganadero, se han definido tres unidades

específicas con una demanda total aproximada de 1,9 hm³/año, constante a lo largo del ciclo de planificación (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

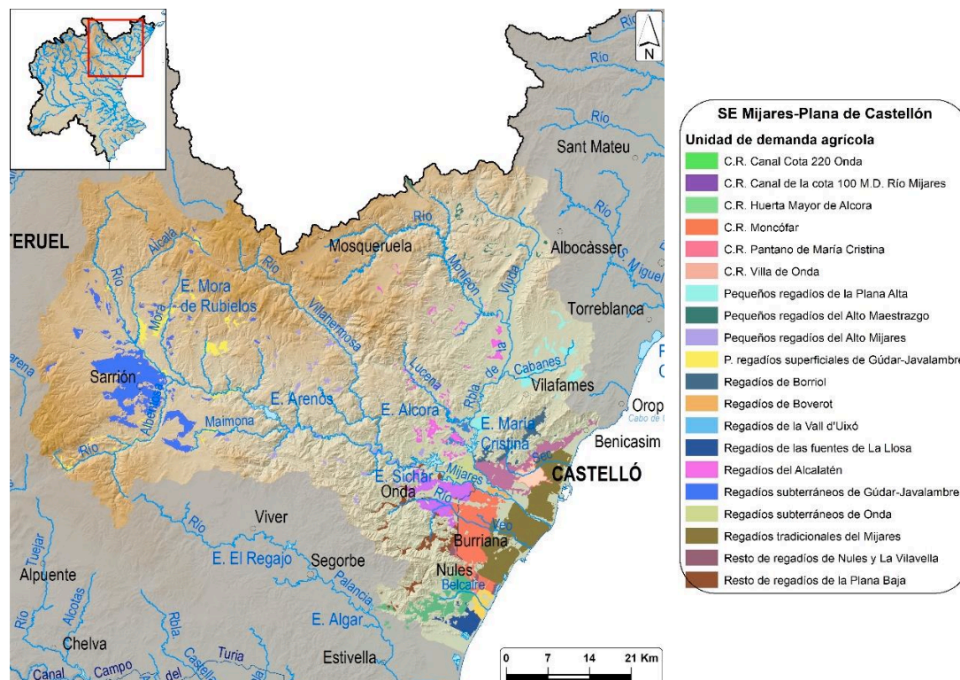


Figura 7: Unidades de Demanda Agrícola (UDA).
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b

5.3.3 Producción de energía eléctrica

Dentro de los usos industriales, destaca la producción de energía eléctrica, la cual se desarrolla mediante centrales hidroeléctricas y termoeléctricas. En el sistema se han identificado once Unidades de Demanda Hidroeléctrica (UDH), de las cuales siete están situadas aguas abajo de los principales embalses de regulación y han sido incluidas en el modelo de simulación por su influencia directa en la gestión del recurso.

Estas centrales operan en régimen fluyente, lo que implica que turbinan los caudales circulantes sin generar desembalses específicos para producción energética. Se incluyen instalaciones como Cirat, Vallat, Ribesalbes, Colmenar, Onda, Hidro y Villarreal, con coeficientes energéticos ajustados para reflejar fielmente la generación histórica registrada.

Adicionalmente, se considera la demanda de la central termoeléctrica de Castellón, con una asignación estable de 0,6 hm³/año, constante en todos los escenarios de planificación (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

5.4 Infraestructura hidráulica principal

La cuenca del río Mijares cuenta con una infraestructura hidráulica estratégica que permite la regulación, distribución y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico en el conjunto del sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón. Entre las obras principales se encuentran los embalses de Arenós, Sichar y M^a Cristina, que actúan como nodos clave para el almacenamiento y la gestión del caudal circulante, así como para garantizar el suministro tanto en periodos húmedos como en condiciones de escasez. Complementando a estos embalses, destacan los canales de la cota 100 y cota 220, infraestructuras fundamentales para el transporte del agua desde los puntos de regulación hacia las zonas de regadío y abastecimiento urbano e industrial en la Plana de Castellón. El conjunto de estas obras constituye el soporte físico que sustenta el funcionamiento hidráulico del sistema y su integración operativa en los modelos de simulación y planificación.

5.4.1 Embalses

- **Arenós:** Situado en la cuenca alta, sobre terrenos jurásicos, tiene una capacidad de 130 hm³. Su función principal es regular las aportaciones naturales del río Mijares, y sirve como punto inicial para la laminación de avenidas y almacenamiento estratégico para los usos del sistema (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b; Universidad Politécnica de Valencia, 2006).
- **Sichar:** Con una capacidad de 52 hm³, se emplaza al final de la cuenca media. Su cerrada se encuentra en formaciones calizas, lo que implica pérdidas por filtración. Cumple una función de regulación intermedia, amortiguando picos de caudal y garantizando la continuidad del suministro hacia el tramo bajo del sistema (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).
- **M^a Cristina:** Este embalse, con capacidad de 27 hm³, regula las aguas de la Rambla de la Viuda. Es crucial para el abastecimiento agrícola de la Plana de Castellón y su gestión está coordinada con la del sistema de explotación superficial y subterránea de la zona costera.

5.4.2 Canales y Conducciones

- **Canal de la cota 100:** Este canal toma el agua mediante un azud en el tramo bajo del río Mijares, cerca de la Rambla de la Viuda, para distribuirla por gravedad hacia la Plana de Castellón y Almazora. Está compuesto por un tramo inicial

de galería subterránea de aproximadamente 1.250 m y un tramo final de canal abierto de unos 300 m que conduce el agua a la “Casa de les Reixes”, punto de confluencia para las comunidades de regantes. El sistema abastece alrededor de 5.910 ha de regadío de alto valor agroalimentario (cítricos), complementado en parte por extracciones subterráneas. En caso de avenidas, la gestión de los caudales es actualmente manual, con riesgo de desbordamientos en balsas de regulación uno de los objetivos del proyecto es mejorar la automatización y reducir estas pérdidas (Sindicato Central de Aguas del Río Mijares, 2023b).

- **Canal de la cota 220:** Puesto en servicio en 1991, deriva sus aguas aguas arriba del embalse de Sichar y está diseñado para atender zonas de regadío en cotas más elevadas, en particular municipios como Onda, Bechí y Villarreal. Su funcionamiento por gravedad permite atender áreas que no serían abastecidas por el canal cota 100, contribuyendo a una distribución más eficiente y equilibrada del recurso. Según datos del Sindicato Central de Aguas del Río Mijares, atiende aproximadamente 4.065 ha en la provincia de Castellón y está operado por la Comunidad de Regantes del Canal cota 220 —además de integrarse de forma conjunta en la planificación del sistema de explotación (Sindicato Central de Aguas del Río Mijares, 2023a).

5.5 Condiciones hidroclimáticas y uso del suelo

El régimen climático es mixto, con transición entre un clima mediterráneo litoral en las zonas costeras y uno más continental en el interior montañoso. La precipitación media anual ronda los 505 mm y la temperatura media se sitúa en 14,4 °C (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a).

En cuanto al uso del suelo, predominan los cultivos de regadío, especialmente cítricos, en la cuenca baja. En total, se registran unas 124.310 ha de superficie cultivada, de las cuales el 35 % corresponde a regadíos. La distribución espacial revela una mayor concentración de regadíos aguas abajo, donde se ubican los sistemas de derivación y almacenamiento más desarrollados.

5.6 Balances y gestión operativa

Según el Anejo 6 del Plan Hidrológico, el sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón se caracteriza por un equilibrio dinámico entre recursos y demandas, condicionado por la variabilidad climática y la estacionalidad agrícola. Los balances

hídricos anuales revelan una presión significativa sobre el sistema, especialmente en años secos, donde el aporte superficial debe complementarse con extracciones subterráneas intensivas. En este sentido, los embalses no solo cumplen una función de almacenamiento, sino también de regulación estratégica para garantizar la continuidad del suministro a los usos prioritarios definidos por el Plan (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

5.7 Evaluación del recurso hídrico en el Plan Hidrológico de Cuenca

En el marco del Plan Hidrológico de la DHJ 2022–2027, la evaluación del recurso hídrico natural en la cuenca del río Mijares se realizó siguiendo una metodología mixta que combina datos observados y modelados. Esta evaluación tiene como objetivo caracterizar las aportaciones hídricas en régimen natural, tanto superficiales como subterráneas, a fin de establecer una base sólida para la planificación y gestión del sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón.

Para ello, se utilizaron *series meteorológicas históricas* de precipitación y temperatura que proceden de la Agencia Española de Meteorología, AEMET, y del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la CHJ, las cuales permitieron estimar parámetros fundamentales como la evapotranspiración potencial aplicando el método de Hargreaves y Samani (Hargreaves & Samani, 1985). Estos datos alimentaron el modelo hidrológico *PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua)* (Pérez Martín, 2005), utilizado por la CHJ para la simulación de aportaciones naturales en subcuencas representativas. PATRICAL se basa en una estructura semidistribuida que incorpora procesos atmosféricos y de escorrentía superficial y subterránea, lo cual lo hace adecuado para representar las condiciones fisiográficas heterogéneas de la cuenca (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a).

No obstante, dado que muchas series de caudal están afectadas por actuaciones antrópicas (almacenamientos, derivaciones, bombeos o vertidos), el Plan Hidrológico recurrió también al proceso de *restitución a régimen natural* en puntos significativos del sistema. Este procedimiento parte de las series aforadas y aplica un balance de masas que considera entradas, salidas, evaporaciones y recargas, con el fin de estimar lo que habría sido el caudal en ausencia de regulación o uso antrópico (Universidad Politécnica de Valencia, 2006).

En el sistema Mijares–Plana de Castellón, se obtuvieron series de aportaciones naturales a los embalses más representativos:

- **Embalse de Arenós:** Se dispone de datos desde 1982 mediante balance de embalse y desde 1990 a través de la estación E-134. Para el periodo 1940–1982, se adoptaron las series del estudio OPH (1998), corregidas a partir de datos anteriores del DGOH (1989) aplicando un coeficiente reductor.
- **Tramo Arenós–Sichar:** La aportación intermedia entre ambos embalses se restituyó considerando las salidas del embalse de Arenós, las filtraciones en Sichar, el volumen turbinado en la central de Colmenar y las derivaciones al canal de la cota 220. Las series abarcan desde 1940 hasta 2002, combinando resultados del modelo OPH con formulaciones específicas desde 1986.
- **Embalse de M^a Cristina:** Cuenta con una serie histórica desde octubre de 1959, obtenida mediante balance en el embalse, aunque sus aportaciones no son determinantes en la gestión global del sistema.

En los casos en los que no se dispone de registros suficientes para realizar restituciones completas, las series han sido completadas con salidas del modelo PATRICAL. Esto ha permitido disponer de información continua y coherente para el periodo 1940/41–2002/03, base fundamental para el análisis de balances y el diseño de estrategias de gestión integrada del recurso (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a).

En la tabla siguiente se muestra, tanto para el periodo completo 1940/41–2017/18 como para la serie reciente 1980/81–2017/18, el valor medio, máximo y mínimo de la aportación acumulada a la red fluvial en régimen natural (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b).

Tabla 3: Aportación acumulada a la red fluvial ($\text{hm}^3/\text{año}$) en régimen natural según modelo PATRICAL en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.
Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)

Periodo	Mínimo (hm^3)	Media (hm^3)	Máximo (hm^3)
1940/41–2017/18	155,2	339,4	1.029,1
1980/81–2017/18	155,2	328,0	1029,1

6 Datos Disponibles

Para la implementación del modelo hidrológico HBV, se recopilaron datos diarios de precipitación y de temperatura máxima y mínima en cada una de las subcuencas asociadas con los puntos de evaluación del recurso hídrico. Estos datos permitieron estimar la evapotranspiración potencial (ETP) mediante métodos estándar.

Se consolidaron series temporales diarias de precipitación y ETP, así como registros mensuales de las aportaciones en los embalses, derivadas de los balances hídricos oficiales.

A continuación, se relacionan los periodos para los que se dispone de información completa:

Tabla 4: Series históricas disponibles (P, ETP, Aportaciones).

Variable	Inicio	Fin	Frecuencia
Precipitación	01/01/1951	31/12/2020	Diaria
ETP	01/01/1951	31/12/2020	Diaria
Aportaciones Arenós	Enero/1978	Junio/2024	Mensual
Aportaciones Sichar	Octubre/1986	Septiembre/2023	Mensual
Aportaciones M ^a Cristina	Octubre/1959	Diciembre/2016	Mensual

6.1 Precipitación

La fuente principal de datos de precipitación para este estudio ha sido el sistema **ROCIO** de la AEMET el cual proporciona series diarias de precipitación acumulada en rejilla de alta resolución aproximadamente 5 km cubriendo toda la Península Ibérica y las Islas Baleares, generadas mediante interpolación de datos observados en estaciones automáticas y manuales. (Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2025).

Se han extraído series de precipitación específicas para cada una de las subcuencas del sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón. Estas subcuencas incluyen a los tres puntos principales de control hidrológico (embalses de Arenós, Sichar y M^a Cristina), lo que permite modelar de forma precisa el balance hídrico en cada unidad mediante el modelo HBV.

Los datos diarios de precipitación fueron descargados para su posterior procesamiento y conversión a formatos compatibles con la herramienta *EvalHid*. Estos datos se

emplearon tanto para estimación de escorrentía inicial (modelación preliminar) como para fases de calibración y validación del modelo HBV.

6.2 Evapotranspiración Potencial

La estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) constituye un componente esencial en la simulación del balance hídrico mediante el modelo HBV, ya que representa la demanda evaporativa de la atmósfera en condiciones de disponibilidad ilimitada de agua. En el presente estudio, la ETP se ha calculado a partir de datos de temperatura máxima y mínima mediante la aplicación del método de **Hargreaves y Samani** (Hargreaves & Samani, 1985).

Este método, ampliamente utilizado en estudios hidrológicos debido a su sencillez y aceptable precisión en contextos de escasa disponibilidad de datos, se basa en la siguiente expresión:

$$ETP = 0,0023 \cdot (T_{med} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a$$

donde:

- ETP es la evapotranspiración potencial diaria (mm/día),
- T_{med} es la temperatura media diaria (°C),
- T_{max} y T_{min} son las temperaturas máxima y mínima diarias (°C),
- R_a es la radiación extraterrestre diaria (MJ/m²/día), calculada en función de la latitud y la fecha del año.

Los valores de temperatura utilizados provienen también del sistema ROCIO de la AEMET, y fueron procesados para cada subcuenca de manera consistente con las series de precipitación previamente descritas. La radiación extraterrestre se estimó a partir de parámetros astronómicos, siguiendo los procedimientos establecidos por la FAO en su Manual FAO 56 (Allen et al., 1998).

Las series de ETP resultantes fueron incorporadas al modelo HBV como una de las variables forzantes fundamentales, influyendo directamente en el cálculo del balance de humedad del suelo y en la generación de escorrentía.

6.3 Aportaciones Arenós

Para la caracterización hidrológica de la subcuenca asociada al embalse de Arenós se emplearon series mensuales históricas de aportaciones en régimen natural, suministradas por la CHJ. Estas series corresponden al punto de control oficial vinculado al embalse, y representan las esorrentías generadas en el tramo alto del río Mijares, sin influencia de usos antrópicos ni regulación.

Los datos abarcan el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1978/79 y 2022/23, y han sido obtenidos a partir de balances validados de embalse y restituciones hidrológicas institucionales. En la Figura 8 se presenta la evolución mensual de estas aportaciones, que constituyen la base para la calibración y validación del modelo HBV aplicado en esta subcuenca.

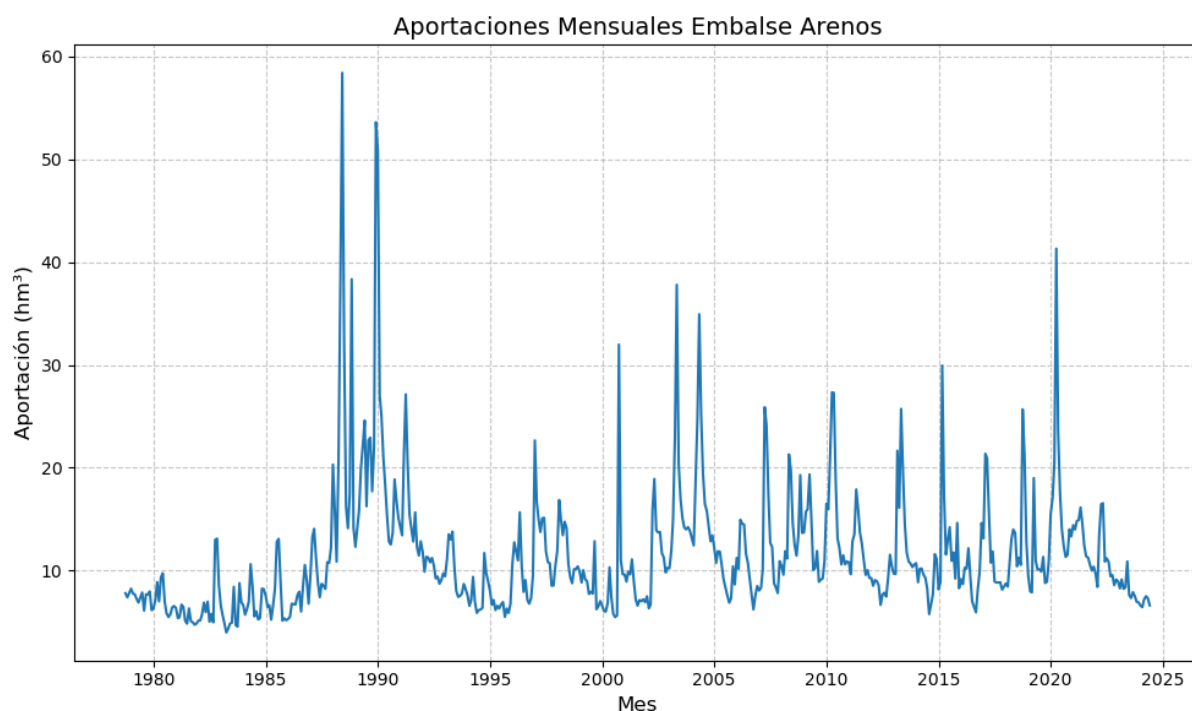


Figura 8: Serie histórica mensual de aportaciones al embalse de Arenós.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta serie, se calculó el año medio hidrológico, representado en la Figura 9, lo cual permite identificar el comportamiento estacional de las aportaciones. Se observa una clara concentración de los valores máximos en primavera (abril y mayo) y mínimos durante el verano (julio a septiembre). Este patrón es consistente con el régimen climático de la cuenca alta del Mijares, caracterizado por precipitaciones efectivas concentradas en los meses previos al verano y una importante influencia del deshielo en zonas de alta montaña durante la transición invierno–primavera.

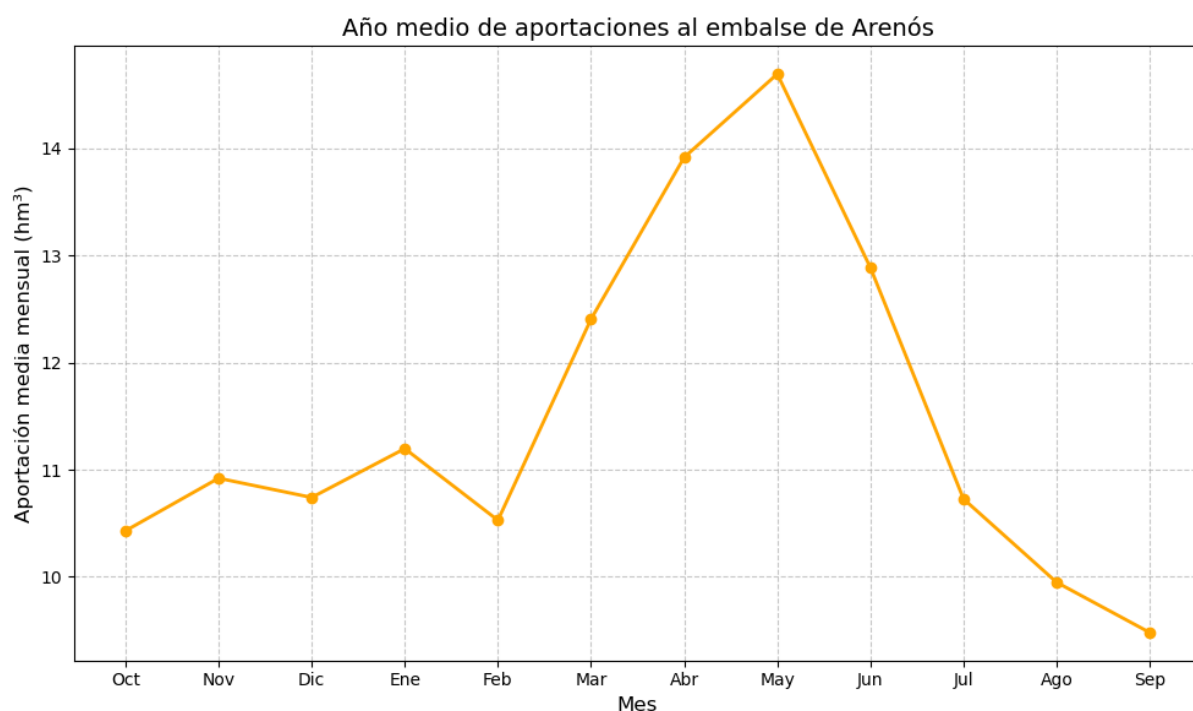


Figura 9: Año medio de aportaciones mensuales al embalse de Arenós en régimen natural.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 10 muestra la evolución de las aportaciones anuales acumuladas para el periodo comprendido entre 1978/79 y 2022/23. Se aprecia una marcada variabilidad interanual, con valores que oscilan entre mínimos inferiores a 60 hm³ y máximos superiores a 250 hm³. La línea roja discontinua indica la media del periodo, situada en torno a los 138,87 hm³/año. Estos datos resultan clave para evaluar el comportamiento hidrológico de la subcuenca y su grado de respuesta ante distintas condiciones climáticas.

