

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO DEL ASEGURAMIENTO DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO MIJARES EN EL TRAMO DE MONTANEJOS (CASTELLÓN), POR COMBINACIÓN DE LAS DESCARGAS DE SUS MANANTIALES TERMALES Y SUELTAS DEL EMBALSE DE CIRAT

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

DAVID JORGE ALARCÓN ATAUCUSI

Tutor:

DR. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA

JULIO, 2018



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: ESTUDIO DEL ASEGURAMIENTO DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO MIJARES EN EL TRAMO DE MONTANEJOS (CASTELLÓN) POR COMBINACIÓN DE LAS DESCARGAS DE SUS MANANTIALES TERMALES Y SUELTAS DEL EMBALSE DE CIRAT

Título del TFM en inglés: STUDY OF THE ASSURANCE OF THE ECOLOGICAL FLOW OF THE RIVER MIJARES IN THE SECTION OF MONTANEJOS (CASTELLÓN) BY COMBINATION OF THE DISCHARGES OF ITS THERMAL AND LOOSE SPRINGS OF THE CIRAT RESERVOIR

Título del TFM en Valenciano: ESTUDI DE L'ASSEGURAMENT DEL CABAL ECOLÓGIC DEL RIU MIJARES EN EL TRAM DE MONTANEJOS (CASTELLO) PER COMBINACIO DE LES DESCARREGUES DELS SEUS MANALS TERMALS I SOLTES DE L'EMBASSAMENT DE CIRAT

Alumno: DAVID JORGE ALARCON ATAUCUSI

Tutor: DR. FÉLIX FRANCÉS GRACÍA

Fecha de Lectura: JULIO, 2018

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

Aproximadamente la quinta parte de España peninsular está conformada por regiones calizas, y que son responsables de la formación de los fenómenos kársticos. La cuenca del Alto Mijares no está ajena a ello, ya que su estructura está compuesta por grandes depósitos de aguas subterráneas de origen kárstica, que se conducen mediante cavernas para luego descargar en los manantiales y algunas veces en el propio cauce. Este sistema, representa la fuente principal del desarrollo socioeconómico de la población situada dentro del ámbito de la cuenca, no solo por el hecho de suministrar el recurso hídrico para abastecimiento urbano y turístico, sino que además es el flujo base del río Mijares. Como consecuencia, estos manantiales kársticos requieren de estrategias especiales para gestionar la cantidad y calidad de sus aguas. Para ello, se implementó un modelo hidrológico distribuido a escala diaria con la ayuda del programa TETIS; en base a la información meteorológica proveniente de las estaciones interpoladas del proyecto Spain02, versión V2; que brindan una serie de datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas diarias. Con esta información y el mapa de parámetros físicos, se realizó la calibración y validación del modelo, utilizando para ello los datos observados de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA), debido a su mayor continuidad y fiabilidad de sus registros, ubicadas en las estaciones Terde (ROEA 8030) y Arenós (ROEA 8134). La inclusión de los fenómenos kársticos en el modelo TETIS, conduciendo el agua al flujo subterráneo profundo en las zonas identificadas como karst, para luego determinar la descarga en los manantiales mediante un modelo unicelular; esto debido a que los manantiales se encuentran situados fuera del límite de las zonas kársticas. Con este artificio se logró representar de manera satisfactoria los diferentes procesos hidrológicos, específicamente el flujo base. La reintegración del flujo subterráneo a través de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar del

Royo, aguas abajo de la estación Terde, ha repercutido enormemente en el balance hídrico de la cuenca, evidenciando la importancia de estos fenómenos en la implementación del modelo.

Una vez calibrado y validado el modelo se extrapolan los parámetros y factores correctores para realizar la predicción de la descarga del manantial termal Montanejos, para el periodo comprendido entre (oct.1986-sept.2006), periodo en el cual fue establecido el caudal ecológico por la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) para el tramo de estudio. El caudal medio diario simulado para este periodo es de 0.644 m³/s, lo cual nos indica que el aporte del manantial termal es suficiente para cumplir con el régimen de caudal ecológico establecido, que es de 0.4 m³/s, por tanto, no habría la necesidad de realizar sueltas desde el embalse Cirat de acuerdo al plan hidrológico, ya que generaría impactos negativos en la temperatura de sus fuentes termales, por ser una zona con alto valor turístico, gracias a la propiedad minero medicinal de sus aguas termales. Para analizar este efecto se implementó un modelo de temperatura unidimensional SSTEMP, en donde, el primer escenario se analiza solo con el aporte del manantial termal, obteniéndose temperaturas medias que oscilan entre 23-24.5°C en la estación verano, mientras en invierno llega a descender a valores que están entre 21-23°C, representando los casos extremos, donde las temperaturas más óptimas se presentan en verano y primavera a lo largo del tramo de estudio. Sin embargo, en el segundo escenario, combinando la descarga del caudal ecológico desde el embalse Cirat y la descarga del manantial termal Montanejos; se obtuvieron descensos importantes en las cuatro estaciones, donde en el caso de verano e invierno, llega a reducirse en promedio más de 3 y 6°C respectivamente. Finalmente, el último escenario es similar al segundo, con la diferencia de que los descensos son menores en las cuatro estaciones, debido a que la descarga del embalse Cirat solo es 0.16 m³/s, que es la diferencia para cumplir con el caudal ecológico en combinación con la descarga mínima del manantial termal.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

Aproximadament la cinquena part d'Espanya peninsular està conformada per regions calcàries, i que són responsables de la formació dels fenòmens càrstics. La conca d'Alt Mijares no està immersa a açò, ja que la seua estructura està compost per grans dipòsits d'aigües subterranis d'origen càrstica, que es condueixen mitjançant caveres per a després descarregar en les deus i algunes vegades en el propi llit. Aquest sistema, representa la font principal del desenvolupament socioeconòmic de la població situada dins de l'àmbit de la conca, no solament pel fet de subministrar el recurs hídric per a proveïment urbà i turístic, sinó que a més és el flux base del riu Mijares. Com a conseqüència, aquestes deus càrstiques requereixen d'estratègies especials per a gestionar la quantitat i qualitat de les seues aigües. Per a açò, es va implementar un model hidrològic distribuït a escala diària amb l'ajuda del programa TETIS; sobre la base de la informació meteorològica provinent de les estacions interpolades del projecte Spain02, versió V2; que brinden una sèrie de dades de precipitació i temperatures màximes i mínimes diàries. Amb aquesta informació i el mapa de paràmetres físics, es va realitzar el calibratge i validació del model, utilitzant per a açò les dades observades de la Xarxa Oficial d'Estacions d'Aforament (ROEA), a causa de la seua major continuïtat i fiabilitat dels seus registres, situades en les estacions Terde (ROEA 8030) i Arenós (ROEA 8134). La inclusió dels fenòmens càrstics en el model TETIS, conduint l'aigua al flux subterrani profund en les zones identificades com karst, per a després determinar la descàrrega en les deus mitjançant un model unicel·lular; açò a causa que les deus es troben situats fora del límit

de les zones càrstiques. Amb aquest artifici es va aconseguir representar de manera satisfactòria els diferents processos hidrològics, específicament el flux base. La reintegració del flux subterrani a través de les deus de Babord, Escaleruela i Mar del Royo, aigües a baix de l'estació Terde, ha repercutit enormement en el balanç hídric de la conca, evidenciant la importància d'aquests fenòmens en la implementació del model. Una vegada calibrat i validat el model s'extrapolen els paràmetres i factors correctors per a realitzar la predicció de la descàrrega de la deu termal Montanejos, per al període comprès entre (oct.1986-set.2006), període en el qual va ser establert el cabal ecològic per la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer (DHJ) per al tram d'estudi. El cabal mitjà diari simulat per a aquest període és de 0.644 m³/s, la qual cosa ens indica que l'aportació de la deu termal és suficient per a complir amb el règim de cabal ecològic establert, que és de 0.4 m³/s, per tant, no hi hauria la necessitat de realitzar soltes des de l'embassament Cirat d'acord al pla hidrològic, ja que generaria impactes negatius en la temperatura de les seues fonts termals, per ser una zona amb alt valor turístic, gràcies a la propietat miner medicinal de les seues aigües termals. Per a analitzar aquest efecte es va implementar un model de temperatura unidimensional SSTEMP, on, el primer escenari s'analitza solament amb l'aportació de la deu termal, obtenint-se temperatures mitjanes que oscil·len entre 23-24.5°C en l'estació estiu, mentre a l'hivern arriba a descendir a valors que estan entre 21-23°C, representant els casos extrems, on les temperatures més òptimes es presenten a l'estiu i primavera al llarg del tram d'estudi. No obstant açò, en el segon escenari, combinant la descàrrega del cabal ecològic des de l'embassament Cirat i la descàrrega de la deu termal Montanejos; es van obtenir descensos importants en les quatre estacions, on en el cas d'estiu i hivern, arriba a reduir-se en mitjana més de 3 i 6°C respectivament. Finalment, l'últim escenari és similar al segon, amb la diferència que els descensos són menors en les quatre estacions, a causa que la descàrrega de l'embassament Cirat solament és 0.16 m³/s, que és la diferència per a complir amb el cabal ecològic en combinació amb la descàrrega mínima de la deu termal.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

Approximately the fifth part of peninsular Spain is conformed by limestone regions, and that are responsible for the formation of the karstic phenomena. The Alto Mijares basin is not exempt in this, since its structure is composed of large deposits of underground water of karstic origin, which are conducted by caverns and then unloaded in the springs and sometimes in the river bed itself. This system represents the main source of socio-economic development of the population located within the basin, not only for the fact of supplying the water resource for urban and tourist supply, but it is also the base flow of the Mijares River. As a consequence, these karstic springs require special strategies to manage the quantity and quality of their waters. For this, a hydrological model distributed on a daily scale was implemented with the help of the TETIS program; based on meteorological information from the interpolated stations of the Spain02 project, version V2; that provide a series of data of precipitation and daily maximum and minimum temperatures. With this information and the map of physical parameters, the calibration and validation of the model was performed, using the data observed from the Official Gauging Stations Network (ROEA), due to its greater continuity and reliability of its records, located in the stations Terde (ROEA 8030) and Arenós (ROEA 8134). The inclusion of karst phenomena in the TETIS model, driving the water to the deep underground flow in the zones identified as karst, to later determine the discharge in the springs by means of a unicellular model; This is because the springs are located outside the

boundary of karst zones. With this artifice, it was possible to satisfactorily represent the different hydrological processes, specifically the base flow. The reintegration of the underground flow through the springs of Babor, Escaleruela and Mar del Royo, downstream of the Terde station, has had an enormous impact on the water balance of the basin, evidencing the importance of these phenomena in the implementation of the model.

Once the model is calibrated and validated, the parameters and correction factors are extrapolated to predict the discharge of the Montanejos thermal spring, for the period between (October 1986-September 2006), period in which the ecological flow was established for the Júcar Hydrographic Demarcation (DHJ) for the study section. The average daily flow simulated for this period is 0.644 m³ / s, which indicates that the contribution of the thermal spring is sufficient to comply with the regime of established ecological flow, which is 0.4 m³ / s, therefore, there would be no the need to carry out releases from the Cirat reservoir according to the hydrological plan, since it would generate negative impacts on the temperature of its thermal springs, as it is an area with high tourist value, thanks to the medicinal mineral property of its thermal waters. To analyze this effect, a one-dimensional SSTEMP temperature model was implemented, where the first scenario is analyzed only with the contribution of the thermal spring, obtaining average temperatures that oscillate between 23-24.5 ° C in the summer season, while in winter it reaches descend to values that are between 21-23 ° C, representing the extreme cases, where the most optimal temperatures occur in summer and spring throughout the study section. However, in the second scenario, combining the discharge of the ecological flow from the Cirat reservoir and the discharge of the Montanejos thermal spring; significant declines were obtained in the four seasons, where in the case of summer and winter, it decreases on average by more than 3 and 6 ° C respectively. Finally, the last scenario is similar to the second, with the difference that the decreases are lower in the four seasons, because the Cirat reservoir discharge is only 0.16 m³ / s, which is the difference to comply with the ecological flow in combination with the minimum discharge of the thermal spring

Palabras clave español (máximo 5): Hidrología, Manantiales kársticos, Montanejos, Mijares, TETIS.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Hidrologia, Deus càrstiques, Montanejos, Mijares, TETIS

Palabras clave inglés (máximo 5): Hydrology, Karstic springs, Montanejos, Mijares, TETIS

A Dios,

*A mi madre Teodosia y a mis hermanas Yovana y Dina,
por todo el apoyo brindado en todo momento a pesar de la distancia,*

*A mi difunto padre Teofilo Alarcón,
que desde el cielo me brinda luz y fuerzas para seguir adelante.*

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a Dr. Félix Francés García, por brindarme la confianza y guiarme durante todo el proceso de la investigación.

A los miembros del Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), por su acogida en el equipo y por compartirme sus conocimientos para el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA), por su dedicación y sencillez; fueron mi inspiración para seguir adelante y poder superarme durante mi estancia en la Universitat Politècnica de València.

Al PRONABEC del gobierno peruano, por brindarme la oportunidad de poder continuar mi formación profesional en esta área de conocimiento.

Al Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), por su colaboración para la culminación satisfactoria del presente Trabajo de Fin de Máster.

Finalmente, a mis compañeros y amigos del máster, por su motivación y apoyo incondicional.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.1. Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO 2. MODELOS UTILIZADOS.....	4
2.1. MODELO HIDROLÓGICO.....	5
2.2. MODELO HIDROLÓGICO TETIS	6
2.2.1. Estructura de parámetros del modelo.....	8
2.2.2. Condiciones iniciales de las variables de estado.....	10
2.2.3. Algoritmo de optimización SCE-UA para la calibración automática.....	10
2.3. FENÓMENOS KÁRSTICOS Y MANANTIALES	11
2.4. MODELO UNICELULAR.....	13
2.5. MODELO DE TEMPERATURA DE CORRIENTE.....	13
2.6. MODELO IBER (2D).....	15
2.6.1. Condiciones de contorno.....	15
2.6.2. Interfaz de preproceso y posproceso.....	15
CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	17
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	18
3.1.1. Sistema Hidrográfico del Alto Mijares	18
3.1.2. Tramo de Montanejos	20
3.1.3. Clima.....	21
3.1.4. Topografía.....	21
3.1.5. Edafología.....	23
3.1.6. Geología.....	25
3.1.7. Sistemas kársticos	29
3.1.8. Usos de suelo	30
3.2. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	32
3.2.1. Datos meteorológicos interpolados en Alto Mijares.....	32
3.2.2. Datos meteorológicos en tramo Montanejos.....	34
3.3. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.....	37
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	41
4.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA.....	42
4.1.1. Interpolación espacial de episodio de entrada	43
4.1.2. Estimación de evapotranspiración de referencia.....	45
4.1.3. Elaboración de mapa de parámetros	46
4.1.4. Calibración del modelo TETIS	63
4.1.5. Calibración del modelo unicelular y validación de TETIS.....	64
4.1.6. Simulación en Montanejos.....	65
4.2. MODELACIÓN DE TEMPERATURA DEL RÍO CON SSTEMP.....	66