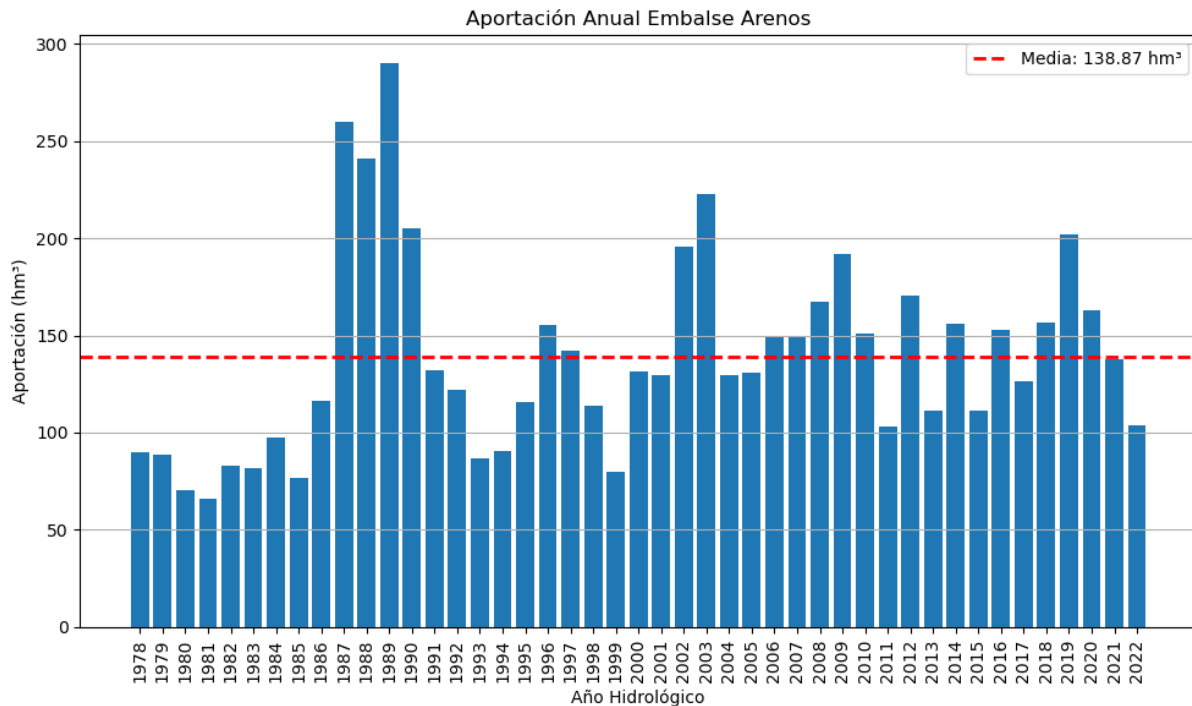


Figura 10: Serie histórica de aportaciones anuales al embalse de Arenós en régimen natural.
Fuente: Elaboración propia.

6.4 Aportaciones Sichar

Las aportaciones al embalse de Sichar en régimen natural fueron suministradas por la CHJ. Estas aportaciones representan el caudal generado en el tramo intermedio comprendido entre el embalse de Arenós y el de Sichar, incluyendo afluencias naturales directas, retornos de riego, filtraciones y otras entradas no reguladas.

Este tramo es de especial relevancia dentro del sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón, ya que en él se concentran infraestructuras clave como la central hidroeléctrica de El Colmenar y las derivaciones hacia los canales de la cota 220 y cota 100, además de diversas zonas agrícolas con alta demanda hídrica. En consecuencia, estimar con precisión las aportaciones en régimen natural es esencial para evaluar la eficiencia operativa del sistema y su grado de regulación.

Para la restitución de estas aportaciones se aplicó una metodología validada por la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH, 1998), basada en un balance hidrológico que considera múltiples componentes hidráulicos:

$$Ap_{AS} = ES + TC + D_{220} - AE_{145} + F_{Sichar}$$

donde:

- **Ap_{AS}**: Aportación intermedia entre Arenós y Sichar (hm³).
- **ES**: Aportación neta al embalse de Sichar, obtenida por balance.
- **TC**: Volumen turbinado en la central de Colmenar.
- **D₂₂₀**: Derivaciones hacia el canal de la cota 220.
- **AE₁₄₅**: Caudal aforado en la estación E-145 (salidas de Arenós).
- **F_{Sichar}**: Filtraciones estimadas en Sichar, calculadas según:

$$F = 0,742 \cdot V^{0,342}$$

siendo V el volumen embalsado en hm³.

Las series adoptadas abarcan desde 1986/87 hasta 2022/23, calculadas mediante la metodología descrita a partir de registros operativos del sistema (balance de embalse, turbinas, aforos y filtraciones)(Universidad Politécnica de Valencia, 2006).

En la Figura 11 se presenta la serie mensual completa de aportaciones al embalse de Sichar. Se aprecia una marcada intermitencia con eventos puntuales de gran magnitud, lo cual refleja la alta variabilidad propia de esta subcuenca.

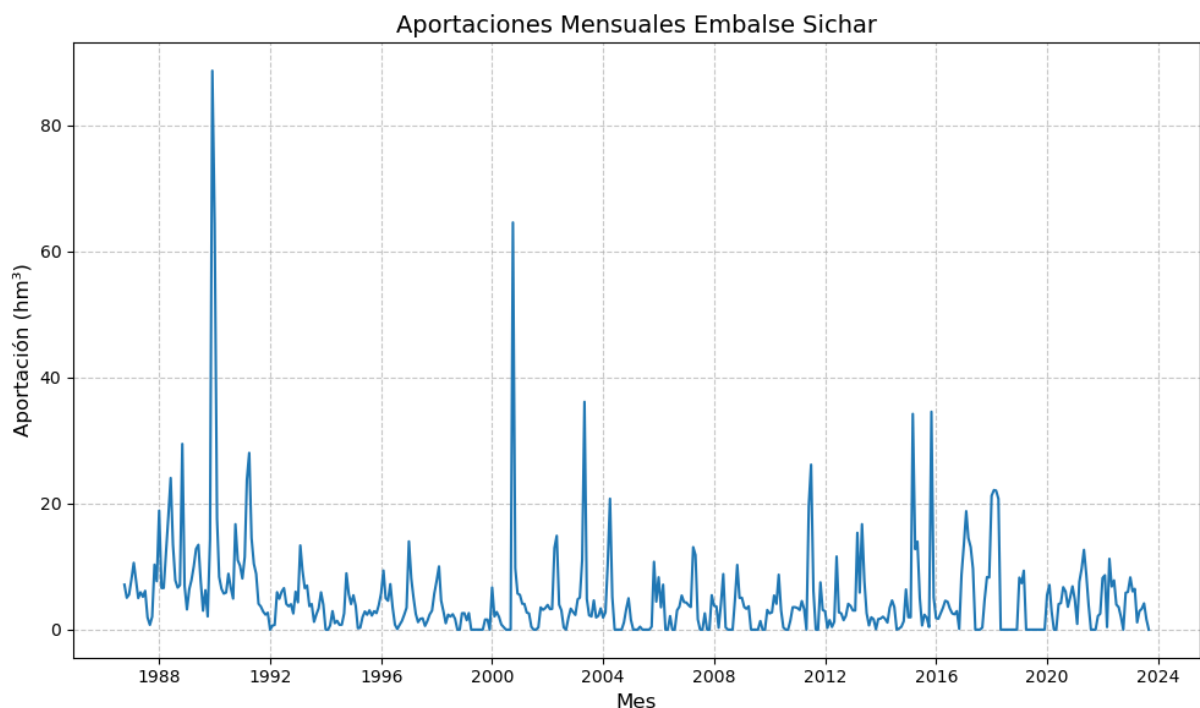


Figura 11: Serie histórica mensual de aportaciones al embalse de Sichar.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 13 sintetiza el hidrograma medio mensual de las aportaciones naturales restituídas al embalse de Sichear para el período 1986/87-2022/23. El patrón resultante responde al régimen mediterráneo con influencia nival propio de la cuenca alta del Mijares: un máximo principal entre diciembre y abril, cuando se combinan frentes atlánticos y deshielo, y un mínimo estival (julio-septiembre) dominado por la evapotranspiración y el agotamiento del almacenamiento subterráneo. Aproximadamente el 70 % del volumen anual se concentra en la ventana invernal-primaveral, lo que justifica la necesidad de captación y regulación intensiva en esos meses para garantizar demandas y caudales ecológicos durante el estiaje (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023a, 2023b).

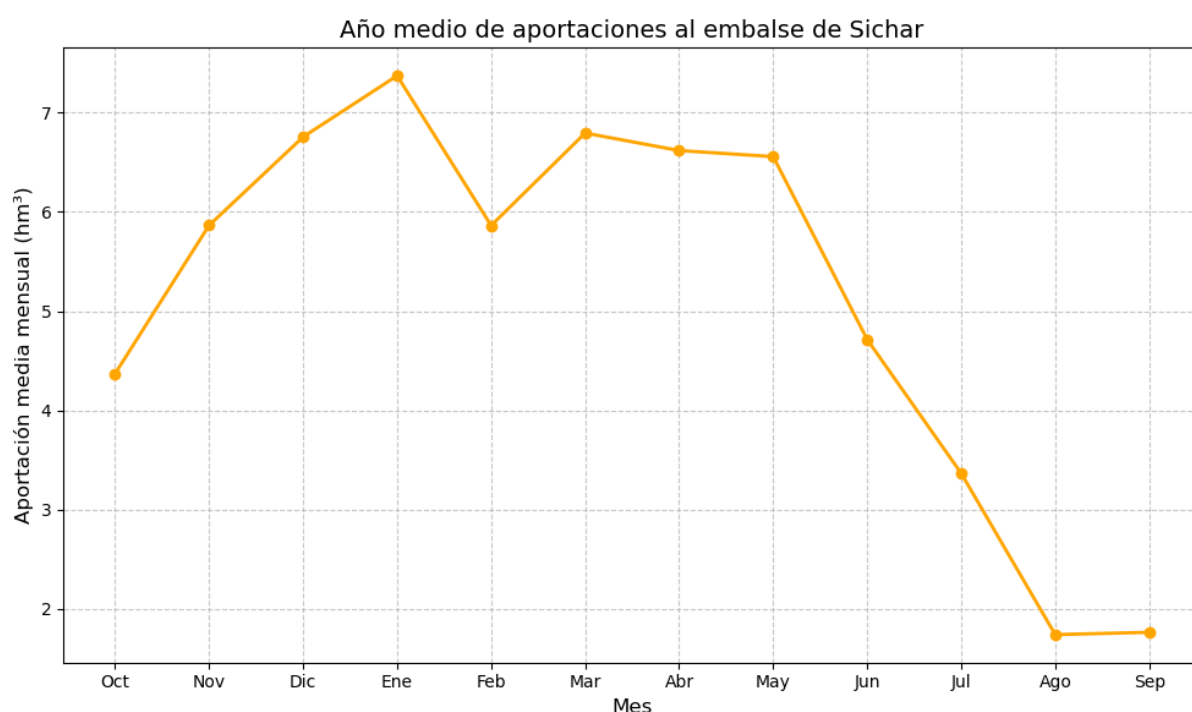


Figura 12: Año medio de aportaciones mensuales al embalse de Sichear.
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la evolución interanual de las aportaciones acumuladas se muestra en la Figura 13. Se observa una notable irregularidad, con máximos superiores a 200 hm³ durante los años húmedos (como 1989 y 1990), y mínimos cercanos a 20 hm³ en años secos. La media del periodo asciende a 61,78 hm³/año. Esta alta variabilidad pone de manifiesto la importancia de una calibración robusta y localizada del modelo HBV para representar adecuadamente la dinámica del sistema.

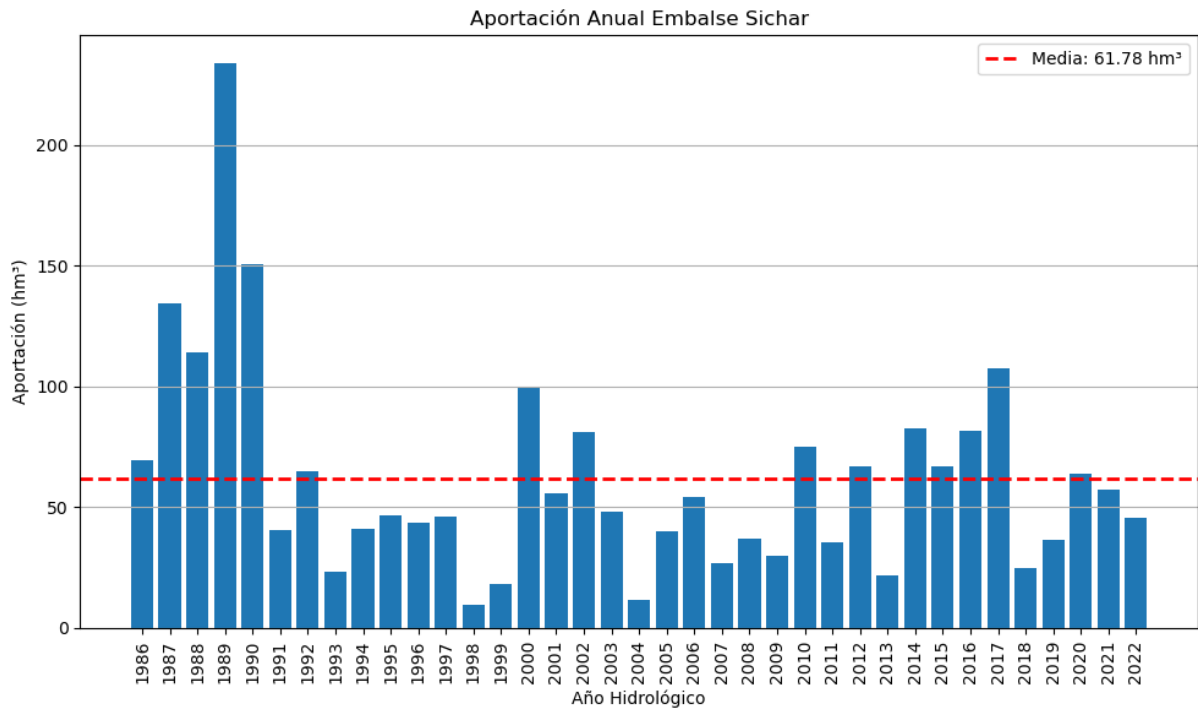


Figura 13: Serie histórica de aportaciones anuales al embalse de Sichar en régimen natural.
Fuente: Elaboración propia.

6.5 Aportaciones M^a Cristina

Las aportaciones al embalse de M^a Cristina en régimen natural fueron suministradas por la CHJ. Estas aportaciones corresponden a la cuenca de la Rambla de la Viuda y sus afluentes, incluyendo el río Lucena y otros barrancos temporales que desembocan en el embalse.

En la Figura 14 se muestra la serie histórica mensual completa. Esta presenta una clara intermitencia, con muy pocas aportaciones a excepción de algunos episodios extremos de corta duración, característicos de sistemas de rambla mediterránea. Las lluvias intensas de otoño y eventos convectivos locales explican los picos observados. Cabe resaltar que las aportaciones a este embalse no representan un porcentaje importante dentro del recurso hídrico total disponible.

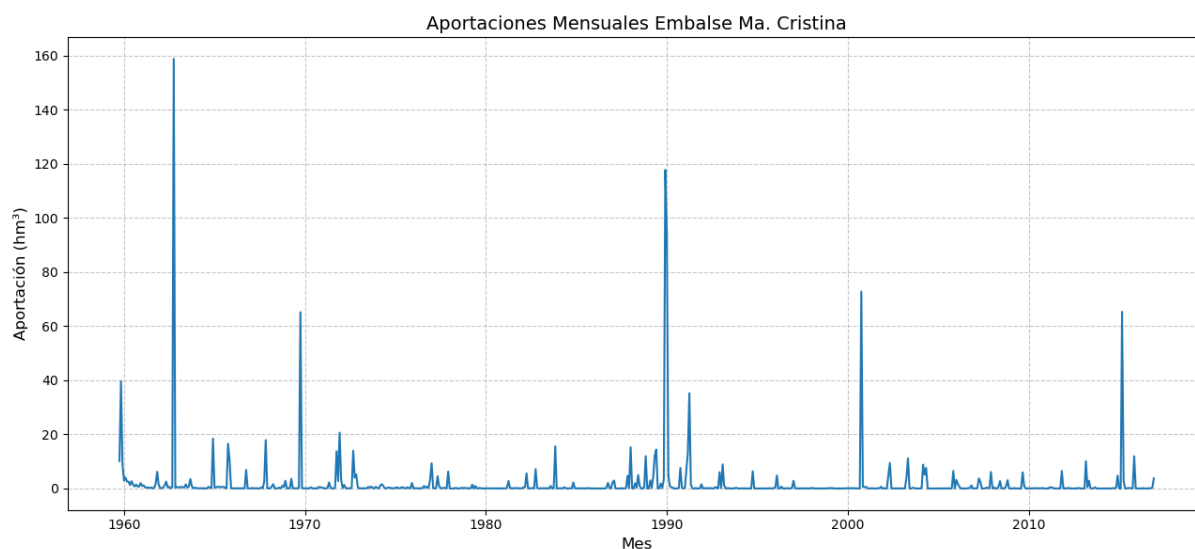


Figura 14: Serie histórica mensual de aportaciones al embalse de Mª Cristina.
Fuente: Elaboración propia.

El año medio hidrológico (Figura 15) revela un patrón particular, donde las mayores aportaciones se concentran en el otoño (especialmente octubre), reflejo de la alta torrencialidad asociada al clima mediterráneo litoral. Los valores mínimos se registran entre julio y agosto, en concordancia con el periodo seco estival. Este comportamiento acentúa el papel del embalse como regulador de recursos altamente irregulares.

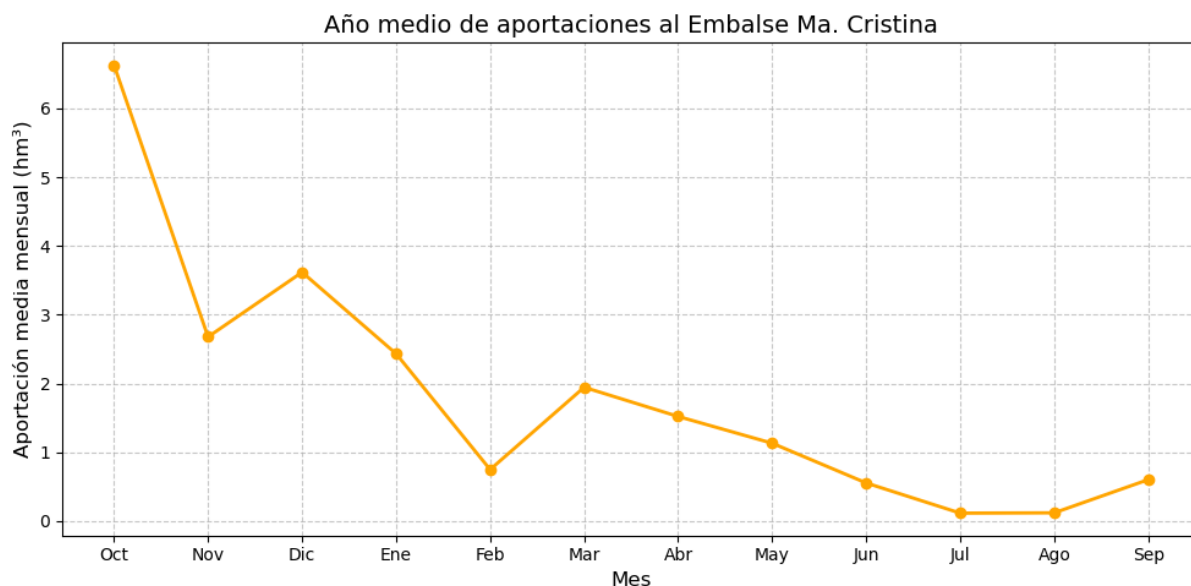


Figura 15: Año medio de aportaciones mensuales al embalse de Mª Cristina.
Fuente: Elaboración propia.

La evolución interanual de las aportaciones acumuladas se presenta en la Figura 16. Durante el periodo 1959/60–2014/15, se observa una media de 22,25 hm³/año,

con valores máximos puntuales que superan los 200 hm³, especialmente en años hidrológicos con lluvias intensas como 1989/90. La fuerte irregularidad interanual es una característica destacada de esta unidad hidrográfica, lo que plantea retos adicionales para la gestión del embalse y la calibración hidrológica del modelo.

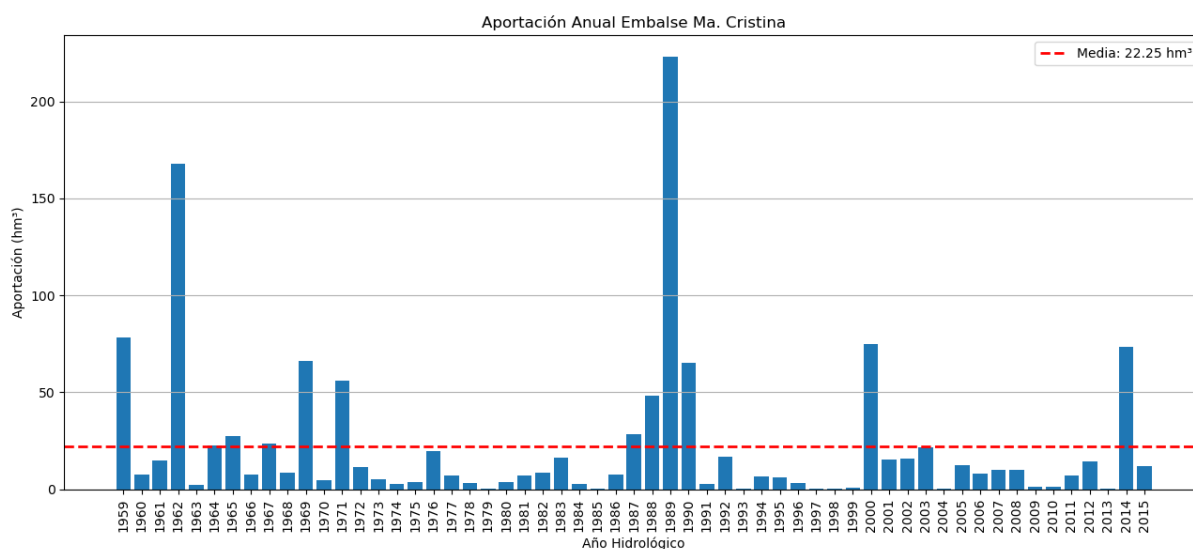


Figura 16: Serie histórica de aportaciones anuales al embalse de M^a Cristina en régimen natural.
Fuente: Elaboración propia.

7 Implementación Modelo HBV

Para la evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Mijares se seleccionaron tres puntos clave vinculados a los principales embalses de regulación del sistema: Arenós, Sichar y M^a Cristina. Estos emplazamientos permiten caracterizar de manera representativa el comportamiento hidrológico en distintos sectores de la cuenca, abarcando la zona alta, media y baja, respectivamente. Para cada uno de ellos se delimitó la cuenca vertiente asociada mediante análisis de la red hidrográfica, divisorias topográficas y masas de agua recogidas en el Plan Hidrológico de cuenca vigente.

Con el objetivo de analizar la sensibilidad del modelo HBV frente a distintos esquemas de representación espacial, se implementaron dos configuraciones alternativas para cada unidad de evaluación:

- **Modelo Agregado:** considera cada subcuenca como una única unidad hidrológica homogénea. Las variables de entrada —precipitación y evapotranspiración potencial (ETP)— se introducen como series diarias medias ponderadas según la superficie de cada masa de agua superficial contenida en la unidad.
- **Modelo Desagregado:** descompone explícitamente cada subcuenca en sus masas de agua superficiales, tratadas como subunidades hidrológicas independientes. A cada subunidad se le asigna su propia serie temporal de precipitación y ETP, lo que permite una representación semidistribuida del balance hídrico.