4.2.1.	Variables meteorológicas.....	68
4.2.2.	Variables hidrológicas	69
4.2.3.	Variables geomorfológicas e hidráulicas del cauce	70
4.2.4.	Variables de sombra.....	72
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES		74
5.1.	ANÁLISIS DE SERIES METEOROLÓGICAS	75
5.1.1.	Precipitación	75
5.1.2.	Evapotranspiración de referencia.....	76
5.1.3.	Temperatura	78
5.2.	PARÁMETROS FÍSICOS DEL MODELO TETIS	79
5.2.1.	Mapas derivados de MED.....	79
5.2.2.	Factores de vegetación derivados de usos de suelo	80
5.2.3.	Mapas de parámetros edafológicos e hidrogeológicos	82
5.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO TETIS.....	85
5.4.	VALIDACIÓN TEMPORAL DEL MODELO TETIS	88
5.5.	VALIDACION ESPACIAL Y CALIBRACIÓN DEL MODELO UNICELULAR	90
5.6.	VALIDACIÓN ESPACIO - TEMPORAL DEL MODELO INTEGRADO	94
5.7.	CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS	97
5.8.	PREDICCIÓN DE LA DESCARGA DEL MANANTIAL TERMAL MONTANEJOS.....	98
5.9.	MODELO TÉRMICO DEL RÍO MIJARES EN EL TRAMO MONTANEJOS	101
5.9.1.	Características morfométricas e hidráulicas del cauce	101
5.9.2.	Calibración del modelo térmico.....	105
5.9.3.	Temperatura media sin la suelta de Embalse Cirat	106
5.9.4.	Temperatura media con descarga de Embalse Cirat	107
5.9.5.	Temperatura media con suelta de E. Cirat para una situación crítica.....	108
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		110
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		113

Lista de figuras

Figura 2.1. Esquema simplificado de clasificación de modelos hidrológicos	5
Figura 2.2. Esquema conceptual vertical del ciclo hidrológico para una celda en el modelo TETIS....	6
Figura 2.3. Movimiento horizontal y vertical de flujos en TETIS (Francés et al., 2014)	7
Figura 2.4. Descripción esquemática de un parámetro efectivo(Grayson and Blöschl, 2001)	8
Figura 2.5. Esquema simplificado de la ilustración de un sistema kárstico (https://goo.gl/images/J8i7P4)	12
Figura 2.6. Esquema de modelo unicelular (Sahuquillo et al., 2010)	13
Figura 2.7. Componentes de flujo de calor modelados en SSTEMP (Theurer, Voos, and Miller, 1984)	14
Figura 3.1. Mapa de ubicación del sistema hidrográfico del Alto Mijares	19
Figura 3.2. Principales manantiales en Alto Mijares (a) Fuente de Escaleruela y (b) Fuente de Babor	19
Figura 3.3. Mapa de localización del tramo de estudio y los puntos principales de estudio	20
Figura 3.4. Vista panorámica de la fuente de baños termales de Montanejos	20
Figura 3.5. Mapa topográfico del Alto Mijares clasificado en función a su altitud.....	22
Figura 3.6. Curva hipsométrica y polígono de frecuencia de altitudes de la cuenca del Alto Mijares	22
Figura 3.7. Información organizada de la base de datos del suelo europeo (The European Soil Database).....	23
Figura 3.8. Mapa de atributos de obstáculo de raíces (ROO) y textura superficial dominante (TEXT-SRF-DOM) derivados de ESDB	24
Figura 3.9. Mapa de atributos de capacidad de agua disponible en la parte superior del suelo (AWC-TOP) y capa impermeable en el perfil del suelo (IL) derivados de ESDB	25
Figura 3.10. Mapa de formación geológico regional del Alto Mijares	26
Figura 3.11. Mapa litológico de la cuenca del Alto Mijares.....	27
Figura 3.12. Mapas hidrogeológicos de Alto Mijares (a) Mapa de permeabilidad y (b) Mapa de masas de agua subterránea.....	28
Figura 3.13. Mapa de karst a escala 1M en la cuenca del Alto Mijares.....	29
Figura 3.14. Mapa de distribución espacial de usos de suelo en Alto Mijares (a) CLC versión 1990 y (b) CLC versión 2000	31
Figura 3.15. Comparación de usos de suelo de CLC 1990 y 2000 en Alto Mijares	31
Figura 3.16. Distribución espacial de Spain02 (V2) y estaciones hidrométricas en Alto Mijares.....	32
Figura 3.17. Precipitación media mensual de la serie Spain02 (v2), periodo (1991-2008).....	33
Figura 3.18. Temperatura media mensual de la serieSpain02 (v2), periodo (1991-2008).....	34
Figura 3.19. Temperatura media diaria mensual del aire en el tramo Montanejos	35

Figura 3.20. Humedad relativa media diaria para el tramo Montanejos	35
Figura 3.21. Radiación solar extraterrestre para el tramo Montanejos	36
Figura 3.22. Porcentaje de horas de sol en el tramo Montanejos.....	36
Figura 3.23. Velocidad de viento para el tramo Montanejos	37
Figura 3.24. Comparación de la serie de aforo a la entrada del embalse Arenós/C.E. Los Cantos (ROEA 8134) frente a la serie de caudales de entrada al embalse.....	38
Figura 3.25. Serie de aportaciones media anual (a) y media mensual(b), en la estación Terde ROEA 8030	39
Figura 3.26. Serie de aportaciones media anual (a) y media mensual(b), en la estación a la entrada del embalse Arenós (ROEA 8134)	40
Figura 4.1. Esquema de la metodología de modelación hidrológica distribuida	43
Figura 4.2. Modelo de elevación digital de la cuenca del Alto Mijares.....	47
Figura 4.3. Codificación de dirección del flujo según ESRI	48
Figura 4.4. Distribución espacial de cobertura del suelo de acuerdo al mapa de CLC 2000.....	49
Figura 4.5. Distribución porcentual, según cobertura del suelo CLC 2000 en la cuenca del Alto Mijares	50
Figura 4.6. Rangos típicos esperados de factor de vegetación durante crecimiento (Allen et al. 2006)	50
Figura 4.7. Mapa de intercepción máxima según cobertura de suelo en la cuenca del Alto Mijares ..	55
Figura 4.8. Mapas utilizados para estimar el almacenamiento superficial(a) almacenamiento en charco y (b) en depresión por pendiente del terreno.....	56
Figura 4.9. Mapas utilizados para estimar el almacenamiento estático: (a) Mapa de profundidad del suelo hasta alcanzar obstáculo, (b) Mapa de contenido de agua disponible, (c) Mapa de profundidad de raíces sin obstáculos y (d) Mapa de almacenamiento superficial	58
Figura 4.10. Mapa de textura superficial dominante derivado de ESDB.....	59
Figura 4.11. Mapa de permeabilidad y litoestratigrafía de la cuenca del Alto Mijares (IGME)	60
Figura 4.12. Localización de las zonas kársticas en la cuenca del Alto Mijares	62
Figura 4.13. A la izquierda se observa el río Montán en la confluencia con el río Mijares y a la derecha el flujo base en el tramo intermedio.....	65
Figura 4.14. Vista panorámica a la salida del río Maimona en confluencia con el río Mijares.....	66
Figura 4.15. Interfaz de trabajo del modelo de temperatura SSTEMP	67
Figura 4.16. Medición de temperatura del manantial termal Montanejos in situ	68
Figura 4.17. Vista fotográfica de aforo del río Mijares en el tramo final de Montanejos.....	70
Figura 4.18. Modelo digital del terreno del tramo Montanejos	71
Figura 4.19. Malla de cálculo formado por una red Irregular de Triángulos Rectángulos (RTIN)	71
Figura 4.20. Usos del suelo del tramo de estudio para asignación de coeficiente Manning.....	72