Esta doble configuración permite comparar el grado de representatividad hidrológica alcanzado en cada caso y evaluar en qué medida el detalle espacial influye en la capacidad predictiva del modelo para las distintas zonas de la cuenca.

Los periodos hidrológicos utilizados para la implementación y calibración del modelo en cada una de las unidades se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Periodos de datos hidrológicos utilizados en la modelación HBV para cada embalse.

Unidad de evaluación	Periodo de años hidrológicos
Arenós (serie larga)	1978/79 – 2019/20
Arenós (serie corta)	2000/01 – 2019/20
Sichar	1986/87 – 2019/20
M ^a Cristina	1959/60 – 2015/16

7.1 Arenós

La cuenca vertiente del embalse de Arenós abarca una superficie total de 1.431,73 km², localizada en el sector alto del río Mijares. Esta unidad incluye las contribuciones hídricas generadas por una amplia red de tributarios y barrancos, con un régimen pluvio-nival característico de la alta montaña ibérica. La representación hidrológica de esta cuenca se ha desarrollado considerando un conjunto de masas de agua superficial definidas oficialmente por el PHJ, que permiten descomponer la unidad en zonas fisiográficamente homogéneas.

A continuación se presenta la relación de masas de agua consideradas para la implementación del modelo HBV en esta subcuenca:

Tabla 6: Masas de agua en la cuenca vertiente del embalse de Arenós.
Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)

CodMasa	Denominación de la Masa	Categoría	Superficie (km ²)
10-01	Río Mijares: cabecera - barranco del Charco	Río	109.08
10-02A	Río Mijares: barranco del Charco - río Valbona	Río	222.10
10-03-01-01	Río Alcalá: cabecera - río Valbona	Río	107.69
10-03-02-01A	Río Albentosa: cabecera - Manzanera	Río	205.31
10-03-02-02	Río Albentosa: Manzanera - río Mijares	Río	117.41
10-03-03-01	Río Mora: embalse de Mora de Rubielos - río Mijares	Río	116.12
10-03-03-02	Embalse de Mora de Rubielos	Lago	5.86
10-03-03-03	Barranco de Fuendenarices	Río	14.80
10-03A	Río Mijares: río Valbona - manantial de Babor	Río	169.30
10-03B	Río Valbona	Río	61.52
10-03C	Río Mijares: manantial de Babor - río Mora	Río	3.07
10-04-01-01	Río del Morrón	Río	84.32
10-04A	Río Mijares: río Mora - embalse de Arenós	Río	115.47
10-04B	Río Palomarejas: embalse de Balagueras - río Mijares	Río	70.85
10-05A	Embalse de Arenós	Lago	28.83

A continuación se describen las dos configuraciones desarrolladas para esta subcuenca.

7.1.1 Modelo Agregado

Para la implementación del modelo HBV en su configuración agregada, se consideró la cuenca vertiente del embalse de Arenós como una única unidad hidrológica homogénea. La precipitación y la evapotranspiración potencial fueron integradas como series temporales únicas, representando los promedios diarios ponderados por superficie de las masas de agua consideradas.

La Figura 17 muestra la evolución de la precipitación diaria promedio entre los años 1978 y 2020, obtenida a partir del sistema ROCIO de la AEMET. La serie presenta una media diaria de 1,45 mm, con alta variabilidad interanual y episodios intensos de corta duración típicos del régimen mediterráneo continental.

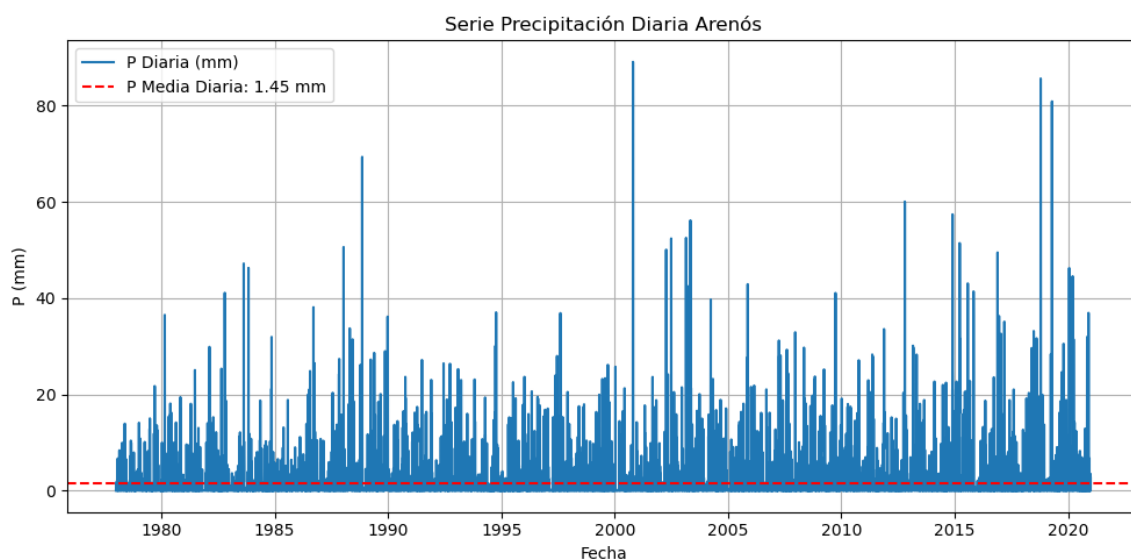


Figura 17: Serie de precipitación diaria media ponderada – Modelo agregado Arenós.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.

En cuanto a la evapotranspiración potencial, la Figura 18 representa la serie diaria de ETP, con una media de 2,76 mm/día y una marcada estacionalidad con máximos en los meses de verano.

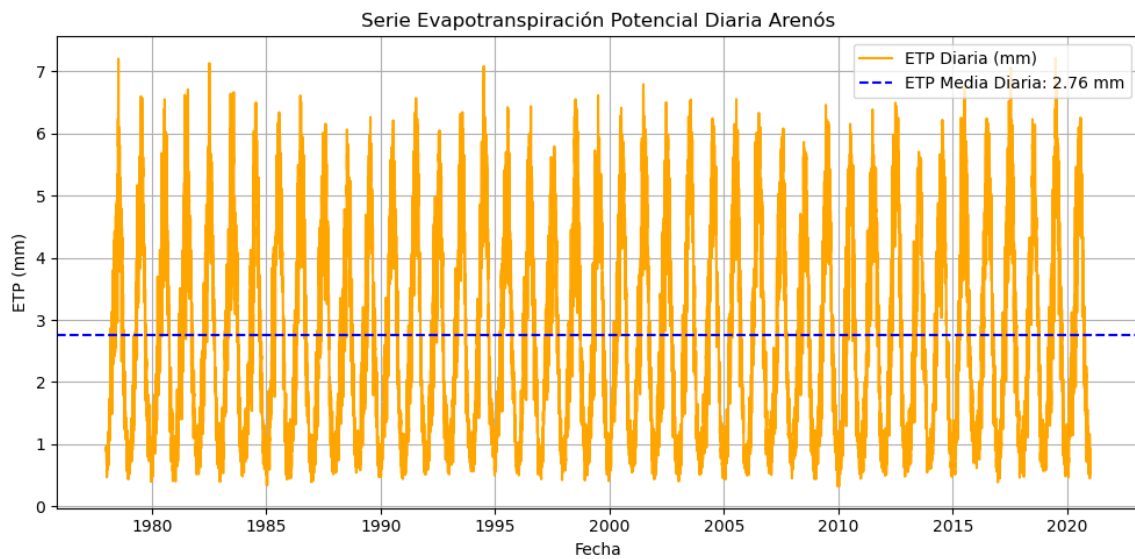


Figura 18: Serie de evapotranspiración potencial diaria – Modelo agregado Arenós.
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.

Adicionalmente, en la Figura 19 se presenta la delimitación geográfica de la subcuenca de Arenós, en la que se observa la localización del embalse y su red de drenaje asociada, evidenciando la complejidad fisiográfica del sector alto de la cuenca del río Mijares.

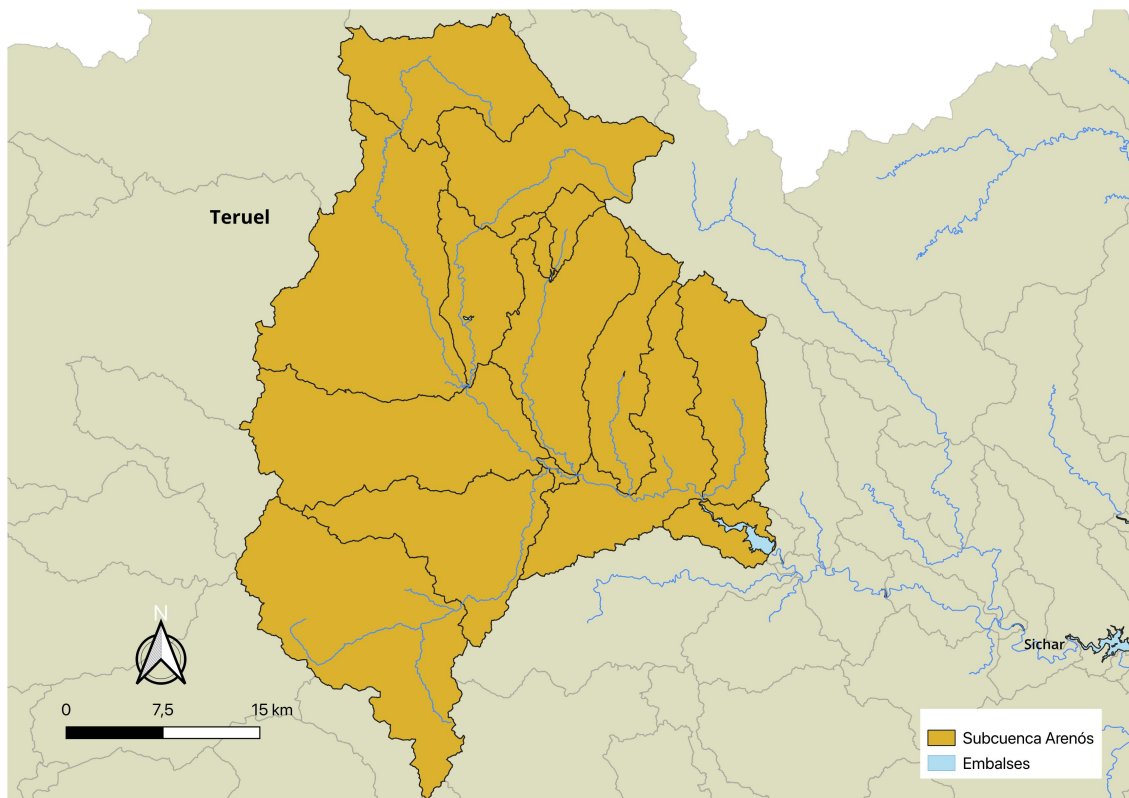


Figura 19: Delimitación de la cuenca vertiente del embalse de Arenós.
 Fuente: Elaboración propia.

7.1.2 Modelo Desagregado

Para la implementación del modelo HBV en su configuración desagregada, se consideró la cuenca vertiente del embalse de Arenós como una unidad hidrológica compuesta por las masas de agua indicadas en la Tabla 6. Cada una de estas masas de agua fue modelada de forma independiente, considerando su propia serie temporal de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP), ponderadas espacialmente de acuerdo con su superficie.

Esta aproximación permite una mayor precisión en la representación de la heterogeneidad espacial de las entradas meteorológicas y de los procesos de generación de escorrentía en el ámbito de estudio. Los resultados de cada subcuenca fueron integrados mediante la definición de un punto de desagüe superficial común, asociado al embalse de Arenós, tal y como lo permite la herramienta EvalHid en su enfoque semidistribuido (Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), 2022).

La Figura 20 muestra la delimitación espacial de las masas de agua que componen esta configuración desagregada.

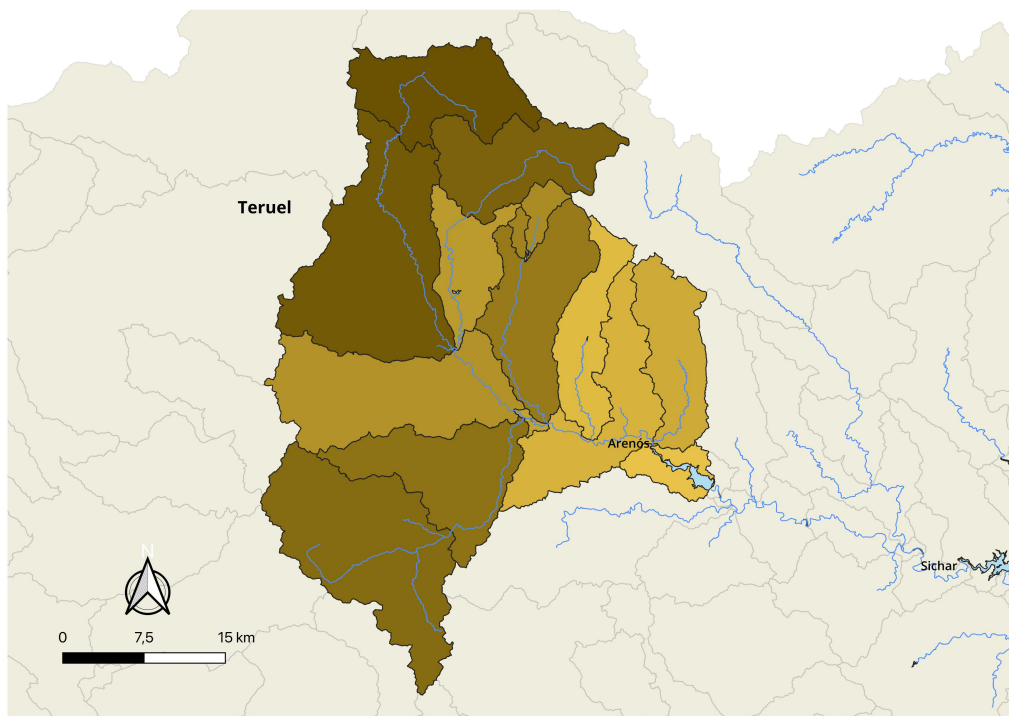


Figura 20: Delimitación espacial de la cuenca desagregada del embalse de Arenós.

7.2 Sichar

La cuenca vertiente del embalse de Sichar presenta una extensión total de 1.059,73 km², abarcando una región de transición entre el tramo medio y bajo del sistema Mijares–Plana de Castellón. Esta subcuenca recibe los aportes del río Mijares tras su paso por el embalse de Arenós, así como de numerosos tributarios de carácter montañoso y mediterráneo. El modelado hidrológico de esta unidad se apoya en un conjunto de masas de agua delimitadas oficialmente, que permiten estructurar el análisis espacial del comportamiento hidrológico.

Tabla 7: Masas de agua en la cuenca vertiente del embalse de Sichar.
Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)

CodMasa	Denominación de la Masa	Categoría	Superficie (km ²)
10-06	Río Mijares: embalse de Cirat - embalse de Vallat	Río	47.57
10-06-01-01	Barranco de la Maymona	Río	172.71
10-06-02-01	Río Montán	Río	67.28
10-06-03-01	Río Cortes	Río	81.72
10-06A	Río Mijares: embalse de Arenós - embalse de Cirat	Río	6.61
10-07	Río Mijares: embalse de Vallat - embalse de Ribesalbes	Río	36.15
10-07-01-01	Río Pequeño	Río	79.89
10-07-02-01A	Río Villahermosa: cabecera - barranco de la Canaleta	Río	199.50
10-07-02-02	Río Villahermosa: barranco de la Canaleta - barranco de Juaneta	Río	93.58
10-07-02-03	Río Villahermosa: barranco de Juaneta - Ludiente	Río	45.98
10-07-02-04	Río Villahermosa: Mas del Plano de Herrera - río Mijares	Río	109.26
10-08	Río Mijares: embalse de Ribesalbes - embalse de Sichar	Río	34.31
10-09	Embalse de Sichar	Lago	85.17

7.2.1 Modelo Agregado

En la configuración agregada del modelo HBV para la cuenca del embalse de Sichar, se integró toda la unidad como una única entidad hidrológica. Las entradas de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) fueron calculadas como medias ponderadas por superficie de las masas de agua incluidas, generando una representación simplificada del comportamiento hidrometeorológico del sistema.

La Figura 21 presenta la serie diaria de precipitación media correspondiente al periodo 1986–2020. Esta muestra una media diaria de 1,64 mm, con eventos de lluvia intensa frecuentes durante la primavera y el otoño, en concordancia con la estacionalidad mediterránea típica de la zona.

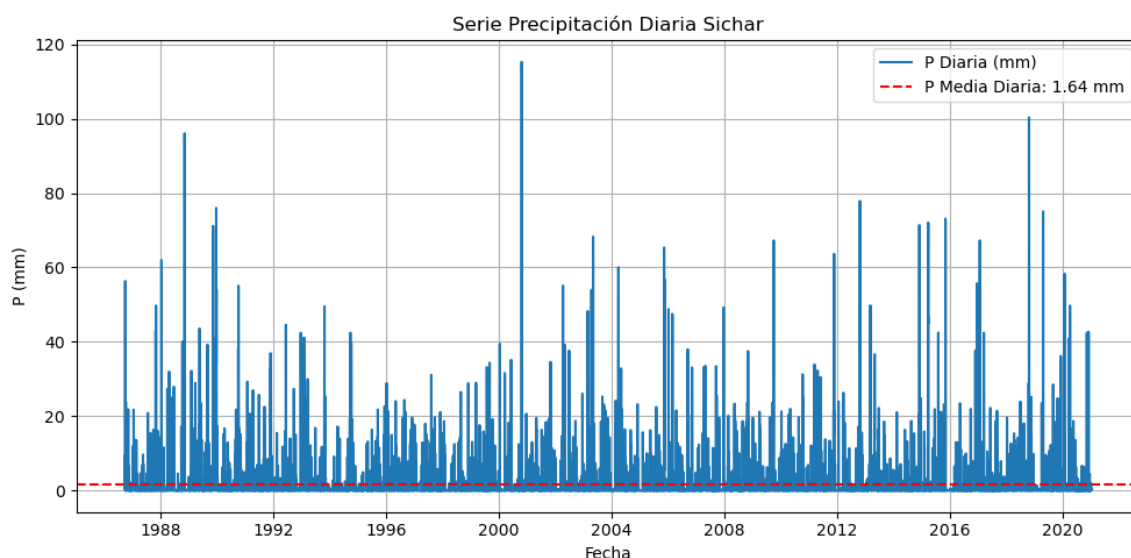


Figura 21: Serie de precipitación diaria media ponderada – Modelo agregado Sichar.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.

La evapotranspiración potencial, presenta una media diaria de 2,84 mm. La Figura 22 refleja su evolución temporal, con máximos acentuados en los meses estivales y mínimos durante el invierno.

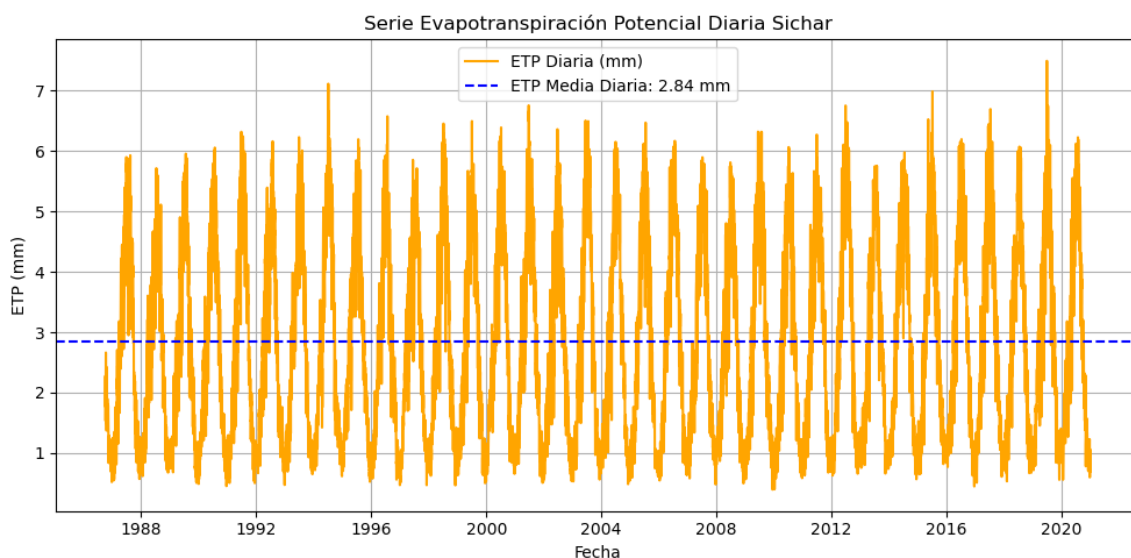


Figura 22: Serie de evapotranspiración potencial diaria – Modelo agregado Sichar.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.

Finalmente, en la Figura 23 se muestra la delimitación espacial de la cuenca vertiente del embalse de Sichar, destacando la red hidrográfica y la ubicación estratégica del embalse dentro del sistema Mijares.

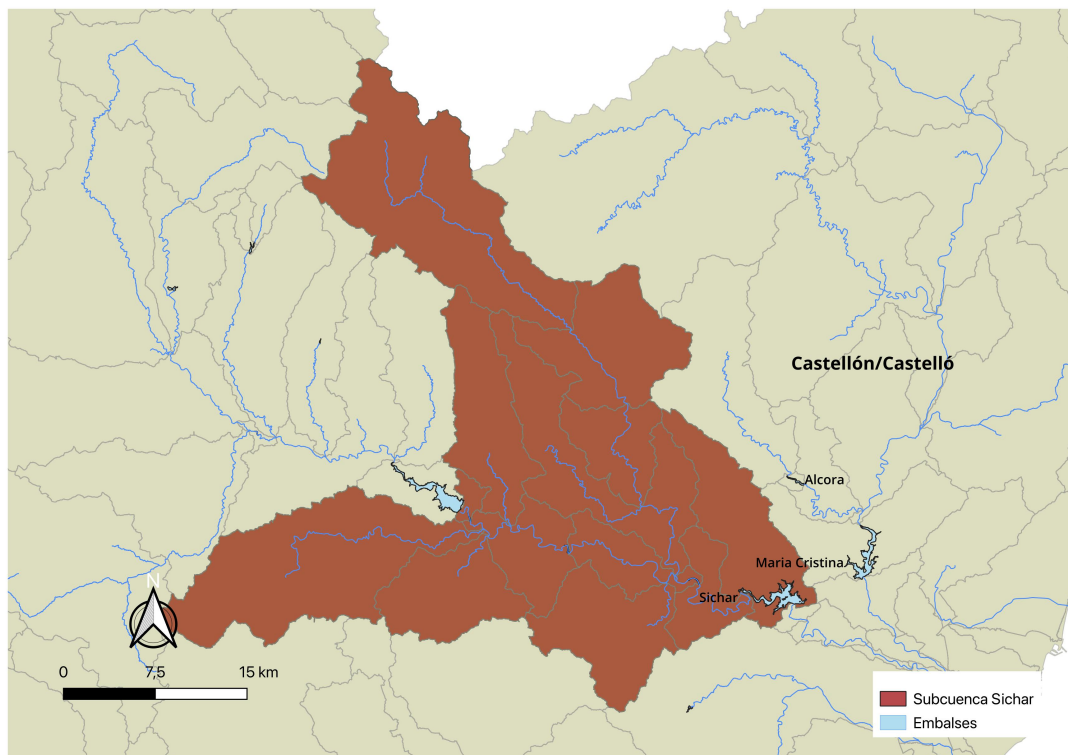


Figura 23: Delimitación de la cuenca vertiente del embalse de Sichear.
 Fuente: Elaboración propia.