Figura 5.1. Tendencia de la precipitación anual con la altitud (a) Sin corrección (b) con corrección por factor orográfico.....	75
Figura 5.2. Mapa precipitación media anual sin corregir por el factor orográfico	76
Figura 5.3. Mapa de precipitación media anual después de corregir con el factor orográfico	76
Figura 5.4. Mapa de evapotranspiración de referencia media anual en la cuenca Alto Mijares para el periodo 1991-2008	77
Figura 5.5. Evapotranspiración de referencia mensual para la cuenca del Alto Mijares	78
Figura 5.6. Mapa de temperatura media anual en la cuenca del Alto Mijares.....	78
Figura 5.7. Parámetros derivados de MED para la cuenca Alto Mijares: (a) Mapa de direcciones de flujo, (b) Mapa de celdas drenantes acumuladas, (c) Mapa de pendiente y (d) Mapa de velocidad de flujo en la ladera.....	80
Figura 5.8. Factor de vegetación mensual según el tipo de cobertura del suelo en la cuenca del Alto Mijares	81
Figura 5.9. Mapa de almacenamiento estático (Hu) para la cuenca del Alto Mijares	82
Figura 5.10. Mapa de capacidad de infiltración(Ks) para la cuenca del Alto Mijares.....	83
Figura 5.11. Mapa de capacidad de percolación (Kp) para la cuenca del Alto Mijares	84
Figura 5.12. Mapa de capacidad de percolación modificado (Kp_Karst), según el mapa de zonas kársticas en la cuenca del Alto Mijares.....	84
Figura 5.13. Hidrograma resultante de la calibración automática para el periodo comprendido entre 2000 y 2004, en la estación Terde (ROEA 8030)	85
Figura 5.14. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero subterráneo en la estación Terde en el periodo (2000-2004)	87
Figura 5.15. Hidrograma resultante de la validación temporal en el periodo de 1994 – 20008, en la estación Terde (ROEA 8030).....	88
Figura 5.16. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero subterráneo en la estación Terde para el periodo (1994-2008)	89
Figura 5.17. Hidrograma de descarga de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo en el periodo (2000-2004)	91
Figura 5.18. Hidrograma resultante de la validación espacial para el periodo (2000-2004) correspondiente a la estación del embalse Arenós (ROEA 8134).	92
Figura 5.19. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero en la estación del embalse Arenós para el periodo (2000-2004)	93
Figura 5.20. Hidrograma de descarga de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo en el periodo (1994-2008)	94
Figura 5.21. Hidrograma resultante de la validación espacio-temporal para el periodo de 1994-2008, en la estación Arenós (ROEA 8134).....	95
Figura 5.22. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero en el periodo (1994-2008).....	96

Figura 5.23. Curva de duración de caudales para el periodo (2000-2004), correspondiente.....	97
Figura 5.24. Curva de duración de caudales para el periodo (1994-2008), correspondiente.....	98
Figura 5.25. Hidrograma resultante de la cuenca intermedia entre el embalse Arenós y Alquería para el periodo (10/1986-09/2006)	99
Figura 5.26. Hidrograma de descarga del manantial termal Montanejos para el periodo (10/1986-09/2006).....	99
Figura 5.27. Hidrograma de descarga media diaria mensual del manantial termal Montanejos	100
Figura 5.28. Curva de duración de caudales de la descarga del manantial termal Montanejos.....	101
Figura 5.29. Ubicación de los perfiles transversales en el tramo de estudio	101
Figura 5.30. Secciones transversales del cauce en el tramo de estudio	103
Figura 5.31. Relación de caudal y ancho mojado promedio, obtenido de la modelación hidráulica para cada segmento del tramo de estudio.	104
Figura 5.32. Temperatura media observada y simulada del río Mijares al final de cada segmento del tramo de estudio, correspondiente al mes de mayo del 2018.....	105
Figura 5.33. Correlación entre la temperatura media observada y simulada.....	106
Figura 5.34. Evolución de la temperatura media del río Mijares en el tramo Montanejos, sin suelta del embalse Cirat	107
Figura 5.35. Evolución de la temperatura media del río Mijares en el tramo Montanejos con descarga de caudal ecológico desde el embalse Cirat.....	107
Figura 5.36. Evolución de la temperatura media del río Mijares en el tramo Montanejos para una descarga desde embalse Cirat de $Q=0.16\text{m}^3/\text{s}$	108

Lista de tablas

Tabla 2.1. Parámetros y factores correctores del modelo TETIS.....	9
Tabla 3.1. Estaciones foronómicas utilizados en la implementación del modelo hidrológico en la cuenca del Alto Mijares (CEDEX)	38
Tabla 4.1. Valores de radiación extraterrestre en(MJ/m ² /día)para Alto Mijares (Allen et al., 2006) .46	
Tabla 4.2. Información cartográfica utilizada para la estimación de parámetros.....	46
Tabla 4.3. Duración de las etapas y factor de vegetación para los cultivos trigo, cebada y girasol.....	51
Tabla 4.4. Duración de las etapas y factor de vegetación para cultivos de patata, cebolla, coles y legumbres.....	52
Tabla 4.5. Duración de las etapas y factor de vegetación para cultivos de almendro, cerezos y otras drupas.....	52
Tabla 4.6. Duración de las etapas y factor de vegetación para cultivos de alfalfa y pastos	53
Tabla 4.7. Valores mensuales de factor de vegetación para caducifolios	53
Tabla 4.8. Valores mensuales de factor de vegetación para bosques coníferas	53
Tabla 4.9. Valores mensuales de factor de vegetación para bosque esclerófilo	54
Tabla 4.10. Valores mensuales del factor de vegetación para pastizales naturales.....	54
Tabla 4.11. Valores de interceptación, almacenamiento en cubierta y profundidad de raíces para los diferentes usos del suelo en la cuenca del Alto Mijares.....	57
Tabla 4.12. Clasificación cualitativa y cuantitativa de la textura superficial dominante	59
Tabla 4.13. Valores adoptados de parámetros geomorfológicos	63
Tabla 4.14. Resumen de datos meteorológicos para el tramo de estudio.....	69
Tabla 4.15. Datos hidrológicos y térmicos del manantial Montanejos y embalse Cirat	70
Tabla 4.16. Parámetros para estimar sombra por efecto de la vegetación y topografía del terreno al lado oeste del cauce	73
Tabla 4.17. Parámetros para estimar la sombra por efecto de vegetación y topografía del terreno, al lado este del cauce	73
Tabla 5.1. Valores de factor de vegetación según tipo de cobertura del suelo de CLC del año 2000. 81	
Tabla 5.2. Parámetros estadísticos de evaluación de la calibración del modelo	86
Tabla 5.3. Factores correctores óptimos del modelo TETIS para la cuenca	86
Tabla 5.4. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el	87
Tabla 5.5. Criterios de evaluación del modelo en validación temporal	89
Tabla 5.6. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el periodo de	90
Tabla 5.7. Criterios de evaluación en validación espacial en la estación.....	92
Tabla 5.8. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el periodo de	93
Tabla 5.9. Criterios de evaluación en validación espacio-temporal en la	95

Tabla 5.10. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el periodo	96
Tabla 5.11. Resumen de características geométricas e hidráulicas del río Mijares en el tramo Montanejos.....	105



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

La ocupación continua en los últimos años de áreas propensas a la escasez de agua como la región mediterránea se debe principalmente a la existencia de un suministro confiable de agua de manantial derivado de principalmente de reservorios naturales de formación kárstica (Nikolaidis, 2011). Los karst derivan de la disolución de las formaciones de piedra caliza y dolomita y están compuestos por un sistema fracturado de alta transmisividad de sumideros, cuevas y manantiales (N. P. Nikolaidis, Bouraoui, and Bidoglio, 2013). Estos grandes depósitos naturales subterráneos son muy importantes en la gestión de los recursos hídricos de la región mediterránea porque regulan la descarga de agua de las fuentes kársticas durante todo el año (Moraetis et al., 2010). Como consecuencia, los acuíferos y manantiales kársticos son una fuente importante de suministro de agua para los países mediterráneos y se requieren estrategias especiales para gestionar la cantidad y calidad de sus aguas (Malagò et al., 2016).