7.2.2 Modelo Desagregado

En el caso del embalse de Sichear, la implementación desagregada del modelo HBV consideró las distintas masas de agua dentro de su cuenca vertiente (ver Tabla 7). Para cada masa se introdujeron series independientes de precipitación y ETP, generadas a partir de datos meteorológicos representativos y ponderadas espacialmente.

Este enfoque permite capturar las variaciones en la respuesta hidrológica asociadas a las características morfoclimáticas propias de cada unidad, mejorando la representación del proceso de generación de escorrentía. Además, se definió un punto de acumulación superficial único en el embalse, integrando los caudales generados por cada una de las subcuencas modeladas.

La Figura 24 ilustra la estructura espacial adoptada para la cuenca del embalse de Sichear bajo la configuración desagregada del modelo.

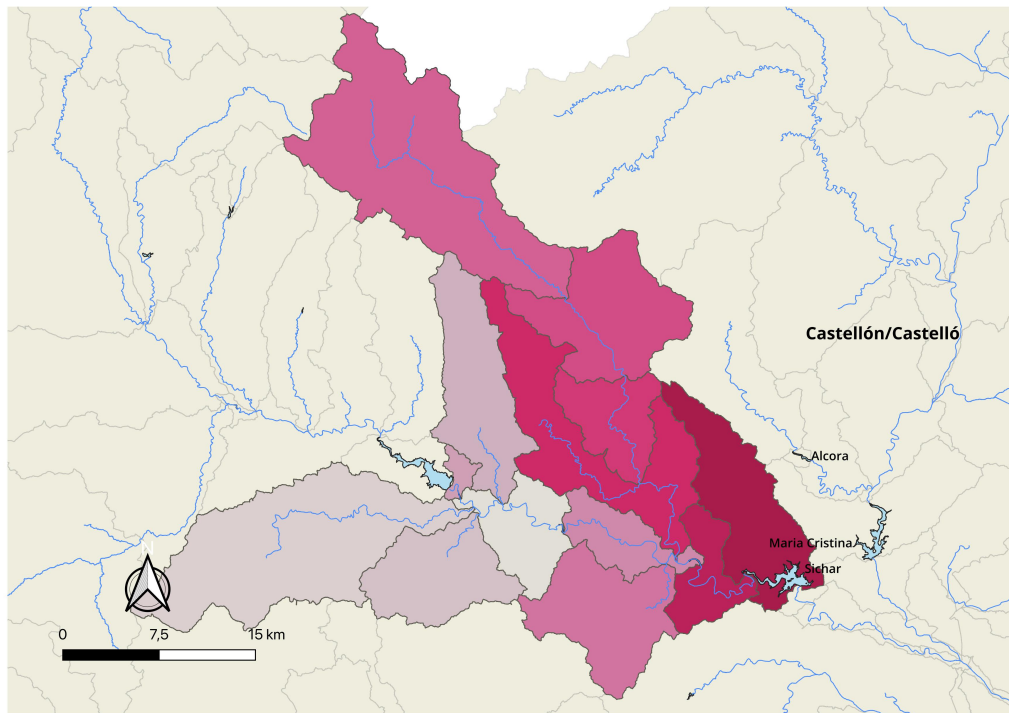


Figura 24: Delimitación espacial de la cuenca desagregada del embalse de Sichear.

7.3 M^a Cristina

La cuenca vertiente del embalse de M^a Cristina comprende una superficie de 1.479,78 km², ubicada en el sector suroriental del sistema Mijares–Plana de Castellón. Esta unidad capta los escurrimientos de la rambla de la Viuda, el río Lucena y diversos barrancos mediterráneos, caracterizados por un régimen torrencial y alta variabilidad interanual. La caracterización hidrológica de esta cuenca se fundamenta en la definición oficial de masas de agua superficial adoptada en el marco del PHJ vigente.

Tabla 8: Masas de agua en la cuenca vertiente del embalse de M^a Cristina.
Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)

CodMasa	Denominación de la Masa	Categoría	Superficie (km ²)
10-12-01-01	Rambla de la Viuda: cabecera - rambla de la Belluga	Río	118.66
10-12-01-02	Rambla de la Viuda: rambla de la Belluga - río Monleón	Río	127.57
10-12-01-02-01-01	Río Monleón: cabecera - barranco del Forcall	Río	358.76
10-12-01-02-01-01-01-01	Río Seco (Monleón)	Río	107.31
10-12-01-02-01-02	Río Monleón: barranco del Forcall - rambla de la Viuda	Río	186.91
10-12-01-03	Rambla de la Viuda: río Monleón - barranco de Cabanes	Río	53.78
10-12-01-03-01-01	Barranco de Cabanes	Río	204.49
10-12-01-04	Rambla de la Viuda: barranco de Cabanes - embalse de M ^a Cristina	Río	97.05
10-12-01-04-01-01	Río Lucena: cabecera - embalse de l'Alcora	Río	111.16
10-12-01-04-01-02	Embalse de l'Alcora	Lago	2.31
10-12-01-04-01-03	Río Lucena: embalse de l'Alcora - rambla de la Viuda	Río	35.05
10-12-01-05	Embalse de M ^a Cristina	Lago	76.73

7.3.1 Modelo Agregado

En el modelo agregado para la subcuenca de M^a Cristina, se consideró una única unidad representativa del comportamiento medio hidrológico del conjunto de masas de agua que la integran.

La Figura 25 muestra la evolución de la precipitación diaria media durante el periodo 1959–2020, con una media diaria de 1,72 mm y eventos de gran intensidad concentrados en otoño.

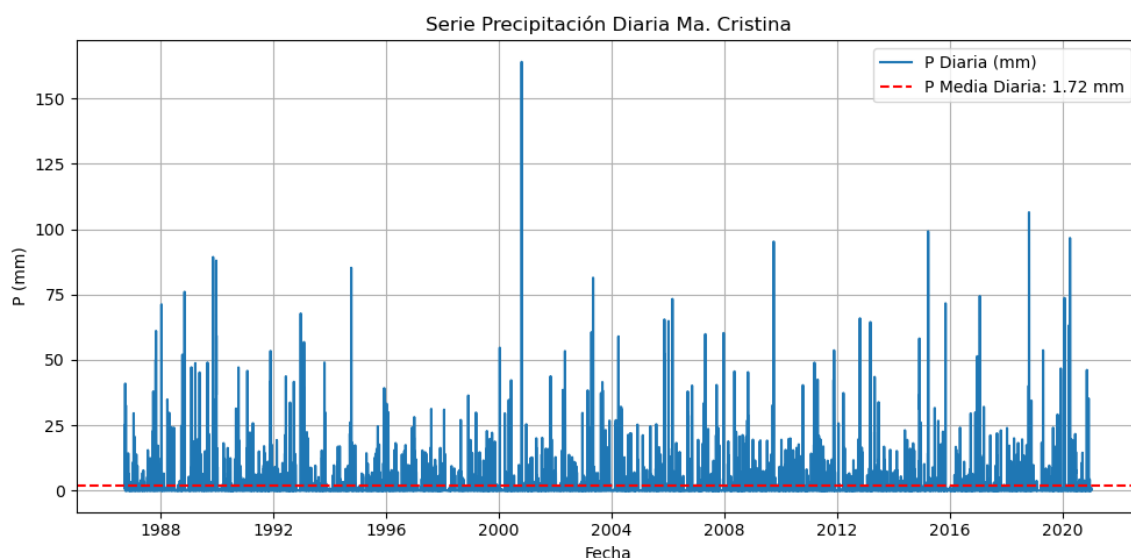


Figura 25: Serie de precipitación diaria media ponderada – Modelo agregado M^a Cristina.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.

La serie de ETP diaria media, calculada según Hargreaves, se presenta en la Figura 26, con una media diaria de 2,83 mm y un claro patrón estacional con máximos estivales.

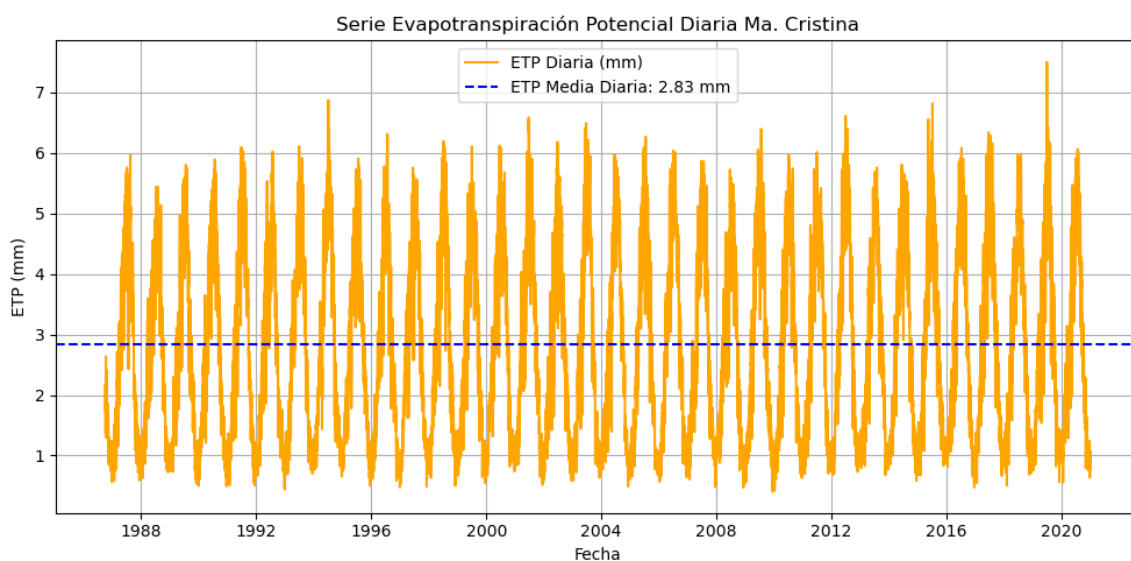


Figura 26: Serie de evapotranspiración potencial diaria – Modelo agregado M^a Cristina.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos ROCIO-AEMET.

En la Figura 27 se presenta la delimitación espacial de la cuenca vertiente del embalse de M^a Cristina.

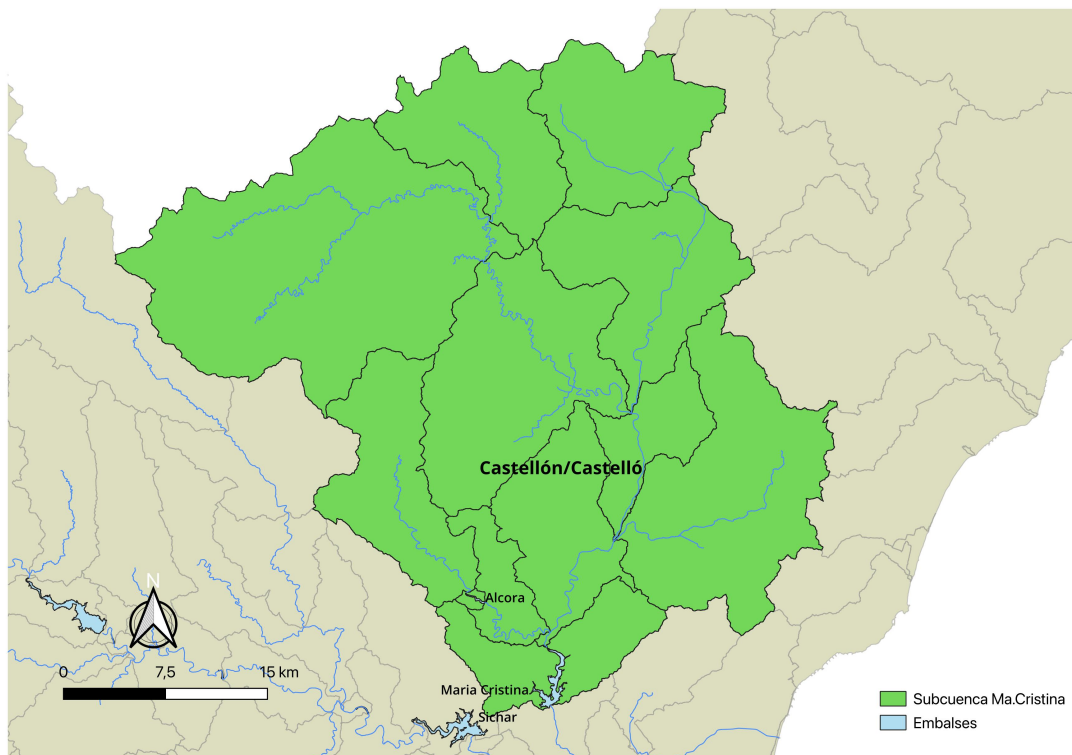


Figura 27: Delimitación de la cuenca vertiente del embalse de M^a Cristina.
Fuente: Elaboración propia.

7.3.2 Modelo Desagregado

La cuenca vertiente del embalse de María Cristina fue discretizada en unidades hidrológicas equivalentes a las masas de agua definidas por la planificación hidrológica vigente, recogidas en la Tabla 8. A cada unidad se le asignaron entradas meteorológicas específicas, lo que permite al modelo reproducir de forma más detallada la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos.

La definición de esta estructura desagregada es coherente con la filosofía de aplicación semidistribuida que ofrece la herramienta EvalHid, permitiendo simular la esorrentía superficial de cada subcuenca por separado y su posterior acumulación en un punto común asociado al embalse de María Cristina.

La Figura 28 presenta la disposición espacial de las subcuencas consideradas en el modelo desagregado.

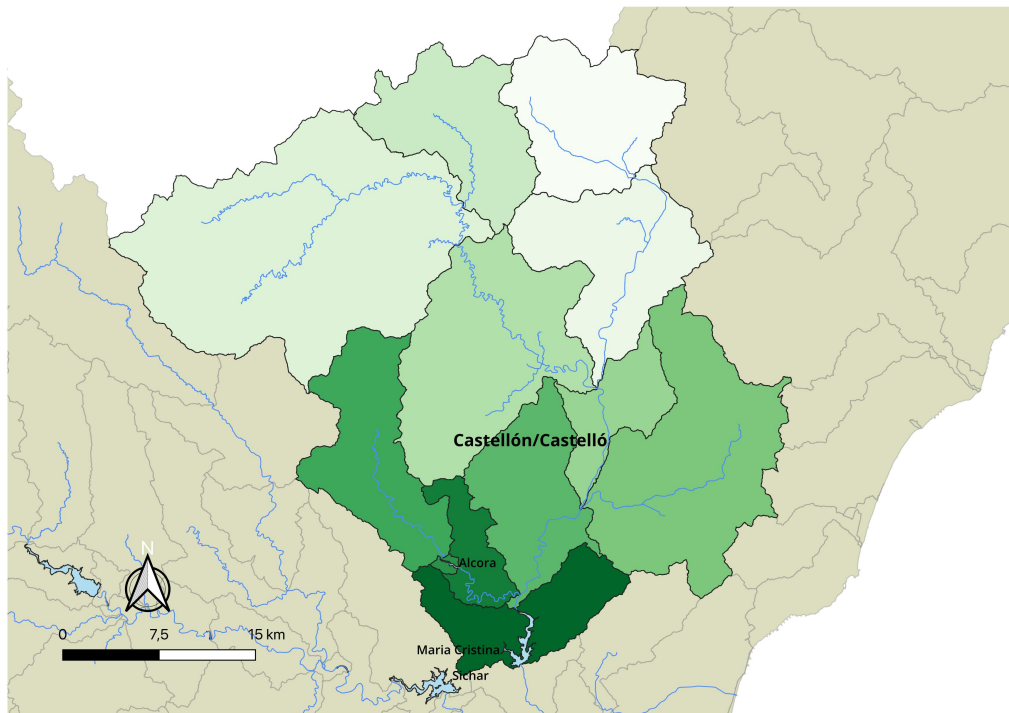


Figura 28: Delimitación espacial de la cuenca desagregada del embalse de María Cristina.

8 Calibración Modelo HBV

El proceso de calibración se realizó de manera independiente para cada uno de los puntos de evaluación entre ellos: Embalse de Arenós, Embalse de Schar y Embalse de M^a Cristina. En el caso del embalse de Arenós, se implementó además una calibración alternativa centrada en un periodo más reciente, con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo frente a distintos marcos temporales de ajuste.

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los puntos de control, incluyendo los valores calibrados de los parámetros del modelo y los coeficientes de eficiencia alcanzados durante el proceso de ajuste.

El proceso de calibración se orientó a encontrar un conjunto de parámetros capaces de reproducir fielmente los patrones hidrológicos observados. Para ello, se utilizaron datos descritos en la sección 6 y 7, de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.

8.1 Embalse de Arenós

La calibración del modelo HBV para el embalse de Arenós se realizó utilizando series mensuales de aportaciones en régimen natural para el periodo comprendido entre 1978/79 y 2019/20. Esta unidad hidrográfica, ubicada en el tramo alto del río Mijares, representa una de las zonas de mayor esorrentía natural del sistema, lo que la convierte en un punto estratégico para la estimación del recurso hídrico disponible.

8.1.1 Modelo Agregado

Calibración serie larga (1978/79 - 2019/20): Para la calibración de la serie larga se dividió la serie en dos subconjuntos: un periodo de calibración (1978/79–2007/08) y un periodo de validación (2008/09–2019/20), como se muestra en la Figura 29. Esta segmentación se realizó con el objetivo de evaluar la capacidad de generalización del modelo fuera del periodo de ajuste, considerando tanto años húmedos como secos.

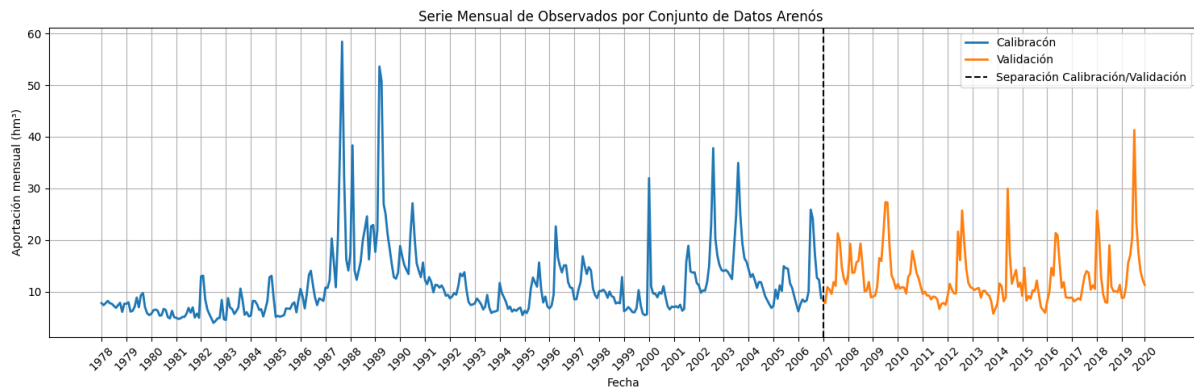


Figura 29: Set de Calibración y Validación Serie Larga Arenós (1978/79 - 2019/20)

La Tabla 9 presenta los valores del índice de eficiencia de Nash, utilizado como criterio objetivo de calibración y evaluación. El modelo presentó un buen ajuste en el periodo de calibración, con un NSE de 0.81 lo que indica una alta capacidad del modelo para reproducir las aportaciones en el rango general y en los valores extremos.

Tabla 9: Índice de Nash para Calibración y Validación Arenós Serie Larga

Conjunto	Periodo	NSE
Calibración	1978/79 - 2007/08	0.81
Validación	2008/09 - 2019/20	0.57

En el conjunto de validación, el valor del NSE desciende a 0.57, lo que refleja una menor capacidad del modelo para reproducir los eventos extremos en este periodo. Sin embargo, es un valor aceptable, lo que sugiere que, a pesar de la disminución en el rendimiento para caudales altos, el modelo conserva una capacidad razonable para simular la dinámica general de aportaciones. Este comportamiento apunta a posibles cambios en las condiciones hidrológicas de la cuenca a partir del año 2000, lo que se discutirá posteriormente en el desarrollo de un modelo alternativo ajustado a ese periodo.

La Tabla 10 resume los parámetros calibrados para la configuración agregada de la cuenca de Arenós. Estos parámetros fueron optimizados mediante el algoritmo Differential Evolution y respetan las restricciones internas del modelo HBV.

Tabla 10: Parámetros calibrados para el embalse de Arenós (1978/79 - 2019/20).

Parámetro	Valor Calibrado
β	1.78
FC	560.85
PWP	448.94
L_{max}	11.62
K_0	0.3933
K_1	0.0372
K_2	0.0032
K_{perc}	0.1641

La Figura 30 muestra la comparación entre las series simuladas y observadas a escala mensual. Se observa una buena representación general de los pulsos de escorrentía, si bien se evidencian algunas discrepancias puntuales en los picos máximos, especialmente en los periodos más recientes, lo cual es consistente con la disminución del NSE en validación.

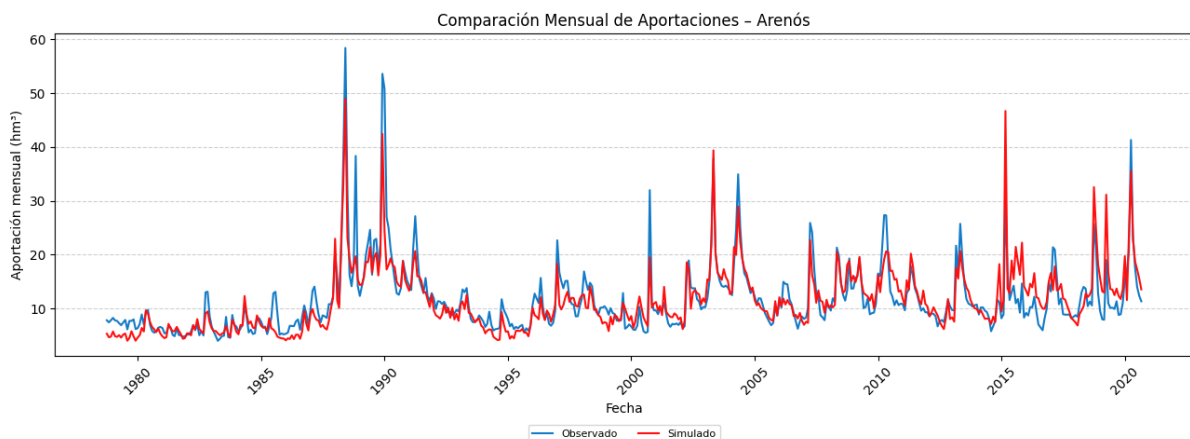


Figura 30: Comparación serie mensual simulados vs observados Arenós (1978/79 - 2019/20).
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la serie anual de aportaciones, representada en la Figura 31, se aprecia un ajuste satisfactorio en términos de tendencia y magnitud. Las medias anuales observadas y simuladas son muy próximas (140.36 hm³ y 138.01 hm³, respectivamente), lo que confirma la consistencia del modelo en la representación global del balance hídrico.

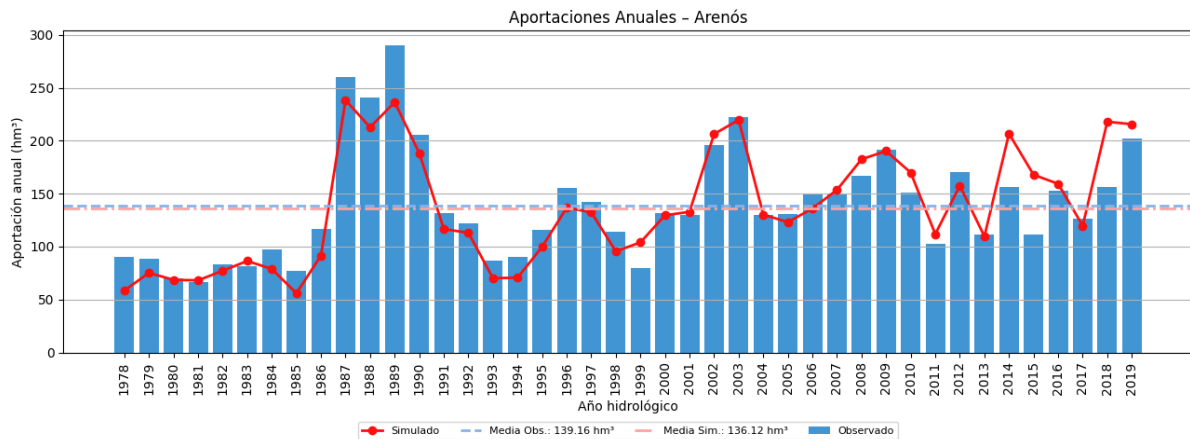


Figura 31: Comparación serie anual simulados vs observados Arenós (1978/79 - 2019/20)
Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Figura 32 compara el año hidrológico medio observado y simulado. La forma de la curva simulada reproduce adecuadamente la estacionalidad de las aportaciones, incluyendo el máximo en primavera (abril–mayo) y el mínimo estival. Las bandas de incertidumbre (P_{10} – P_{90}) abarcan razonablemente la variabilidad interanual de los datos observados, y la mediana simulada se mantiene próxima a la mediana observada.

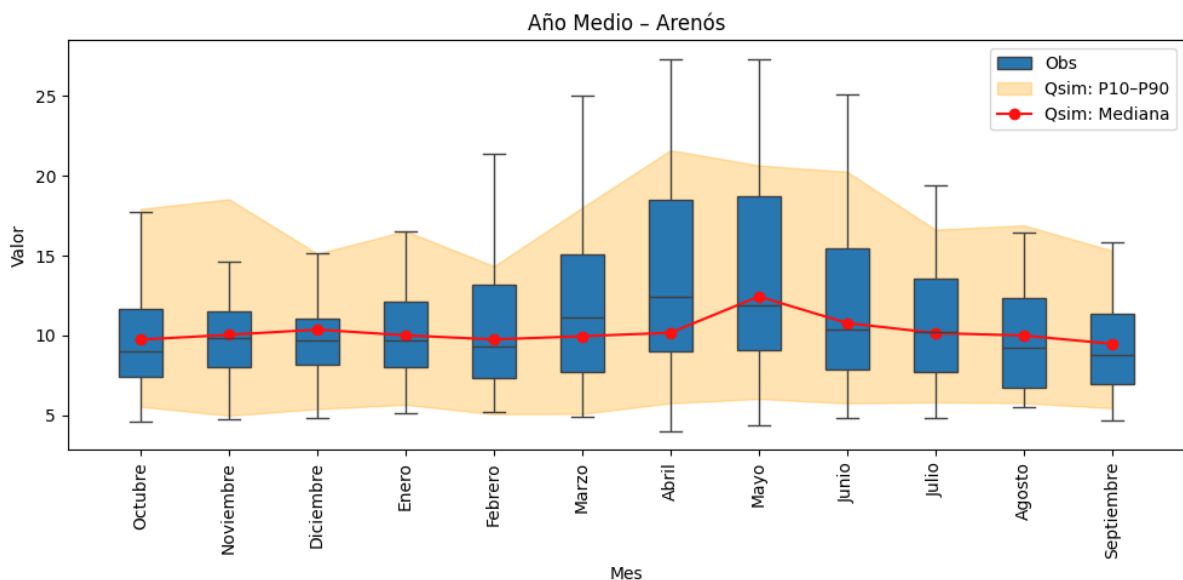


Figura 32: Comparación año medio simulado vs observado Arenós (1978/79 - 2019/20)
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados reflejan una adecuada capacidad del modelo HBV calibrado para reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca vertiente al embalse de Arenós en el periodo 1978–2020, especialmente en el conjunto de

calibración. La disminución del rendimiento en la validación sugiere la necesidad de analizar escenarios hidrológicos recientes mediante modelos calibrados para periodos específicos, como se abordará en secciones posteriores.

Calibración serie corta (2000/01 – 2019/20): Como respuesta a la evidencia de un cambio en el comportamiento hidrológico de la cuenca del Mijares a partir del año 2000 —tal como se discutió en el análisis de la serie larga— se procedió a una segunda calibración centrada exclusivamente en el periodo 2000/01–2019/20. Esta ventana temporal coincide con una mayor disponibilidad y calidad de registros meteorológicos y operacionales, lo que permite una caracterización más precisa de la dinámica hidrológica reciente.

En la Figura 33 se presenta la segmentación de los datos en conjuntos de calibración (2000/01–2013/14) y validación (2014/15–2019/20), los cuales muestran una amplia gama de condiciones hidrológicas, incluyendo eventos extremos relevantes para la calibración del modelo.

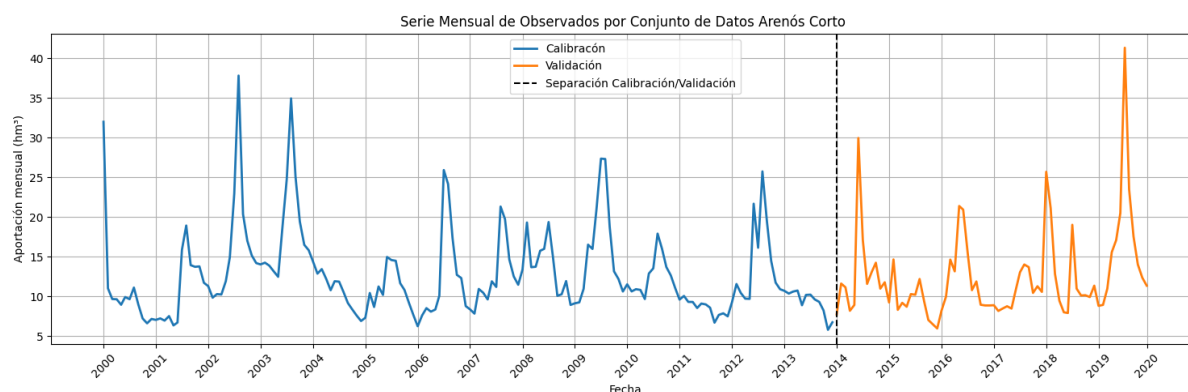


Figura 33: Set de calibración y validación serie corta Arenós (2000/01 – 2019/20).

La Tabla 11 resume los valores obtenidos para el índice de eficiencia de Nash. El modelo alcanzó un excelente ajuste durante la fase de calibración ($NSE = 0,81$), lo que refleja una adecuada representación de las dinámicas hidrológicas del periodo. Sin embargo, en la validación, el desempeño disminuyó ($NSE = 0,56$), lo que sugiere cierta pérdida de capacidad predictiva fuera del rango ajustado, posiblemente vinculada a eventos extremos mal representados o a cambios no capturados en la estructura del modelo.

Tabla 11: Índice de Nash para calibración y validación – Arenós serie corta.

Conjunto	Periodo	NSE
Calibración	2000/01 - 2013/14	0.81
Validación	2014/15 - 2019/20	0.56

La calibración generó el conjunto de parámetros que se muestra en la Tabla 12. Comparados con la configuración obtenida para la serie larga, se observa una mayor sensibilidad a la humedad del suelo (valor de β), así como un incremento del coeficiente de descarga rápida (K_0), lo cual podría reflejar un cambio hacia respuestas más reactivas ante eventos de precipitación intensos, características propias del periodo más reciente.

Tabla 12: Parámetros calibrados para el embalse de Arenós – Serie corta (2000/01 – 2019/20).

Parámetro	Valor Calibrado
β	2.93
FC	238.10
PWP	226.20
L_{max}	95.71
K_0	0.6172
K_1	0.0554
K_2	0.0018
K_{perc}	0.1769

La Figura 34 muestra una buena correspondencia entre los caudales observados y simulados a escala mensual, destacando la capacidad del modelo para reproducir la estacionalidad del régimen hidrológico.

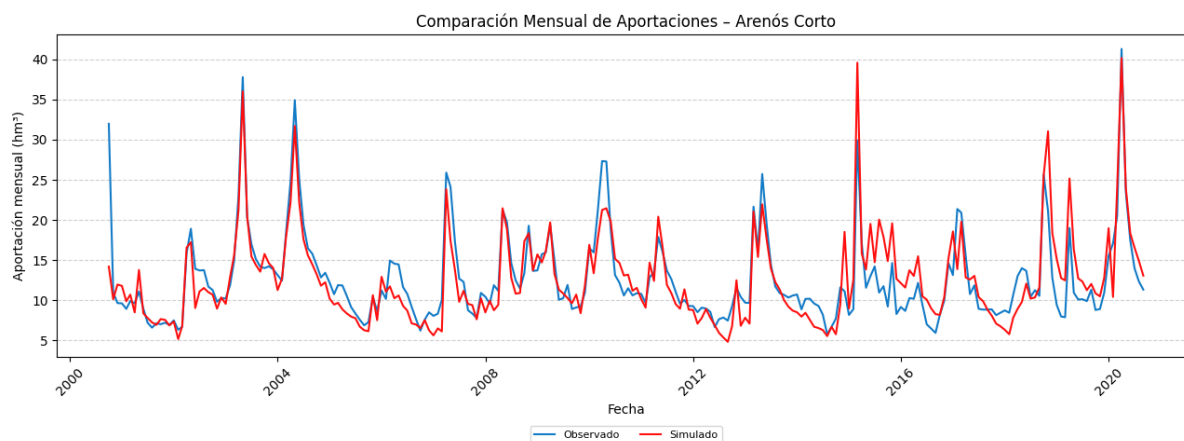


Figura 34: Comparación mensual de aportaciones simuladas vs observadas – Arenós (2000/01 – 2019/20).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35, la similitud entre los volúmenes anuales simulados y observados refuerza la validez del modelo, tanto en términos de tendencia como en magnitud. La media anual simulada (156,63 hm³) se aproxima a la observada (152,00 hm³).

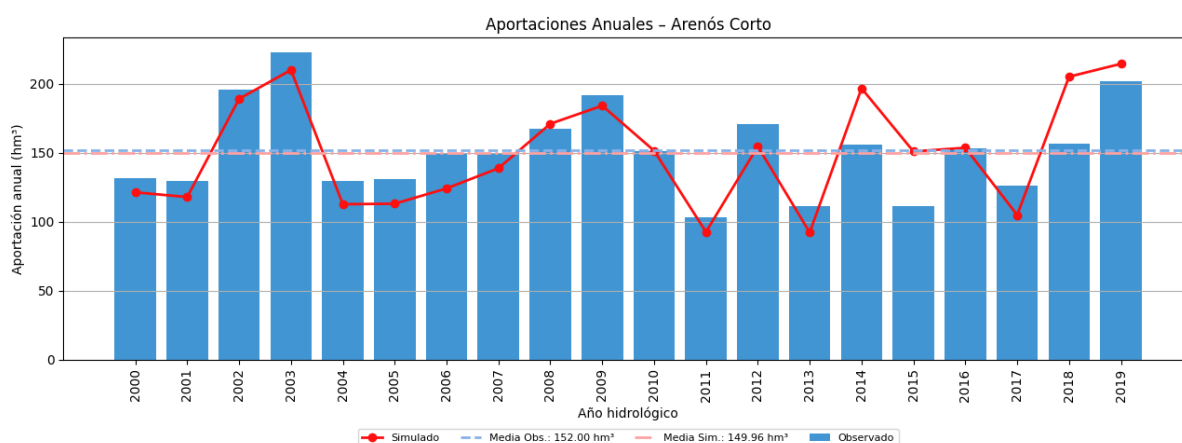


Figura 35: Comparación de aportaciones anuales simuladas vs observadas – Arenós (2000/01 – 2019/20).

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Figura 36 expone el ajuste del modelo frente al año hidrológico medio. Se observa una adecuada representación de la distribución mensual, especialmente en los meses de primavera, lo que evidencia que el modelo capta correctamente los patrones dominantes de escorrentía en este periodo.

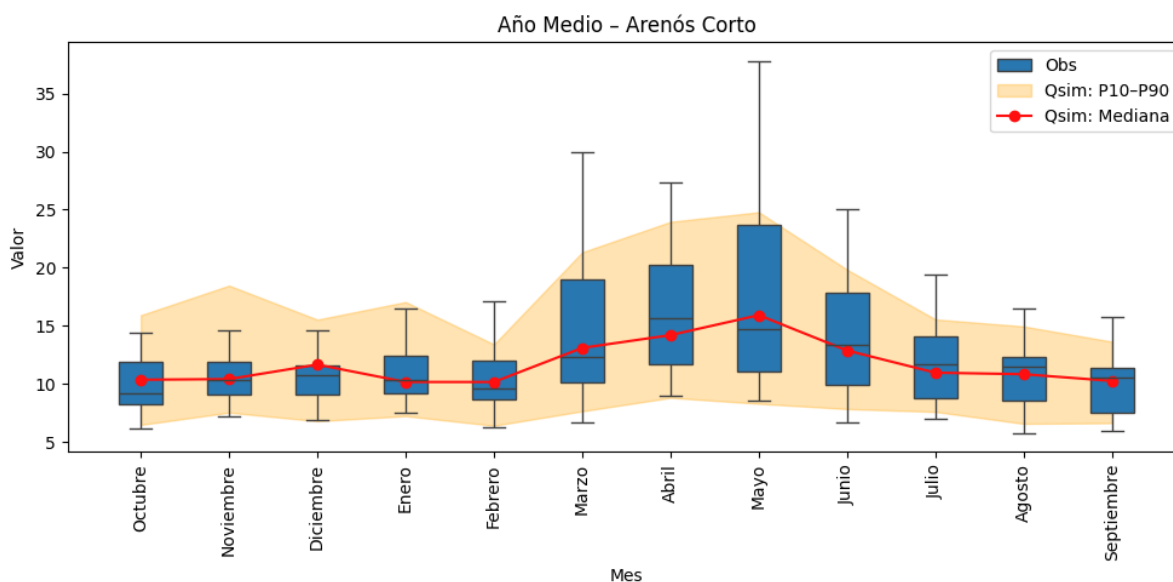


Figura 36: Año medio mensual de aportaciones simuladas vs observadas – Arenós (2000/01 – 2019/20).

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, la calibración específica para el periodo 2000–2020 ofrece una mejora sustancial en la capacidad de simulación frente a las condiciones hidrológicas actuales. Aunque la validación presenta una reducción en el índice de eficiencia, los resultados

siguen siendo aceptables y muestran un modelo robusto para apoyar la gestión del recurso hídrico en escenarios recientes.

8.1.2 Comparación modelo agregado vs. desagregado Arenós

Arenós (serie larga): Con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo HBV frente a distintas configuraciones espaciales, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con el modelo en su versión agregada y una simulación desagregada, esta última utilizando los mismos parámetros calibrados previamente. Ambos esquemas fueron ejecutados en escala mensual para el periodo 1978/79–2019/20.

La Figura 37 muestra la evolución mensual de las aportaciones simuladas frente a las observadas. En términos generales, se observa una buena correspondencia entre los dos modelos y el comportamiento registrado, especialmente durante los eventos de mayor magnitud. El modelo desagregado mantiene un patrón muy similar al del modelo agregado, reproduciendo adecuadamente los pulsos de escorrentía y capturando la estacionalidad hidrológica del sistema. Sin embargo, presenta una ligera tendencia a sobrestimar los caudales en algunos meses del periodo húmedo (noviembre–marzo), aunque sin diferencias estructurales significativas.

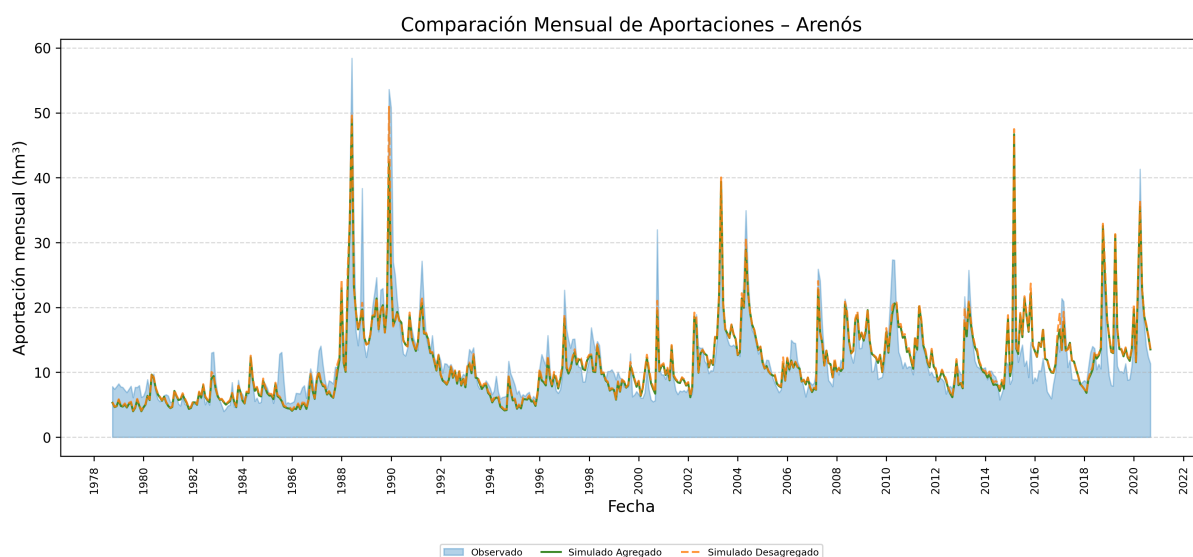


Figura 37: Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie larga).
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38 se presenta la comparación de las aportaciones anuales. Se observa una gran similitud entre las simulaciones de ambos modelos a lo largo del periodo de análisis, con ligeras diferencias puntuales en años hidrológicos extremos. La media

anual observada fue de 139.16 hm^3 , mientras que el modelo agregado estimó una media de 136.12 hm^3 y el desagregado de 139.09 hm^3 , lo que indica un ajuste satisfactorio en términos de volumen global.

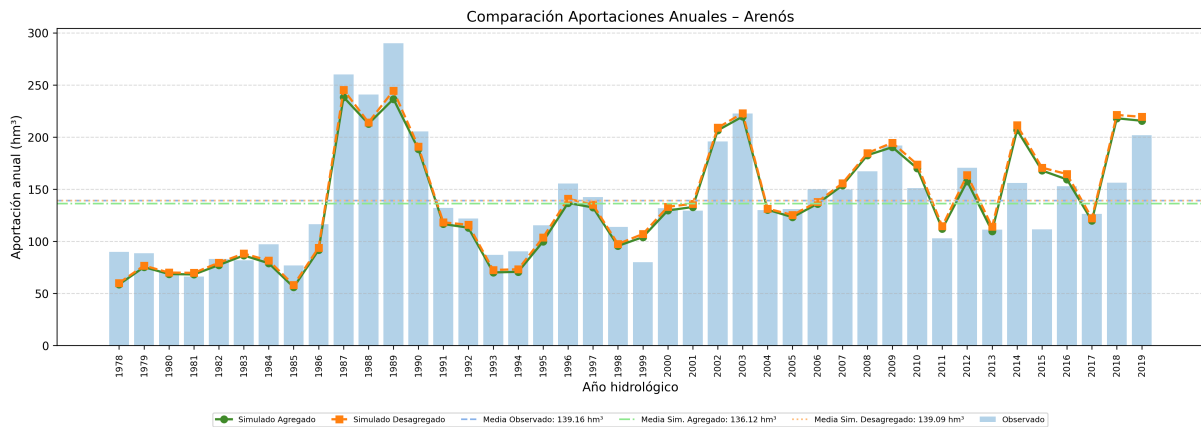


Figura 38: Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie larga).
Fuente: Elaboración propia.

El valor del índice de eficiencia de Nash obtenido con el modelo desagregado fue de 0.76, equivalente al valor alcanzado con el modelo agregado, lo que sugiere que la desagregación espacial no aportó mejoras sustanciales en términos de capacidad predictiva bajo la configuración actual.

Tabla 13: Comparación índice de Nash modelo Agregado vs Desagregado - Arenós Serie Larga

Modelo	NSE
Agregado	0.75
Desagregado	0.76

El análisis mensual, evidencia que las medianas simuladas por ambos modelos se aproximan a los valores observados durante todo el año hidrológico, especialmente entre los meses de febrero y junio, donde las diferencias se reducen a menos de 0.2 hm^3 . Esto confirma que el modelo mantiene su robustez incluso cuando se aplica una estructura espacial más detallada, aunque sin aportar beneficios evidentes en este caso.

Arenós (serie corta): En el caso del embalse de Arenós para la serie corta (2000/01 – 2019/20), se evaluaron los resultados hidrológicos obtenidos mediante el modelo HBV en su configuración agregada y desagregada. La versión desagregada fue implementada reutilizando los parámetros calibrados del modelo agregado, con el

objetivo de analizar el impacto de una mayor representación espacial sobre los resultados sin necesidad de un nuevo ajuste paramétrico.