Los sistemas de pronóstico hidrológico suelen ser extremadamente complejos y difíciles de cuantificar debido a que hay fenómenos en la naturaleza muy complejos de entender en su totalidad. Sin embargo, pueden representarse de forma simplificada por medio de modelos conceptuales que tratan de dar respuesta a cada una de las partes del sistema hidrológico (Chow, Maidment, and Mays, 1994).

En este contexto, los modelos hidrológicos distribuidos se aproximan mucho más a la realidad al considerar que la escorrentía es una respuesta hidrológica continua en el espacio y en el tiempo, que afecta de distinta manera a toda la superficie de la cuenca.

La cuenca del Alto Mijares, específicamente la localidad de Montanejos, se caracteriza por su atractivo turístico debido a la presencia de manantiales termales, y forma parte de una de las actividades principales de desarrollo económico de la población. Esto debido a sus propiedades minero medicinales declaradas según la Real Orden del 13 de octubre del año 1863; y que gracias a ello atrae gran cantidad de visitantes a lo largo del año. Es así, que con el presente trabajo se pretende determinar la descarga del manantial termal Montanejos; y verificar el aseguramiento del caudal ecológico en el tramo comprendido entre el embalse Cirat y puente de Hierro; según lo establecido en el Plan Hidrológico del Júcar (PHJ), aprobado por el Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, donde se establece un caudal ecológico de $0.4\text{m}^3/\text{s}$ para el tramo comprendido entre el embalse Arenós y Azud Huertacha, el cual es regulado a partir del embalse Cirat, generando impactos negativos en la temperatura de sus fuentes termales a lo

largo del tramo de estudio. Para ello, se implementa un modelo hidrológico distribuido, para predecir los diferentes procesos hidrológicos, teniendo especial atención de las descargas en los manantiales kársticos, determinados mediante un modelo unicelular. Finalmente, se realiza modelación de la temperatura del río Mijares en el tramo Montanejos, mediante un modelo térmico unidimensional de base física, para una condición en tiempo seco. La modelación se analiza para diferentes escenarios, con y sin el aporte del caudal ecológico establecido; con la finalidad de simular el efecto de las descargas en el comportamiento dinámico de la temperatura media del río en el tramo de estudio.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar la descarga del Manantial termal Montanejos, mediante una modelación hidrológica continua, para luego evaluar el aseguramiento del caudal ecológico del río Mijares en el tramo Montanejos de acuerdo al Plan Hidrológico de Júcar, y minimizar el impacto térmico en las zonas de baño de este municipio.

1.2.1. Objetivos Específicos

Por otro lado, se plantea los siguientes objetivos específicos para cumplir con el trabajo final de máster:

- i. Elaborar mapa de los parámetros físicos y geomorfológicos, para la implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS, teniendo en consideración los fenómenos kársticos en la zona de estudio.
- ii. Calibración y validación del modelo TETIS, basado en datos interpolados del proyecto Spain02 (v2) y aforos hidrométricos de ROEA, mediante la calibración automática de factores correctores del modelo con el algoritmo SCE-UA.
- iii. Determinar mediante una calibración automática el coeficiente de descarga y condición inicial del acuífero kárstico en la cuenca del Alto Mijares, para desagregar el flujo subterráneo de los manantiales por medio del modelo unicelular.
- iv. Implementar un modelo de temperatura, capaz de reproducir la variación a nivel espacial y temporal de la dinámica de la temperatura del río Mijares en el tramo Montanejos para diferentes escenarios.



CAPÍTULO 2. MODELOS UTILIZADOS

2.1. MODELO HIDROLÓGICO

Los modelos hidrológicos representan una realidad simplificada, bajo una forma física o matemática de un sistema complejo en el cual las respuestas producidas por una serie de solicitaciones externas son difícilmente previsibles a causa del gran número de factores que entran en juego (Llamas, 1993).

Los modelos en cualquier ámbito de la ciencia se clasifican según diferentes criterios: Según las ecuaciones utilizadas, pueden ser modelos probabilísticos y determinísticos. Los primeros se basan en las leyes de azar o probabilidad y son de tipo estadístico y estocástico. Los estadísticos tratan con datos observados, mientras que los estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales. En los modelos determinísticos las variables vienen establecidas por leyes físicas consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad (Ramírez, 2012).

La segunda clasificación es según la formulación y representación espacial. La clasificación se subdivide en modelos agregados, donde se representan el área de estudio como una unidad de sistema hidrológico, considerando un único valor para todos los parámetros del modelo. Mientras en un modelo distribuido la zona de estudio está dividida en celdas, cada una de ellas con su propio conjunto de parámetros y sus propias variables de estado; cada celda recibe un flujo de materia y energía de algunas de sus celdas vecinas que a su vez reemite a otras (Alonso and Palazón, 2008). En la Figura 2.1, se esquematiza la clasificación descrita.

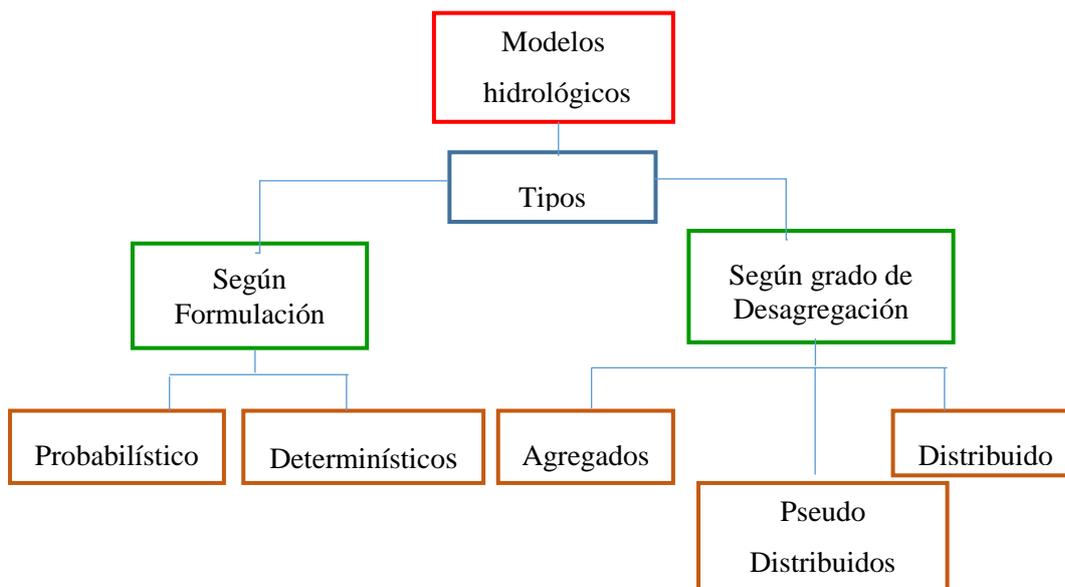


Figura 2.1. Esquema simplificado de clasificación de modelos hidrológicos

2.2. MODELO HIDROLÓGICO TETIS

TETIS es un modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual con parámetros físicamente basados, que simulan los principales procesos del ciclo hidrológico en la cuenca (Francés et al., 2014; Ramos, 2013; Vélez, 2003). La producción de escorrentía se modela utilizando siete tanques conectados en cada celda, describiendo las interacciones atmósfera, vegetación, suelo y acuífero (Figura 2.2). En el presente estudio no se activó el módulo de tanque de nieve, ya que tiene poca incidencia la fusión de nieve en el hidrograma simulado de modelo.