La Figura 39 muestra la evolución de las aportaciones mensuales simuladas y observadas. Ambos modelos son capaces de capturar adecuadamente la estacionalidad hidrológica, así como los eventos de alta magnitud. No obstante, el modelo desagregado presenta una ligera sobrestimación en los valores punta, especialmente durante los meses del semestre húmedo. Esta tendencia es más pronunciada en comparación con el modelo agregado, que tiende a mantener una mejor alineación con los valores observados.

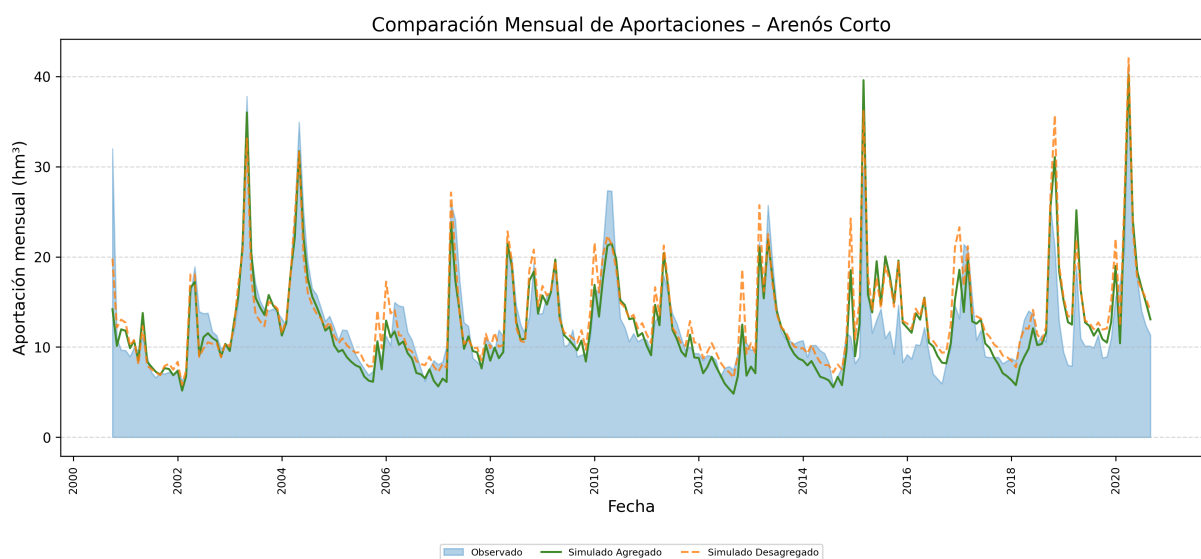


Figura 39: Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie corta).
Fuente: Elaboración propia.

A escala anual (Figura 40), se observa que el modelo desagregado reproduce con mayor fidelidad los años húmedos, pero tiende a sobrestimar en años medios y secos. Por su parte, el modelo agregado mantiene una estimación más conservadora a lo largo de toda la serie. Las medias anuales simuladas fueron de 149.96 hm^3 para el modelo agregado y 161.20 hm^3 para el desagregado, en comparación con una media observada de 152.00 hm^3 . Este comportamiento sugiere que el modelo desagregado podría estar amplificando las entradas hídricas sin capturar adecuadamente los procesos de atenuación espacial.

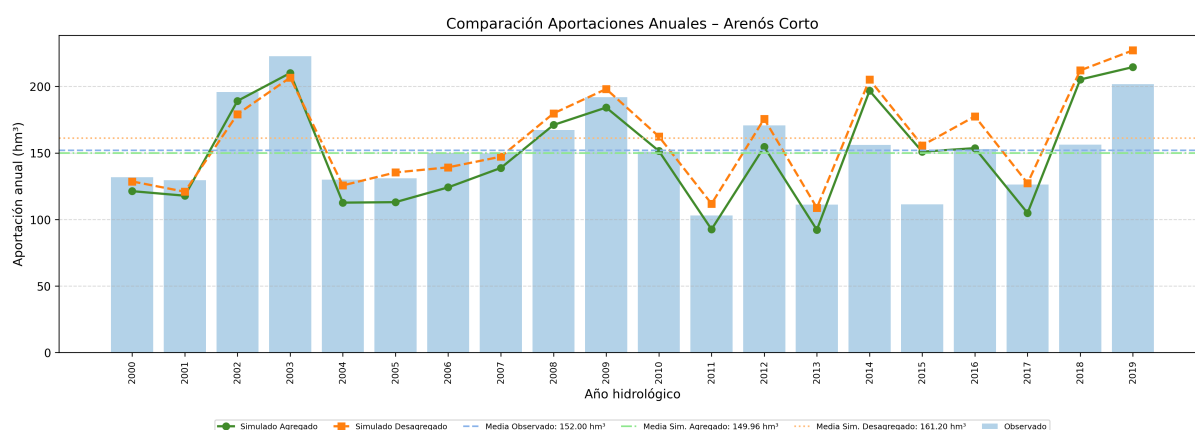


Figura 40: Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – Arenós (serie corta).
Fuente: Elaboración propia.

En términos de eficiencia, ambos modelos presentaron un rendimiento satisfactorio, con valores del índice de eficiencia de Nash de 0.73 para el modelo agregado y 0.70 para el desagregado (Tabla 14). Esta diferencia, aunque leve, indica una ligera pérdida de capacidad predictiva al aplicar la estructura desagregada sin recalibración.

Tabla 14: Comparación del índice de Nash-Sutcliffe para el modelo agregado y desagregado – Arenós (serie corta).

Modelo	NSE
Agregado	0.73
Desagregado	0.70

A nivel mensual, la comparación de medianas confirma esta interpretación: el modelo desagregado sobrestima sistemáticamente las aportaciones entre octubre y marzo, mientras que ambos modelos convergen durante el periodo estival.

8.2 Embalse de Schar

La calibración del modelo HBV para el embalse de Schar se realizó empleando una serie de aportaciones mensuales en régimen natural comprendida entre los años hidrológicos 1986/87 y 2019/20. Esta serie se dividió en dos subconjuntos diferenciados: un periodo de calibración (1986/87–2008/09) y un periodo de validación (2009/10–2019/20), como se muestra en la Figura 41. Esta segmentación permite evaluar la capacidad predictiva del modelo fuera del rango de ajuste, considerando distintos regímenes hidrológicos.

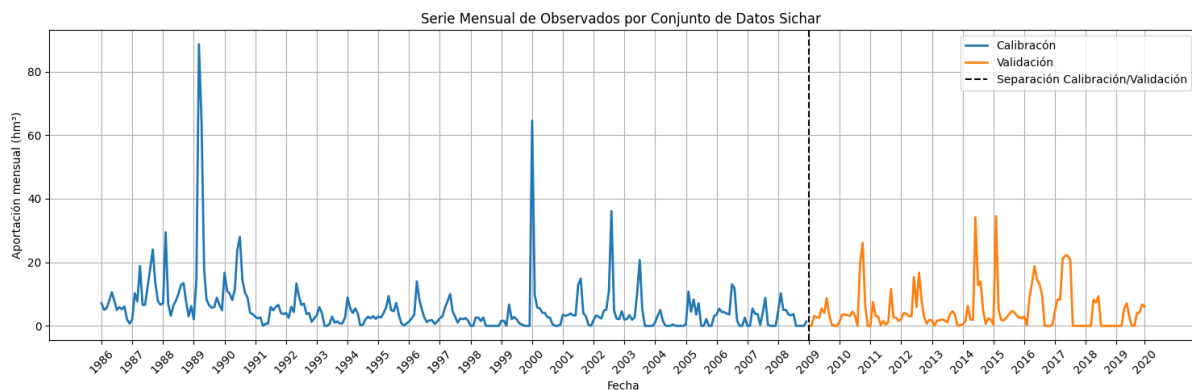


Figura 41: Set de calibración y validación Sichar (1986/87 – 2019/20).
Fuente: Elaboración propia.

8.2.1 Modelo Agregado

La Tabla 15 recoge los valores del índice de eficiencia de Nash obtenidos para los periodos de calibración y validación. Durante la fase de calibración, el modelo mostró un comportamiento satisfactorio, alcanzando un NSE de 0.70, lo que evidencia una adecuada representación de las dinámicas hidrológicas generales y de los eventos extremos.

Tabla 15: Índice de Nash para calibración y validación – Sichar.

Conjunto	Periodo	NSE
Calibración	1986/87 - 2008/09	0.70
Validación	2009/10 - 2019/20	0.10

En el periodo de validación, se observa una reducción significativa del desempeño, con un NSE de 0.10. Esta disminución en la capacidad predictiva puede atribuirse a diversos factores, como la creciente intervención antrópica en la subcuenca (centrales hidroeléctricas, canales de derivación, riegos) y la complejidad introducida por la interacción con acuíferos subterráneos, lo que genera una respuesta no lineal difícil de representar mediante modelos conceptuales agregados.

La Tabla 16 presenta los valores de los parámetros calibrados mediante el algoritmo *Differential Evolution*. Estos parámetros definen el comportamiento del modelo HBV en su configuración agregada para la cuenca vertiente del embalse de Sichar.

Tabla 16: Parámetros calibrados para el embalse de Sichar (1986/87 – 2019/20).

Parámetro	Valor Calibrado
β	1.63
FC	498.64
PWP	89.62
L_{max}	8.69
K_0	0.7759
K_1	0.2407
K_2	0.0034
K_{perc}	0.9601

La Figura 42 presenta la comparación mensual entre las series observadas y simuladas. Se aprecia una adecuada reproducción de la dinámica general de escorrentía, aunque con cierta subestimación en los picos más pronunciados y una tendencia a suavizar las variaciones intermensuales.

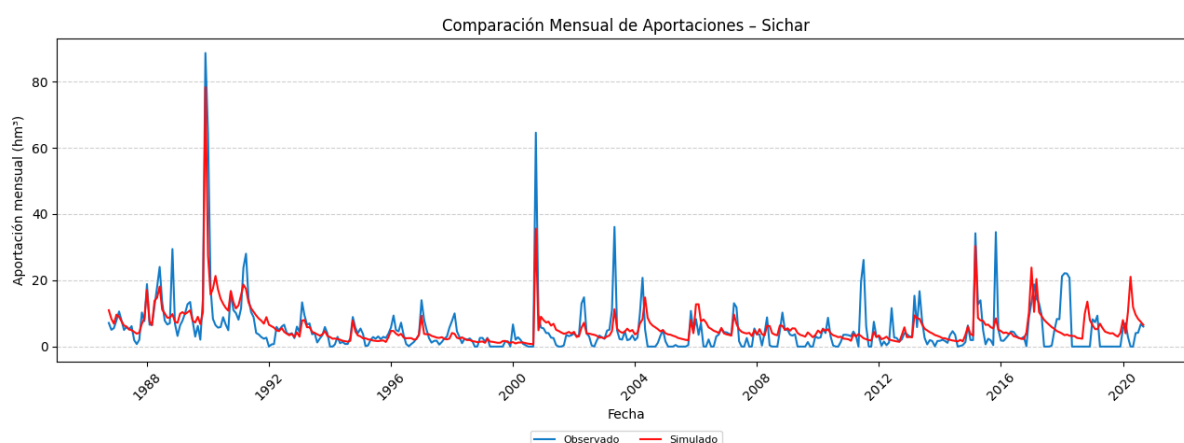


Figura 42: Comparación serie mensual simulados vs observados – Sichar (1986/87 – 2019/20).
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 43 representa las aportaciones anuales observadas y simuladas. La media observada fue de 62.33 hm³, mientras que la media simulada fue de 64.52 hm³, lo que denota un ajuste global aceptable. No obstante, se observan diferencias puntuales relevantes en los años más recientes, lo que sugiere ciertas limitaciones del modelo para representar cambios hidrológicos recientes.

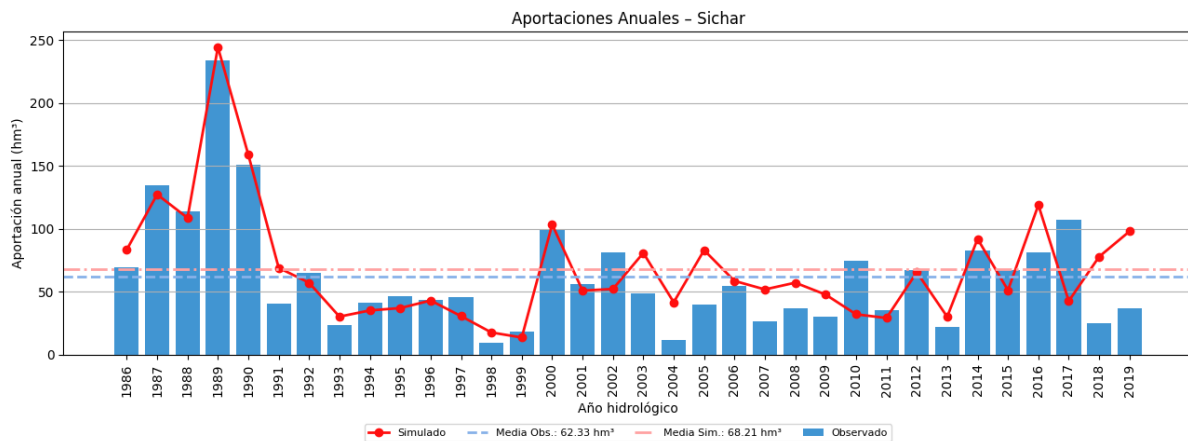


Figura 43: Comparación serie anual simulados vs observados – Sichar (1986/87 – 2019/20).
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Figura 44 muestra el año hidrológico medio mensual, donde se observa que la curva simulada reproduce correctamente el patrón estacional de las aportaciones, con máximos en primavera y mínimos durante el estiaje. Las bandas de incertidumbre ($P_{10}-P_{90}$) abarcan en su mayoría los valores observados, y la mediana de la simulación se ajusta de manera coherente a los valores centrales del registro histórico, salvo en la temporada estival, que presenta mayores discrepancias.

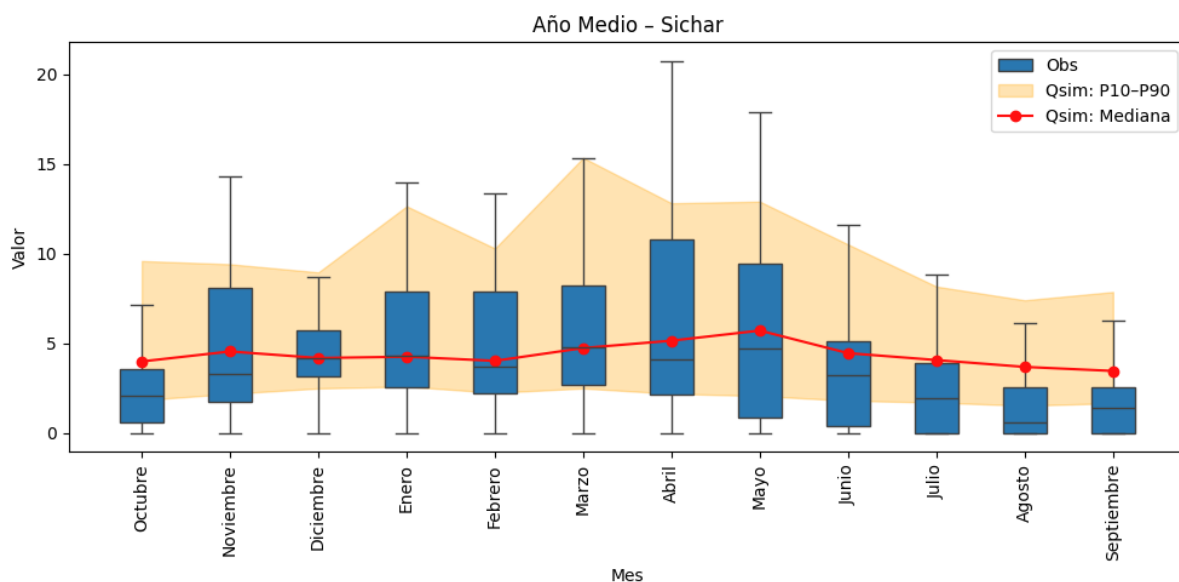


Figura 44: Comparación año medio simulado vs observado – Sichar (1986/87 – 2019/20).
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el modelo HBV calibrado para el embalse de Sichar presenta un rendimiento satisfactorio durante el periodo de calibración, con una buena representación de la media anual y de la estacionalidad hidrológica. No obstante, su

capacidad de generalización se ve limitada en el periodo de validación, posiblemente debido a factores antrópicos y geológicos que no son plenamente capturados por la configuración actual del modelo.

8.2.2 Comparación modelo agregado vs. desagregado Sichar

Para la cuenca vertiente del embalse de Sichar, se llevó a cabo una comparación entre los resultados obtenidos mediante el modelo HBV en sus versiones agregada y desagregada, utilizando la misma configuración de parámetros calibrados previamente. La finalidad fue evaluar el impacto de una discretización espacial más detallada sobre la simulación mensual y anual de aportaciones, sin un nuevo proceso de calibración.

En la Figura 45 se observa la comparación mensual entre las series simuladas y observadas. Ambas configuraciones logran reproducir los patrones estacionales característicos de la escorrentía, aunque con diferencias relevantes en la magnitud de los eventos. El modelo agregado tiende a capturar mejor los picos de escorrentía, mientras que el modelo desagregado presenta una subestimación sistemática de los caudales durante los episodios de mayor intensidad.

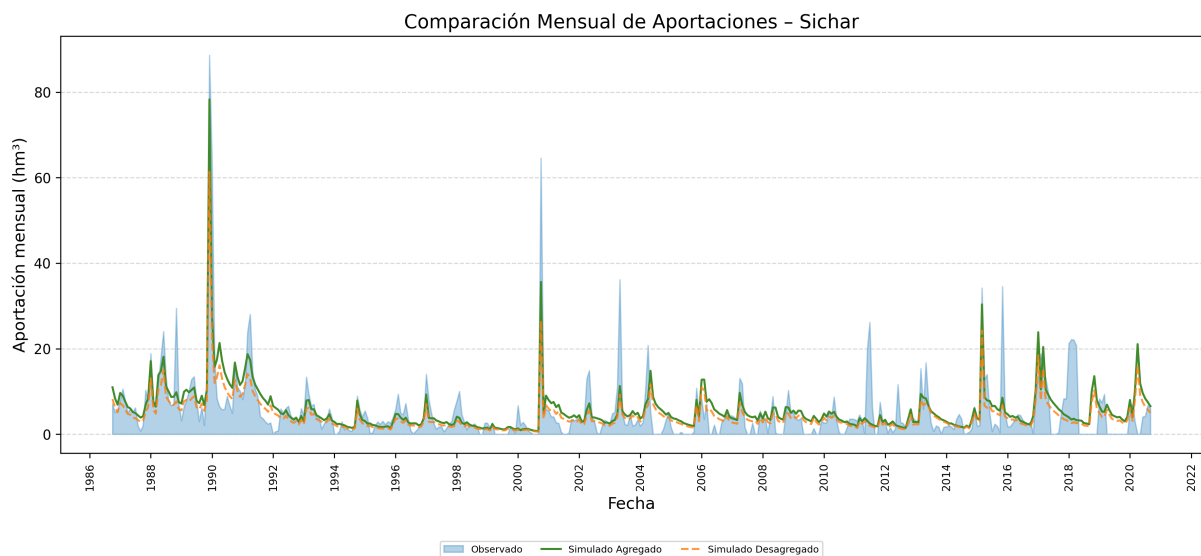


Figura 45: Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – Sichar.
Fuente: Elaboración propia.

A nivel anual (Figura 46), se evidencia una divergencia más marcada entre las simulaciones. El modelo agregado presenta una mayor dispersión respecto a los valores observados, con una media simulada de 68.21 hm^3 , frente a los 62.33 hm^3 observados. Por otro lado, el modelo desagregado produce una media más baja

(53.30 hm³), subestimando la mayoría de los años, lo cual sugiere una pérdida de capacidad para representar adecuadamente la variabilidad interanual.

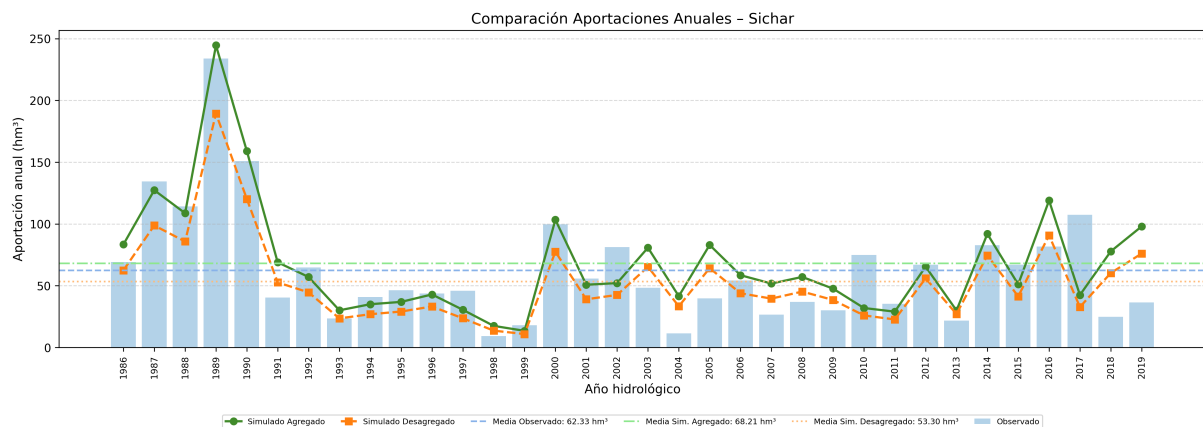


Figura 46: Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – Schar.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 17 muestra los valores del índice de eficiencia de Nash, donde el modelo agregado alcanza un valor de 0.57, frente al 0.52 del modelo desagregado. Aunque ambos modelos presentan un ajuste aceptable, la pérdida de rendimiento del modelo desagregado refuerza la necesidad de una calibración específica cuando se aplica una estructura espacial más compleja.

Tabla 17: Comparación del índice de Nash para el modelo agregado y desagregado – Schar.

Modelo	NSE
Agregado	0.57
Desagregado	0.52

Desde el punto de vista mensual, la tabla de resumen muestra que el modelo desagregado tiende a subestimar los valores observados entre los meses de octubre y marzo, que concentran la mayor parte de los caudales. Esta limitación podría estar relacionada con una incorrecta representación espacial de los procesos de retención, infiltración o redistribución de la precipitación.