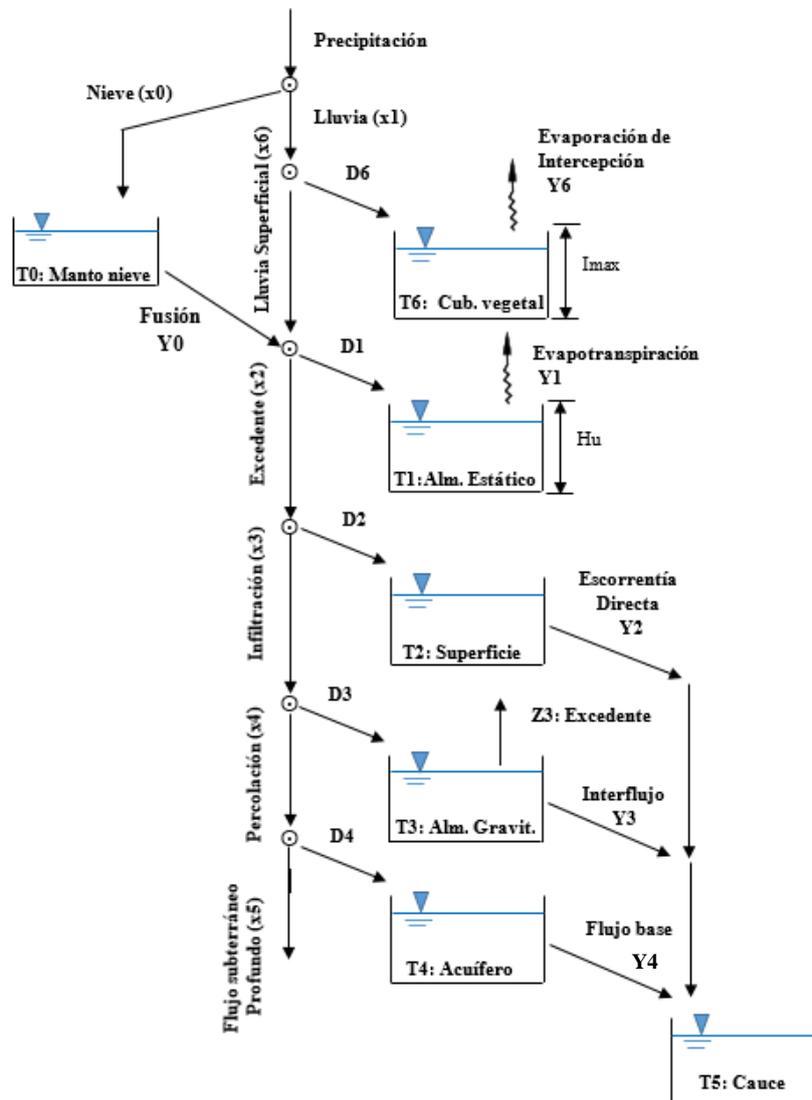


Figura 2.2. Esquema conceptual vertical del ciclo hidrológico para una celda en el modelo TETIS

Los flujos verticales de agua entre cada tanque representan los siguientes procesos hidrológicos: Precipitación (lluvia o nieve), evaporación directa de la cobertura vegetal (Y_6), precipitación efectiva o lluvia superficial (X_6), evapotranspiración potencial (Y_1), infiltración

gravitacional (X_3), percolación (X_4) y pérdidas subterráneas profundas (X_5), mientras que los flujos horizontales representan los procesos hidrológicos de escorrentía directa (Y_2), interflujo (Y_3) y flujo base (Y_4).

El movimiento horizontal del flujo ocurre separado en dos fases. En la primera fase, la escorrentía directa, interflujo y flujo base, que están definidos por celdas de tanques de tres capas, conectados entre sí, como se puede observar en la (Figura 2.3). Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el MED, hasta alcanzar la red de drenaje constituida por cárcavas y cauces.

La longitud de interconexión máxima para cada tanque es definida por el usuario, teniendo en cuenta que para la escorrentía y el interflujo esta longitud está asociado al tamaño de las laderas. Para el flujo base esta longitud se estima teniendo en cuenta el punto inicial del flujo permanente en el cauce (Vélez, 2003).

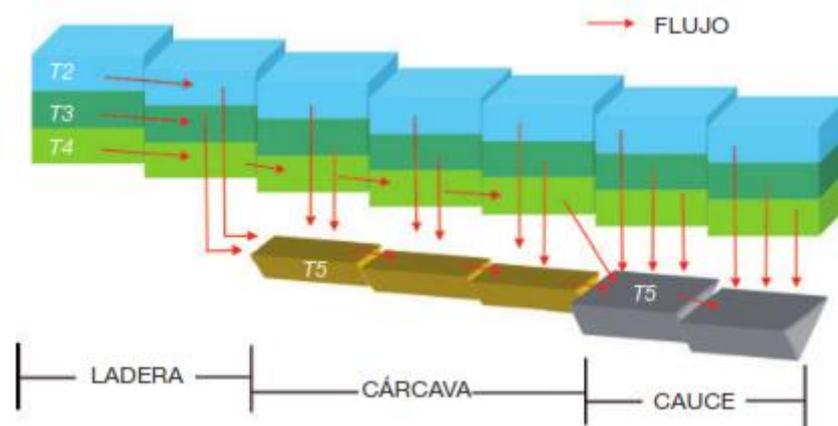


Figura 2.3. Movimiento horizontal y vertical de flujos en TETIS (Francés et al., 2014)

Para representar la traslación de flujo en el cauce, el modelo Tetis emplea la ecuación de “onda cinemática”, que es una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant, al despreciar los términos correspondientes a los efectos inerciales y de presión en la ecuación de conservación de energía. Para esto (Vélez, 2003) propone una metodología denominada Onda Cinemática Geomorfológica (OCG), donde la forma de la sección de flujo en cada uno de los elementos que conforman la red de drenaje puede obtenerse a partir de relaciones geométricas hidráulicas previa validación de sus parámetros propuestas por Leopold and Maddock (1953). A partir de mediciones de campo de secciones transversales del cauce, se puede estimar los coeficientes y exponentes de las ecuaciones, mediante regresiones lineales. En caso de no disponer de un

estudio geomorfológico en las distintas regiones homogéneas, se recomienda utilizar los valores medios recomendados en la literatura (Francés et al. 2014).

2.2.1. Estructura de parámetros del modelo

Los parámetros de un modelo describen las características del sistema a modelar, dependiendo de la estructura y conceptualización del modelo. Dado que el modelo se basa en una malla regular de celdas de un Modelo de Elevación Digital (MED), es necesario caracterizar cada celda con un valor de parámetro homogéneo.