8.3 Embalse M^a Cristina

La calibración del modelo HBV para la cuenca vertiente del embalse de M^a Cristina se llevó a cabo utilizando una extensa serie de aportaciones mensuales en régimen natural comprendida entre los años hidrológicos 1959/60 y 2015/16. Esta serie se dividió en dos periodos: un conjunto de calibración (1959/60–1997/98) y un conjunto

de validación (1998/99–2015/16), con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo para generalizar su desempeño fuera del periodo de ajuste, tal como se presenta en la Figura 47.

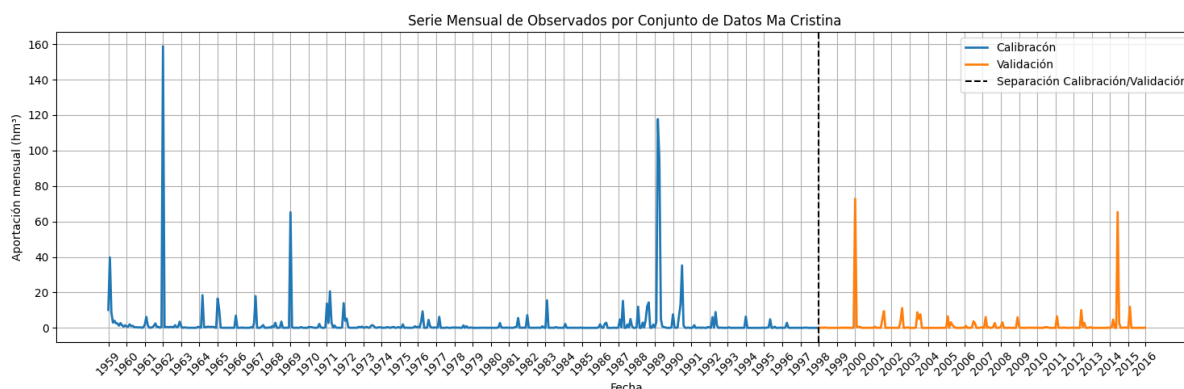


Figura 47: Set de calibración y validación Mª Cristina (1959/60 – 2015/16).
Fuente: Elaboración propia.

8.3.1 Modelo Agregado

La Tabla 18 resume los valores obtenidos para el índice de eficiencia de Nash. En el conjunto de calibración, el modelo alcanzó un NSE de 0.61, reflejando un ajuste razonable de las aportaciones simuladas frente a las observadas. El desempeño mejoró notablemente en la etapa de validación, con un NSE de 0.74, lo cual sugiere una capacidad robusta del modelo para reproducir la dinámica hidrológica incluso en periodos no calibrados.

Tabla 18: Índice de Nash para calibración y validación – Mª Cristina.

Conjunto	Periodo	NSE
Calibración	1959/60 - 1997/98	0.61
Validación	1998/99 - 2015/16	0.74

La Tabla 19 presenta los valores optimizados de los parámetros del modelo HBV obtenidos mediante el algoritmo Differential Evolution, considerando las particularidades geomorfológicas y climáticas de la cuenca.

Tabla 19: Parámetros calibrados para el embalse de M^a Cristina (1959/60 – 2015/16).

Parámetro	Valor Calibrado
β	4.05
FC	374.37
PWP	81.35
L_{max}	82.39
K_0	0.3979
K_1	0.3829
K_2	0.0007
K_{perc}	0.1692

La Figura 48 muestra la evolución temporal de las aportaciones simuladas y observadas a escala mensual. Se evidencia una buena correspondencia en los periodos de caudal bajo, mientras que en eventos extremos el modelo tiende a subestimar ciertos picos de escorrentía, especialmente en los años más antiguos, posiblemente debido a incertidumbres en los datos de entrada o en la restitución de aportaciones históricas.

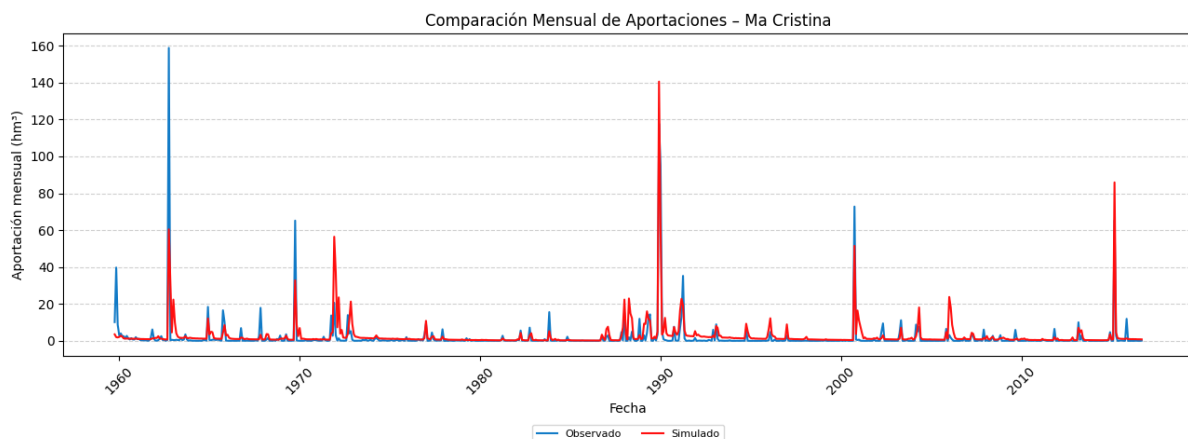


Figura 48: Comparación serie mensual simulados vs observados – M^a Cristina (1959/60 – 2015/16).
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al análisis anual (Figura 49), se observa un ajuste adecuado en la tendencia general de las aportaciones. La media anual simulada (33.20 hm³) resulta algo superior a la media observada (22.25 hm³), lo que puede deberse a limitaciones en la restitución de las aportaciones naturales, así como a la complejidad del régimen hidrológico en esta zona, donde influyen de forma significativa elementos como el drenaje subterráneo o las pérdidas por infiltración.

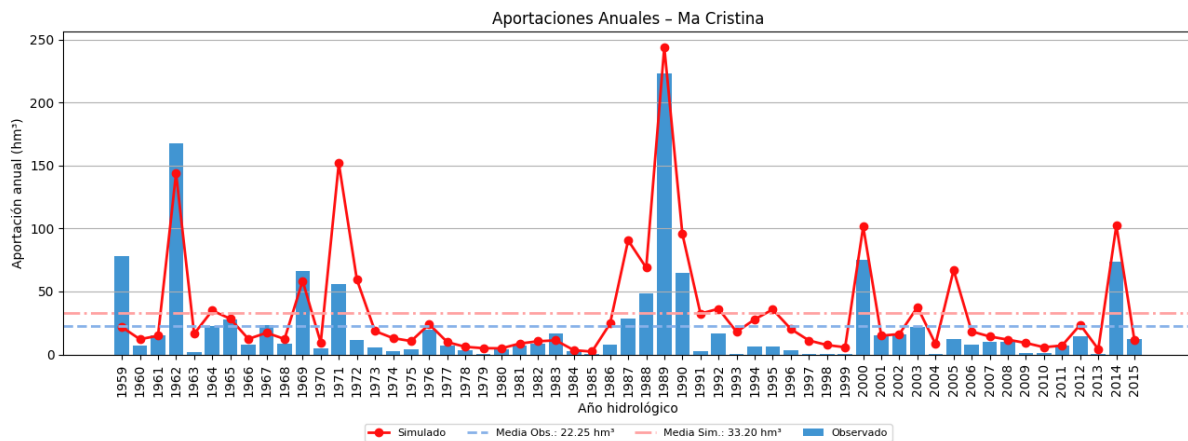


Figura 49: Comparación serie anual simulados vs observados – M^a Cristina (1959/60 – 2015/16).
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 50 muestra la comparación del año medio hidrológico entre las series de aportaciones observadas y simuladas para el embalse de María Cristina. Se observa que la mediana simulada (Q_{sim}) presenta valores superiores a los caudales observados (Q_{obs}) en todos los meses del año, especialmente durante el invierno y primavera. Destacan los meses de enero y marzo, donde la mediana simulada supera ampliamente a la observada, alcanzando hasta $1.23 \text{ hm}^3/\text{mes}$ y $1.34 \text{ hm}^3/\text{mes}$, respectivamente, mientras que las observadas se mantienen por debajo de los $0.10 \text{ hm}^3/\text{mes}$.

Esta sobrestimación general del modelo puede deberse a una simplificación en la representación de las pérdidas por infiltración o derivaciones no contabilizadas en la restitución a régimen natural. Las bandas de incertidumbre del modelo (P10–P90) cubren razonablemente los valores observados durante la mayor parte del año, lo que indica una cierta capacidad del modelo para capturar la variabilidad del sistema, aunque con tendencia a sobrevalorar los aportes.

Por último, durante los meses de estiaje (julio a septiembre), tanto los valores simulados como observados se mantienen bajos, si bien el modelo continúa mostrando ligeros excesos respecto a la realidad registrada.

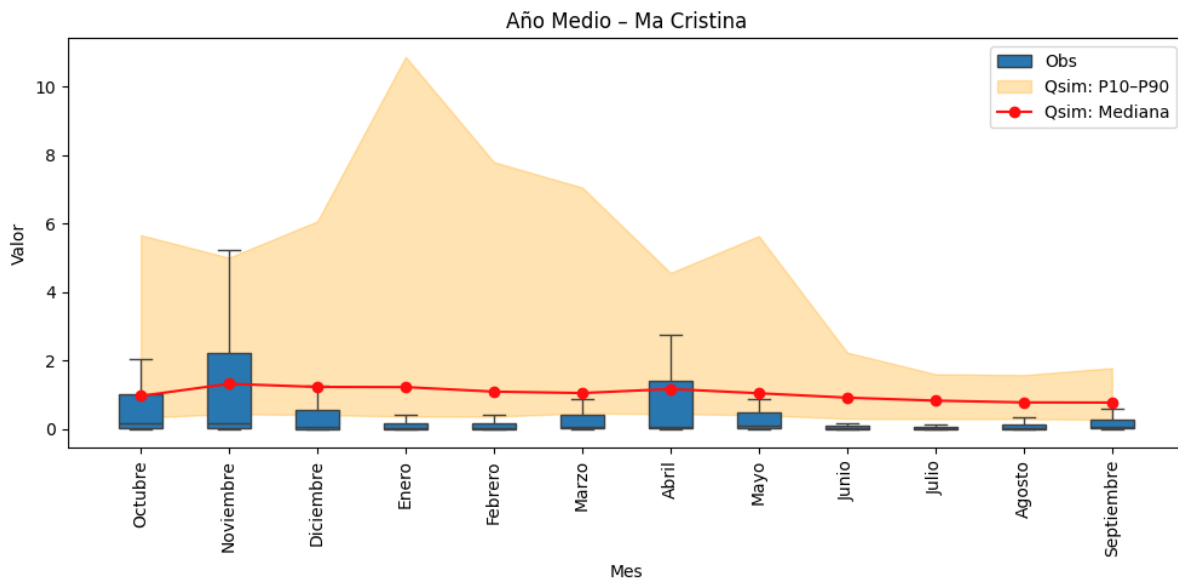


Figura 50: Comparación del año hidrológico medio mensual – María Cristina.
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados obtenidos para la cuenca vertiente del embalse de M^a Cristina muestran un desempeño aceptable del modelo HBV en ambas fases de calibración y validación. A pesar de ciertas desviaciones en los eventos extremos y de la complejidad inherente a la dinámica hidrológica de la zona, el modelo es capaz de reproducir de forma aceptable la distribución temporal de las aportaciones, tanto a escala mensual como anual.

8.3.2 Comparación modelo agregado vs. desagregado – M^a Cristina

El embalse de María Cristina presenta una dinámica hidrológica caracterizada por una alta intermitencia y eventos extremos poco frecuentes pero de elevada magnitud. En este contexto, se compararon los resultados obtenidos mediante el modelo HBV en su versión agregada y desagregada, utilizando los mismos parámetros previamente calibrados, para evaluar las diferencias en la capacidad de simulación bajo diferentes esquemas espaciales.

La Figura 51 muestra la evolución de las aportaciones mensuales simuladas y observadas. Ambos modelos logran reproducir adecuadamente el patrón estacional y los principales eventos de escorrentía, aunque se observan ligeras diferencias en la magnitud de los picos simulados. El modelo desagregado tiende a representar con mayor intensidad los eventos máximos, sobreestimando en varios casos los valores observados. No obstante, esta tendencia es moderada y no se manifiesta de forma sistemática en todos los años hidrológicos.

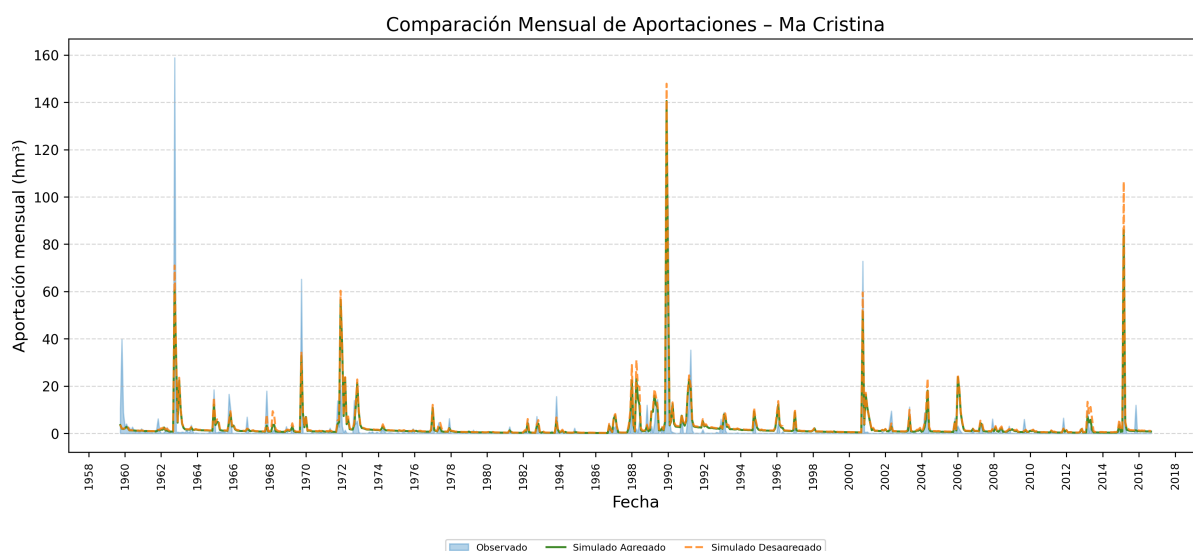


Figura 51: Comparación mensual de aportaciones simuladas y observadas – M^a Cristina.
Fuente: Elaboración propia.

En términos de aportación anual (Figura 52), ambos modelos presentan un buen comportamiento global, con simulaciones que capturan adecuadamente los años húmedos más relevantes del registro (por ejemplo, 1962, 1971, 1990 y 2014). El modelo agregado presenta una media anual de 33.20 hm^3 , mientras que el desagregado alcanza los 38.88 hm^3 , frente a una media observada de 22.25 hm^3 . Estas diferencias reflejan una sobrestimación estructural por parte de ambos modelos, especialmente en los años de mayor intensidad pluviométrica, lo cual podría estar vinculado a una limitada representación de las pérdidas en el sistema.

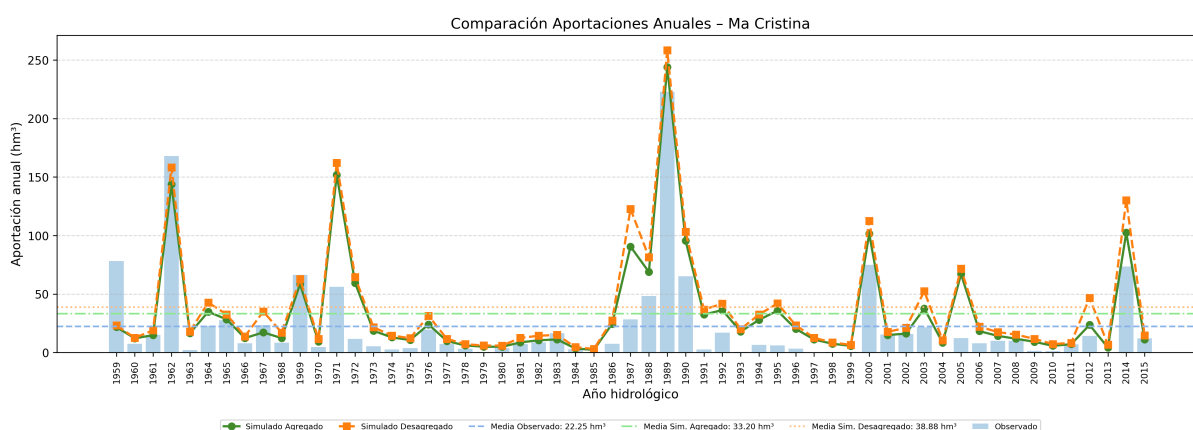


Figura 52: Comparación anual de aportaciones simuladas y observadas – M^a Cristina.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al ajuste estadístico, ambos modelos muestran rendimientos similares, con un índice de eficiencia de Nash de 0.63 para el modelo agregado y 0.61 para el

modelo desagregado, como se muestra en la Tabla 20. Esta ligera diferencia no sugiere una mejora sustancial al incorporar mayor desagregación espacial sin recalibración, aunque permite conservar la estructura del modelo y adaptarlo a configuraciones más complejas.

Tabla 20: Comparación del índice de Nash para el modelo agregado y desagregado – M^a Cristina.

Modelo	NSE
Agregado	0.63
Desagregado	0.61

El análisis mensual confirma que la sobrestimación se concentra principalmente en los meses del semestre húmedo (noviembre–abril), mientras que en los meses de estiaje las simulaciones se mantienen bajas y similares entre modelos, reproduciendo adecuadamente los valores mínimos observados.

9 Resultados

9.1 Prueba de Homogeneización

El objetivo de esta prueba fue determinar si alguno de los grupos de parámetros calibrados en los puntos de evaluación seleccionados poseía la capacidad de generalizar y reproducir adecuadamente el comportamiento hidrológico en cualquier otro punto de la cuenca. Este análisis permitiría identificar parámetros representativos que pudieran aplicarse de forma homogénea en toda la cuenca, simplificando el proceso de modelación.

Para llevar a cabo esta verificación, se implementó un procedimiento de intercambio de parámetros entre modelos. Por ejemplo, los parámetros calibrados en el punto de evaluación **Arenós** fueron aplicados al modelo correspondiente a **Sichar**, obteniéndose así una serie simulada de aportaciones mensuales en este último. Posteriormente, esta serie fue comparada con las aportaciones observadas en Sichar mediante evaluación gráfica y estadística. Este mismo proceso se repitió para todas las combinaciones posibles, de manera que cada conjunto de parámetros fue probado en cada uno de los modelos asociados a los distintos puntos de evaluación.

Tras analizar los resultados de todas las combinaciones, se concluyó que ninguno de los grupos de parámetros calibrados mostró la capacidad de homogeneizar y generalizar el comportamiento hidrológico de los demás puntos de evaluación. Esto indica que las condiciones hidrológicas y fisiográficas particulares de cada subcuenca influyen significativamente en la respuesta del modelo, y que los parámetros calibrados son, en gran medida, específicos del área para la cual fueron ajustados.

No obstante, para la simulación de la serie de aportaciones totales de la cuenca se optó por emplear el grupo de parámetros calibrados en el punto de evaluación **Arenós**. Esta elección se sustentó en que, durante el proceso de calibración, este conjunto presentó los mejores indicadores estadísticos de ajuste y una mayor estabilidad en la validación, además de abarcar una cuenca vertiente amplia y representativa de las condiciones fisiográficas y climáticas predominantes en el Mijares. Estas características lo convierten en la opción más robusta y coherente para representar el comportamiento hidrológico global del sistema.

9.2 Modelo Completo Cuenca Río Mijares

Además de los modelos individuales implementados para cada embalse, se desarrolló un modelo integral de la cuenca del río Mijares con el objetivo de obtener una serie de aportaciones totales en régimen natural para todo el sistema. Este enfoque permite evaluar de manera conjunta la respuesta hidrológica de la cuenca y cuantificar el balance hídrico global, integrando la variabilidad espacial de los procesos precipitación – escorrentía.

El modelo se implementó adoptando una configuración semidistribuida que representa cada masa de agua superficial como una subcuenca independiente como se muestra en la Figura 53. La delimitación y codificación de estas masas de agua se realizó siguiendo el Plan Hidrológico vigente, y su inclusión en el modelo estuvo condicionada a la disponibilidad de registros de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) para todo el periodo de simulación.

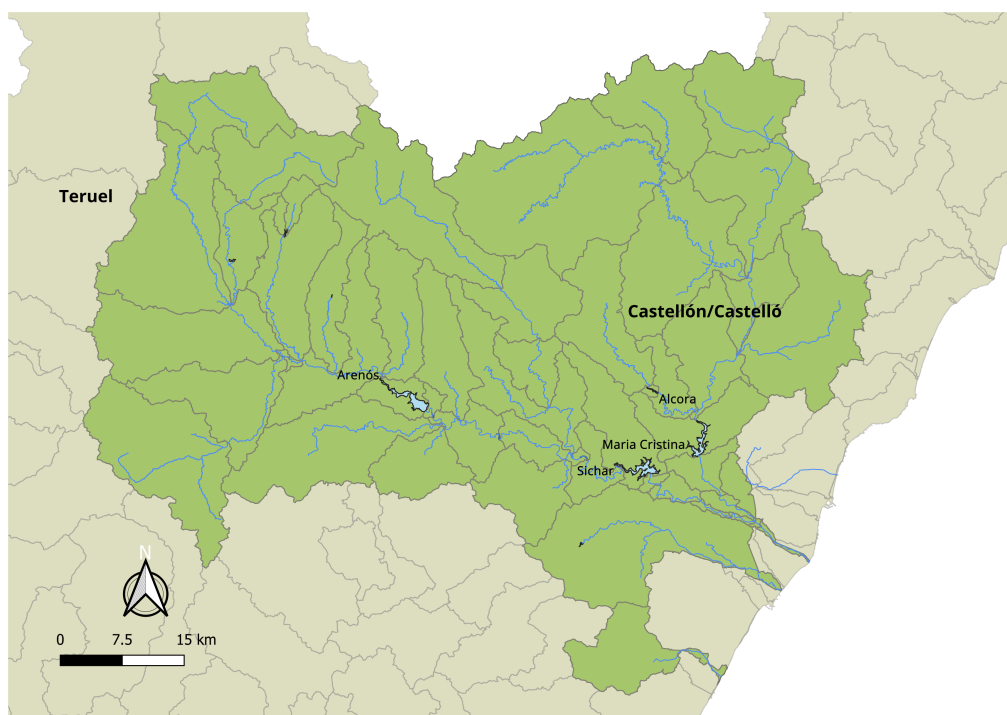


Figura 53: Disposición espacial de las subcuencas incluidas en el modelo integral de la cuenca del río Mijares.

En total, se consideraron las masas de agua indicadas en la Tabla 21, todas ellas con datos completos de P y ETP. Para la parametrización del modelo en cada subcuenca no se llevó a cabo un proceso de calibración individual, sino que se adoptaron los parámetros obtenidos en la calibración de los modelos estudiados en la sección 8.

Tabla 21: Masas de agua incluidas en el modelo integral de la cuenca del río Mijares.
Fuente: Elaboración propia.

CodMasa	Superficie (km ²)	CodMasa	Superficie (km ²)
10-01	51.88	10-04A	3.07
10-02A	77.85	10-04B	84.32
10-03-01-01	109.08	10-05A	115.47
10-03-02-01A	222.10	10-06	70.85
10-03-02-02	107.69	10-06-01-01	28.83
10-03-03-01	205.31	10-06-02-01	47.57
10-03-03-02	117.41	10-06-03-01	172.71
10-03-03-03	116.12	10-06A	67.28
10-03A	5.86	10-07	81.72
10-03B	14.80	10-07-01-01	6.61
10-03C	169.30	10-07-02-01A	36.15
10-04-01-01	61.52	10-07-02-02	79.89
10-07-02-03	199.50	10-07-02-04	93.58
10-08	45.98	10-09	109.26
10-10A	34.31	10-10B	85.17
10-11A	4.59	10-11B	13.85
10-12-01-01	3.22	10-12-01-02	2.10
10-12-01-02-01-01	118.66	10-12-01-02-01-01-01-01	127.57
10-12-01-02-01-02	358.76	10-12-01-03	107.31
10-12-01-03-01-01	186.91	10-12-01-04	53.78
10-12-01-04-01-01	204.49	10-12-01-04-01-02	97.05
10-12-01-04-01-03	111.16	10-12-01-05	2.31
10-12-01-06	35.05	10-12A	76.73
10-12B	28.05	10-13A	9.80
11-01	18.56	12-01	3.42

Tras evaluar el comportamiento del modelo integrado con los parámetros de los diferentes puntos de evaluación, se seleccionó el correspondiente al **Embalse de Arenós**. Esta decisión se fundamenta en que dicho modelo presentó el mejor ajuste estadístico y la mayor fiabilidad en el proceso de calibración, por lo que se consideró representativo del comportamiento hidrológico general de la cuenca. Los resultados de este análisis se mostrará en esta sección más adelante.

Las series de P y ETP fueron integradas como entradas independientes para cada subcuenca, de manera que la modelación recogiera la heterogeneidad espacial de las condiciones meteorológicas en toda la cuenca del Mijares. Tal como se muestra en la Figura 53, las subcuencas incluidas en el modelo drenan hacia distintos puntos

intermedios, que a su vez confluyen en el eje principal del río Mijares. El esquema de acumulación superficial se configuró para que todas las aportaciones convergieran en un único punto de control situado en su desembocadura, permitiendo así obtener la serie mensual de aportaciones totales de la cuenca; sin embargo, se tienen en cuenta las aportaciones de los ríos Veo y Belcaire. Esta estructura de modelación responde a la filosofía del módulo de cálculo de *EvalHid*, en el que las escorrentías simuladas en cada unidad se suman automáticamente siguiendo la red de drenaje definida (Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), 2022).

El resultado de este modelo integral constituye una herramienta de síntesis para el análisis hidrológico de la cuenca, aportando una visión global de la disponibilidad hídrica y sirviendo de base para estudios de planificación y gestión en el sistema Mijares–Plana de Castellón.

9.2.1 Comparación con Series Anuales Oficiales

El río Mijares constituye el cauce principal del sistema de explotación Mijares–La Plana de Castellón, definido por la CHJ, organismo responsable de su gestión. Dentro de sus funciones, la CHJ realiza anualmente una evaluación del recurso hídrico convencional, considerando el conjunto de aportaciones superficiales, cuyos valores se integran en las series históricas disponibles en el SIA Júcar.

Con el objetivo de validar el desempeño del modelo propuesto en este TFM, se efectuó una comparación gráfica y una evaluación estadística entre las aportaciones anuales estimadas por el modelo HBV empleando los cuatro conjuntos de parámetros obtenidos en la calibración y las series oficiales.

En la Figura 54 se aprecia que los parámetros correspondientes a **Arenós** y **Arenós serie corta** reproducen de forma más consistente el patrón de variabilidad interanual observado en las aportaciones oficiales. En contraste, los parámetros derivados de **Sichar** y **M^a Cristina** presentan una mayor discrepancia respecto a dichas series. Este análisis visual se corrobora estadísticamente mediante los valores del índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) presentados en la Tabla 22.

Tabla 22: Índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) para diferentes configuraciones de parámetros del modelo HBV integrado.

Configuración	NSE
Arenós	0.531
Arenós corto	0.439
Sichar	-0.698
M ^a Cristina	-2.569

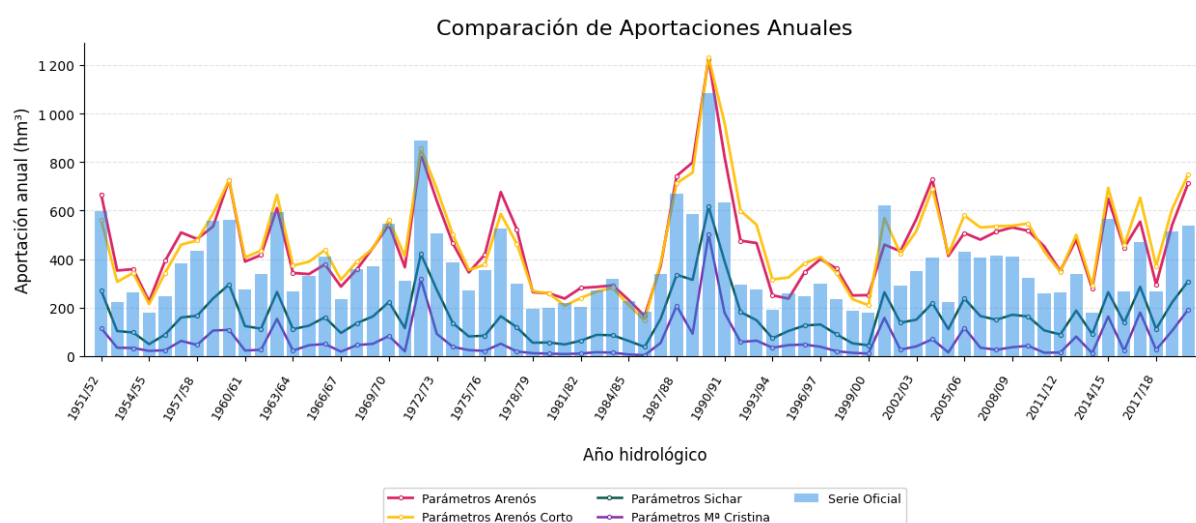


Figura 54: Comparación de la serie oficial de aportaciones anuales del S.E. Mijares–La Plana de Castellón frente a las series simuladas con el modelo HBV integrado.
Fuente: Elaboración propia.

Aunque los parámetros de **Arenós** muestran la mejor capacidad de reproducción del comportamiento hidrológico de la cuenca, presentan una ligera tendencia a sobreestimar las aportaciones. Esta sobreestimación es más evidente en los años más recientes de la serie, tal como se observa en la Figura 55. Es también apreciable esta tendencia en los valores medios de las aportaciones, donde se observa una diferencia de cerca de 87 hm³, superando la media de la serie oficial.

Tabla 23: Comparación Aportación acumulada a la red fluvial ($\text{hm}^3/\text{año}$) en régimen natural con los resultados del modelo HVB completo en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.
Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2023b)

Periodo	Mínimo (hm^3)	Media (hm^3)	Máximo (hm^3)
Series Oficiales			
1940/41–2017/18	155,2	339,4	1.029,1
1980/81–2017/18	155,2	328,0	1029,1
Modelo HBV Completo			
1951/52–2019/2020	165,1	457,1	1224,9

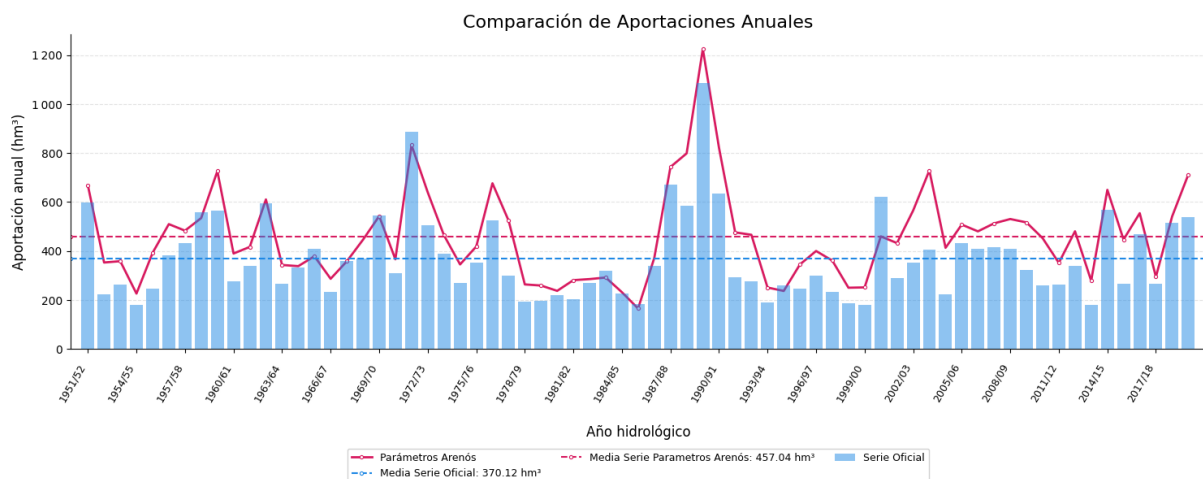


Figura 55: Comparación de la serie oficial de aportaciones anuales del S.E. Mijares–La Plana de Castellón frente a la serie simulada con el modelo HBV integrado (parámetros Arenós).
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los parámetros de **Sichar** y **M^a Cristina**, los valores negativos de NSE indican que la media de las aportaciones oficiales constituye un predictor más preciso que las simulaciones realizadas con dichos parámetros. Esto sugiere una escasa representatividad hidrológica de estos conjuntos de parámetros para la cuenca completa, lo cual podría deberse a su menor superficie de aportación y a que sus calibraciones reflejan únicamente las condiciones hidrológicas locales de sus respectivas cuencas vertientes, sin capturar adecuadamente la variabilidad espacial y climática de toda la cuenca del Mijares.

9.2.2 Series Diarias

El *modelo integrado HBV*, implementado mediante la herramienta *EvalHid*, se concibe como un soporte operativo para la estimación y la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Mijares. Una de sus aportaciones diferenciales es la posibilidad de ejecutar el modelo a escala diaria y obtener series de aportaciones en puntos de desagüe definidos, generando información con la resolución necesaria para la toma de decisiones en explotación y planificación operativa (Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), 2022).

La relevancia de disponer de series diarias es múltiple. En primer lugar, permiten representar con mayor fidelidad la respuesta hidrológica de la cuenca ante la variabilidad intraanual de la precipitación y la evapotranspiración, capturando eventos de corta duración (avenidas, pulsos de recarga) y los periodos de estiaje. Ello redunda en una mejor caracterización de las componentes de escorrentía (rápida y base) y de los procesos de almacenamiento y percolación, aspectos que HBV modela de forma parsimoniosa, pero físicamente coherente mediante sus módulos de humedad del suelo, descarga subsuperficial y flujo base (Bergström, 1995).

En segundo lugar, la resolución diaria aporta valor añadido para la operación de embalses y la gestión de demandas. Con series de aportación diaria es posible contrastar y ajustar reglas de explotación (curvas guía, umbrales de activación de derivaciones), evaluar medidas de mitigación en situaciones de escasez y analizar la robustez del sistema ante sequías prolongadas. Este nivel de detalle facilita también la verificación del cumplimiento de caudales ecológicos y el seguimiento de indicadores de estado, que suelen definirse o comprobarse en ventanas temporales cortas (diario–semanal), mejorando la capacidad de respuesta ante cambios rápidos en las condiciones hidrológicas.

En tercer lugar, el uso de *EvalHid* como plataforma de cálculo permite integrar las aportaciones diarias en marcos de decisión de sistema (p.ej., modelos de simulación / optimización acoplados a la gestión), gracias a su definición explícita de puntos de desagüe y a la generación de archivos de resultados normalizados. Esta integración favorece una cadena de información coherente entre la modelación precipitación–escorrentía y los módulos de asignación de recursos, de modo que las decisiones operativas se nutren de hidrología *consistente* y *actualizable* (Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), 2022).

Desde la perspectiva metodológica, la obtención de series diarias con *EvalHid* cumple dos objetivos complementarios. Por un lado, **estimación**: reconstruir aportaciones

naturales diarias en los puntos de control de interés, en coherencia con los balances anuales/mensuales empleados en planificación, pero añadiendo granularidad temporal. Por otro, **gestión**: proporcionar escenarios diarios para simulaciones de operación (p.ej., evaluación de reglas de desembalse, coordinación entre embalses, apoyo al reparto de recursos en periodos críticos) y para la comparación con series oficiales restituidas a régimen natural.

En síntesis, la resolución diaria dota al *modelo integrado HBV* de una utilidad práctica que trasciende el análisis puramente diagnóstico: habilita una *hidrología operativa* que alimenta decisiones de explotación y refuerza la trazabilidad entre la dinámica hidrológica de la cuenca y la gestión del sistema.

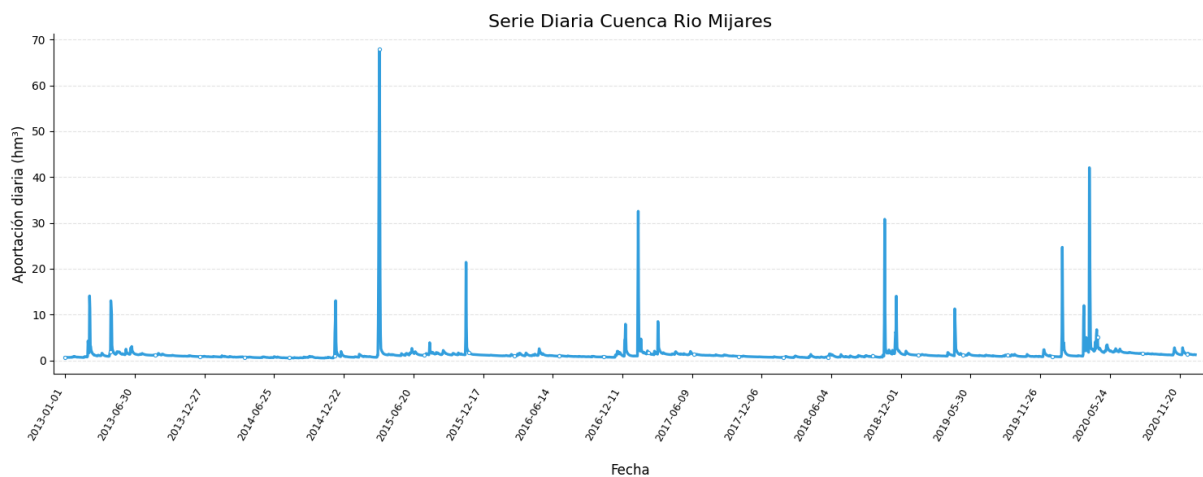


Figura 56: Serie diaria de aportación en la cuenca del río Mijares (modelo HBV integrado con EvalHid).

La Figura 56 muestra el hidrograma diario de aportaciones generado con el modelo integrado HBV ejecutado en *EvalHid*. La resolución diaria permite representar con detalle pulsos breves y de gran magnitud y su posterior recesión, en línea con la estructura conceptual del HBV (almacenamiento en suelo y tanques de descarga rápida y lenta). En conjunto, esta serie diaria constituye una evidencia clave para estimar la magnitud, el momento y la duración de los picos de entrada a embalses, apoyar maniobras preventivas de desembalse y verificar umbrales operativos y ambientales, reforzando la trazabilidad entre la dinámica hidrológica simulada y las decisiones de gestión.

10 Conclusiones

- La implementación del modelo HBV mediante la herramienta *EvalHid* se demostró como una metodología robusta y confiable para simular el comportamiento hidrológico y evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Mijares. Los resultados obtenidos, validados frente a registros observados, mostraron altos valores de eficiencia (NSE) y una adecuada reproducción de las tendencias estacionales y de los caudales mensuales. Asimismo, el modelo proporciona series temporales a escala diaria, lo que permite estimar con un grado controlado de incertidumbre los picos de caudal durante episodios de avenidas en puntos críticos de la cuenca. Estos aspectos confirman la utilidad del modelo como soporte técnico para la planificación y gestión integrada del agua, contribuyendo a la toma de decisiones basada en información hidrológica confiable.
- La integración de todas las subcuencas en un único esquema de modelación proporcionó una visión global y coherente del régimen hidrológico de la cuenca del río Mijares. Este modelo integral constituye una herramienta de síntesis que facilita el análisis de la disponibilidad hídrica, la identificación de periodos críticos y la planificación del sistema de explotación. La serie continua de aportaciones generada ofrece un insumo valioso para estudios hidrológicos, energéticos y ambientales de mayor alcance.
- Las pruebas de homogeneización de parámetros evidenció que no es viable emplear un único conjunto de parámetros para toda la cuenca. Las diferencias hidroclimáticas y fisiográficas entre Arenós, Sichar y M^a Cristina requieren una calibración individualizada, lo que garantiza la correcta representación de los procesos locales (precipitación-nieve, escorrentía directa, almacenamiento subterráneo). Este enfoque evita sesgos y mejora la confiabilidad de los resultados para cada punto de control.
- El modelo desarrollado establece una base sólida para la evaluación de escenarios futuros, incluyendo la variabilidad hidrológica asociada al cambio climático y a las modificaciones en el uso del suelo. Su capacidad de simulación permitirá analizar estrategias de adaptación, optimizar la gestión de sequías y reforzar la planificación del recurso hídrico en un contexto de incertidumbre creciente, aportando valor técnico a las autoridades competentes y a los gestores del sistema.

- El embalse de Schar constituye una de las principales infraestructuras de regulación dentro del sistema de explotación Mijares–La Plana de Castellón. No obstante, este punto de control presenta el menor índice de ajuste en la etapa de validación del modelo. Este comportamiento puede atribuirse a la complejidad asociada a la restitución de las aportaciones a régimen natural, debido a las múltiples presiones antrópicas y a la presencia de una red hidráulica densa y heterogénea, lo que dificulta la reconstrucción precisa de las condiciones hidrológicas originales de la subcuenca. Dejando en evidencia la necesidad de un estudio más profundo y riguroso para llegar a series restituidas más precisas.
- Los embalses de Arenós, Schar y M^a Cristina se consolidan como componentes esenciales en el sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón. Su modelación detallada permite cuantificar aportaciones reguladas y no reguladas, evaluar la eficiencia del almacenamiento y diseñar estrategias coordinadas de operación. Esto contribuye a garantizar la cobertura de demandas urbanas, agrícolas e industriales, y a mantener los caudales ecológicos incluso en periodos de sequía prolongada.
- La incorporación de algoritmos evolutivos, como *Differential Evolution*, permitió mejorar de forma significativa la calibración automática del modelo, reduciendo la incertidumbre asociada a la parametrización y acelerando el proceso de ajuste. Este tipo de técnicas se muestra especialmente eficaz en modelos con alta dimensionalidad y no linealidad, como el HBV, donde los métodos tradicionales pueden resultar menos eficientes o converger a soluciones subóptimas.
- Los resultados del modelo HBV indicaron una menor capacidad de predicción en los años más recientes, reflejando discrepancias entre los caudales simulados y los observados. Este comportamiento evidencia que los cambios en los patrones climáticos y en la precipitación afectan directamente la precisión de los modelos hidrológicos históricos. Por ello, se subraya la necesidad de incorporar escenarios de cambio climático y variables climáticas proyectadas en futuros estudios de evaluación de recursos hídricos, garantizando una planificación más realista y resiliente frente a la variabilidad y la incertidumbre hidrológica creciente.

Referencias

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2025). ROCIO: datos diarios en rejilla de precipitación y temperatura [Accedido el 7 de julio de 2025].
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO - Food; Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Bergström, S. (1995). The HBV Model (V. P. Singh, Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*, 443-476.
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2023a). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027. Memoria - Anejo 2: Inventario de Recursos Hídricos.
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2023b). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027. Memoria - Anejo 6: Sistemas de Explotación y Balances.
- El Amrani, M., Boukhari, K., Hajjaji, M., El Ouali, A., & Bouchaou, L. (2024). Spatial and temporal stability assessment of the HBV model in the Oum Er-Rbia basin using nested cross-validation. *Remote Sensing*, 16(2), 297. <https://doi.org/10.3390/rs16020297>
- Feng, D., Shen, C., Fang, K., & Herman, J. D. (2022). Differentiable, learnable, regionalized process-based models with physical outputs can approach state-of-the-art hydrologic prediction accuracy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(24), 6413-6434. <https://doi.org/10.5194/hess-26-6413-2022>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Kamienna, M., Wróblewski, D., & Gąsiorowski, D. (2022). Calibration of conceptual rainfall-runoff models by selected metaheuristics: differential evolution vs. particle swarm optimization. *Acta Geophysica*, 70(4). <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00988-0>
- Kim, Y., et al. (2020). Assessment of hydrological models for simulating streamflow in a Mediterranean basin under data scarcity. *Water Research*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116066>
- Kula, Ü., Eris, E., & Şensoy, A. (2023). Determination of climate change impacts on Mediterranean streamflows: A case study of Edremit Eybek Creek, Türkiye. *Water*, 15(4), 763. <https://doi.org/10.3390/w15040763>

- Mohammadi, B., et al. (2020). A hybrid model for river flow forecasting using HBV conceptual model and machine learning approaches. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124181>
- Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Andreu-Álvarez, J., & Lerma-Elvira, N. (2017). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Manual Técnico v1.1.
- Pérez Martín, M. Á. (2005). *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y de la calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para las grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia] [Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente].
- Sindicato Central de Aguas del Río Mijares. (2023a). Canal de la cota 220 del río Mijares [Información resumida a partir de fuentes institucionales]. https://es.wikipedia.org/wiki/Reparto_de_aguas_del_r%C3%ADo_Mijares
- Sindicato Central de Aguas del Río Mijares. (2023b). Historia y características del canal de la cota 100 [Información resumida a partir de fuentes institucionales]. https://es.wikipedia.org/wiki/Reparto_de_aguas_del_r%C3%ADo_Mijares
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Universidad Politécnica de Valencia. (2006). Evaluación hídrica de la adecuación del embalse de Arenós y de diferentes alternativas de gestión en el sistema Mijares [Informe técnico elaborado para ACUAMED por el DIHMA (UPV)].
- Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). (2022). *Manual Técnico EvalHid v5.0* [Herramienta de simulación hidrológica desarrollada en el IIAMA-UPV]. Universitat Politècnica de València.