La hipótesis más sencilla es asumir que un valor medido en un punto cualquiera al interior de la celda es válido para toda la superficie. Cuando en realidad un área del tamaño de la celda se comporta de manera muy distinta a un punto, por ejemplo, en el caso de un parámetro de conductividad del suelo, la medición de laboratorio se efectúa sobre un bloque de suelo del tamaño de algunos centímetros, y el valor obtenido no suele ser representativo para toda la celda (Grayson and Blöschl, 2001).

Otra forma es ajustar el parámetro para que los resultados del modelo se acerquen a los valores observados de la variable output, por tanto, el parámetro pierde su significado físico, y representa algo similar a un valor medio en la celda y que se denomina como parámetro efectivo (Figura 2.4). El enfoque del parámetro efectivo intenta superar los problemas conceptuales asociados al valor puntual de un parámetro. Los parámetros efectivos son valores que reproducen el comportamiento de un área finita o de un volumen finito. Por lo que no pueden ser medidos puntualmente y no necesitan estar relacionados con mediciones puntuales (Bussi, 2013).

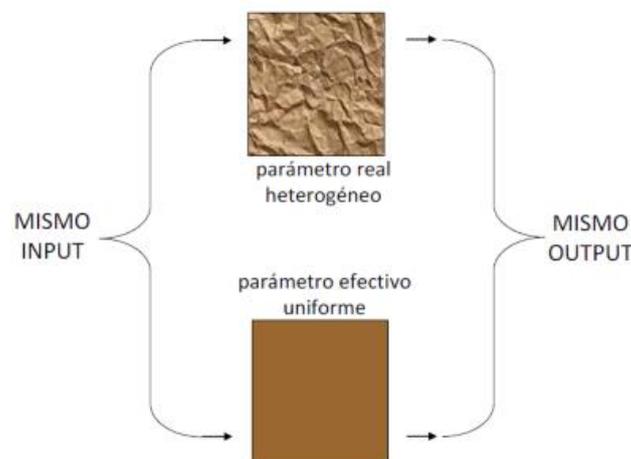


Figura 2.4. Descripción esquemática de un parámetro efectivo (Grayson and Blöschl, 2001)

El modelo TETIS divide en dos aproximaciones la estimación de los parámetros en cada celda (Francés et al., 2014; Vélez, 2003). En una primera aproximación se estiman los parámetros principales con base en información de las características físicas del medio natural y a una escala espacial definida. La segunda etapa hace uso de unos factores correctores a nivel global para estimar todos los parámetros. Los factores correctores permiten corregir el error de datos de entrada y salida, error del modelo, cantidad y calidad de los datos. La ecuación que describe la estructura separada del parámetro efectivo es la siguiente:

$$\theta_{i,j}^* = R_i \theta_{i,j} ; j = 1, \dots, n ; i = 1, \dots, p \quad (2.1)$$

Donde $\theta_{i,j}^*$ es el parámetro efectivo i -énimo para la celda j , R_i es el factor corrector del parámetro i , común para todas las celdas, $\theta_{i,j}$ es el parámetro estimado para la celda j , n es el número total de celdas y p es el número total de parámetros por celda.

La ventaja principal de esta estructura del parámetro, es que en la etapa de calibración, se reduce notablemente el número de variables que deben ser calibradas, siendo solo necesario calibrar los p factores correctores, en vez de $n \cdot p$ valores (número de parámetros por número de celdas).

Los parámetros en cada celda del modelo TETIS se muestran en la (Tabla 2.1):

Tabla 2.1. Parámetros y factores correctores del modelo TETIS

Parámetro	FC	Expresión
Almacenamiento estático del suelo	FC ₁	$H_u^* = FC_1 \cdot H_u$
Factor de vegetación	FC ₂	$\lambda_v^*(t) = FC_2 \cdot \lambda_v(t)$
Capacidad de infiltración	FC ₃	$k_s^* = FC_3 \cdot k_s$
Velocidad de ladera	FC ₄	$v_t^* = FC_4 \cdot v_t$
Capacidad de percolación	FC ₅	$k_p^* = FC_5 \cdot k_p$
Conductividad hidráulica del interflujo	FC ₆	$k_{ss}^* = FC_6 \cdot k_{ss}$
Capacidad de flujo subterráneo profundo	FC ₇	$k_{ps}^* = FC_7 \cdot k_{ps}$
Conductividad hidráulica de flujo base	FC ₈	$k_{sa}^* = FC_8 \cdot k_{sa}$
Velocidad de flujo en cauce	FC ₉	$v(t)^* = FC_9 \cdot v(t)$

2.2.2. Condiciones iniciales de las variables de estado

Los almacenamientos del suelo o las variables de estado al inicio del proceso de simulación son las que presentan gran incertidumbre. Por lo tanto, al inicio de un episodio de precipitación se debe definir el estado inicial de los almacenamientos en el suelo, ya sea mediante la experiencia del hidrólogo o utilizando información de campo (Vélez, 2003).

En el modelo TETIS, son seis los almacenamientos que tienen relevancia dentro de los variables de estado en la cuenca. Los almacenamientos se muestran en la (Figura 2.2) y son los siguientes:

- i. La cantidad inicial de manto de nieve, H_0 en (mm)
- ii. El almacenamiento estático al inicio del episodio, H_1 . Está dado como un porcentaje de la capacidad de almacenamiento máximo, % H_u .
- iii. El agua en superficie al inicio del episodio, y que es susceptible de convertirse en escorrentía directa, H_2 , está dado en (mm).
- iv. El estado de humedad del suelo superior al comienzo del evento, H_3 dado en (mm).
- v. El estado inicial del acuífero, H_4 dado también en (mm).
- vi. El sexto almacenamiento corresponde a la red de drenaje o al estado en que se encuentran los cauces al inicio del episodio. El valor del estado inicial esta dado como un porcentaje del volumen de agua cuando se tiene caudal a sección llena, H_5 dado en (%).

El modelo considera las condiciones iniciales las mismas en todas las celdas de una misma región geomorfológica, excepto el tanque de nieve. Sin embargo, con el periodo de calentamiento, permite generar diferentes valores iniciales de las variables de estado en cada celda.

2.2.3. Algoritmo de optimización SCE-UA para la calibración automática

El método de optimización global conocido como SCE-UA “Shuffled Complex Evolution-University of Arizona” (Duan, Gupta, and Sorooshian, 1992; Duan, Sorooshian, and Gupta, 1994), es un algoritmo con una técnica de optimización efectiva y eficiente para calibrar modelos conceptuales de lluvia – escorrentía.

En el modelo distribuido TETIS se integra el método de optimización automática SCE-UA para obtener el conjunto de factores de corrección óptimos del modelo, sin perder la variabilidad espacial de las características hidrológicas (Francés, Vélez, and Vélez, 2007).

El método SCE-UA busca el conjunto óptimo de parámetros que minimicen una función objetivo, para luego comparar con la variable observada frente a la simulada por el modelo, usualmente el caudal de salida. La función objetivo se selecciona con algún criterio estadístico en función de las características que se quieran preservar en la serie simulada (Ramírez, 2012).

Alguna de las funciones objetivos disponibles en el modelo TETIS para la calibración automática de los parámetros y para la validación del modelo son: Error en volumen (VE), error cuadrático medio (RMSE) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE):

$$VE = \frac{V_o - V_p}{V_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

Donde V_p es el volumen total simulado y V_o el volumen total observado. Valores positivos indican infraestimación y valores negativos sobreestimación, siendo cero el valor deseado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{t,obs} - Q_{t,sim})^2}{n}} \quad (2.3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{t,sim} - Q_{t,obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{t,obs} - \bar{Q})^2} \quad (2.4)$$

Siendo n el periodo de duración de la calibración, $Q_{t,obs}$ y $Q_{t,sim}$ son las descargas observadas y simuladas en el intervalo t , respectivamente, \bar{Q} es el valor medio de la descarga observada.

Para más información acerca de la aplicación del algoritmo SCE-UA se puede consultar en (Francés et al., 2014; Vélez, 2003).

2.3. FENÓMENOS KÁRSTICOS Y MANANTIALES

El karst está identificado por un paisaje y una geología específica, formado por la acción de disolución del agua en las rocas de carbonatos solubles, como principalmente la piedra caliza, pero también el mármol, la dolomita y el yeso (Malagò et al., 2016). Como consecuencia, el

ciclo hidrológico proporciona la principal fuente de energía para la formación del karst porque el agua es el disolvente de las rocas carbonatadas por medio de los iones en su composición.

El proceso de disolución (karstificación) conduce a la formación de cuevas, sumideros, manantiales que son características típicas de un sistema kárstico. Con la karstificación progresiva, el flujo de agua subterránea en el acuífero kárstico se forma a partir de un flujo de una red de fisuras interconectadas a un flujo concentrado como en varias tuberías grandes, cavidades interconectadas y sistema de cuevas (Figura 2.5).

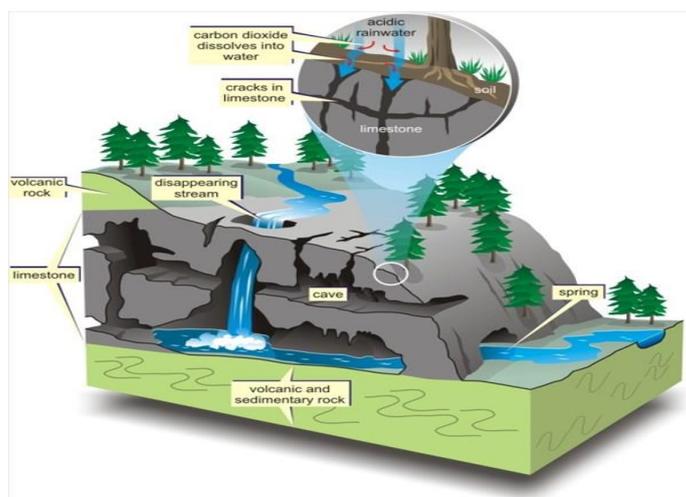


Figura 2.5. Esquema simplificado de la ilustración de un sistema kárstico (<https://goo.gl/images/J8i7P4>)

El extremo aguas abajo de un sistema kárstico suele ser un manantial donde el conducto subterráneo llega a la superficie como un punto de salida de una extensión de red de conductos subterráneos.

La modelación de la respuesta de los acuíferos kársticos y su capacidad de almacenamiento se ha vuelto entonces muy importante en la hidrología, debido a la creciente demanda hídrica. Este problema se puede afrontar con una mejor modelación de los procesos de transformación lluvia – escorrentía.

En este trabajo no se hace uso del módulo karst del modelo TETIS, ya que en el trabajo anterior de (Gaona, 2015) no se logró obtener resultados satisfactorios, debido a que los manantiales no se encuentran en el límite de las zonas kársticas, por lo que se optó por un método de enrutamiento del flujo vertical al acuífero profundo, en las zonas identificadas como karst, mediante el acondicionamiento de su conductividad hidráulica en el acuífero profundo, para finalmente estimar la descarga de estos manantiales kársticos por medio del modelo unicelular.

2.4. MODELO UNICELULAR

Para simular la descarga de los acuíferos kársticos en los manantiales, se ha utilizado un modelo de tipo unicelular simplificado (Sahuquillo et al., 2010), que consiste en una celda que tiene un volumen de agua V almacenado y una recarga R obtenido de flujo subterráneo profundo del modelo Tetis, que finalmente descarga en un manantial o río un caudal Q como se esquematiza en la Figura 2.6.

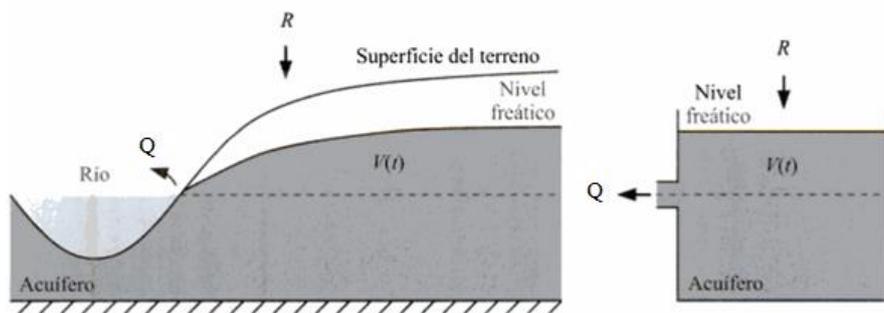


Figura 2.6. Esquema de modelo unicelular (Sahuquillo et al., 2010)

El caudal y el volumen se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$Q = \alpha V \quad (2.5)$$

Luego reemplazando en la ecuación de balance de masa la ecuación (2.5) y considerando R como caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo t se obtiene:

$$V_n = V_{n-1}e^{-\alpha t} + \frac{R_n}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.6)$$

Donde V_n representa el volumen almacenado al final del día n por encima del nivel de descarga al río; R_n es la recarga recibida por el acuífero durante ese día y α es el coeficiente de descarga con dimensiones de la inversa del tiempo.

La ventaja del modelo es que solo tiene un parámetro (alfa), que fue calibrado a partir de datos de aforo en la estación Arenós, ya que los manantiales que afloran aguas abajo de la estación Terde llegan a descargar al río Mijares, para luego ser registrados en la estación Arenós. El modelo unicelular fue validado temporalmente para el periodo (1994-2008).

2.5. MODELO DE TEMPERATURA DE CORRIENTE

La predicción de la temperatura del agua ha adquirido gran interés en los últimos años debido a la amenaza de cambio global, y un análisis más dinámico y determinístico de la transferencia

de calor en los ríos que parte del análisis tradicional de equilibrio de las fuentes de calor para predecir los efectos de las actividades antropogénicas, variación de caudal, flujo de agua subterránea y ubicación a lo largo de la corriente (Sinokrot and Stefan 1993; Stella, 2013). La temperatura de los ríos sigue dos ciclos: uno estacional y otro diario. A escala estacional, la temperatura del agua depende de la temperatura del aire. Además, la variación diaria de las temperaturas de los ríos está directamente relacionada con las variables de radiación solar y temperatura de ambiente (Sinokrot and Stefan 1993). Para representar el intercambio de calor entre la atmósfera y el río los parámetros tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, la nubosidad y la velocidad del viento, son indispensables para implementar un modelo de suministro de calor (Edinger, Geyer, and Duttweiler, 1968). En la actualidad existen varios modelos para predecir las temperaturas de las corrientes, algunos están basados en la estadística con parámetros de temperatura promedio de aire, y otros modelos dinámicos con base física que requieren grandes cantidades de datos de entrada para su calibración (Stella, 2013).

En este trabajo se utilizó el modelo Stream Segment Temperature (SSTEMP). Es un modelo con base física y unidimensional; que calcula la temperatura media y máxima del corriente de agua, basándose en flujos de calor externo y transporte de calor interno (Figura 2.7). Los procesos físicos incluidos en SSTEMP son la convección, conducción, evaporación, radiación de onda larga y corta, etc. (Bartholow, 2010).

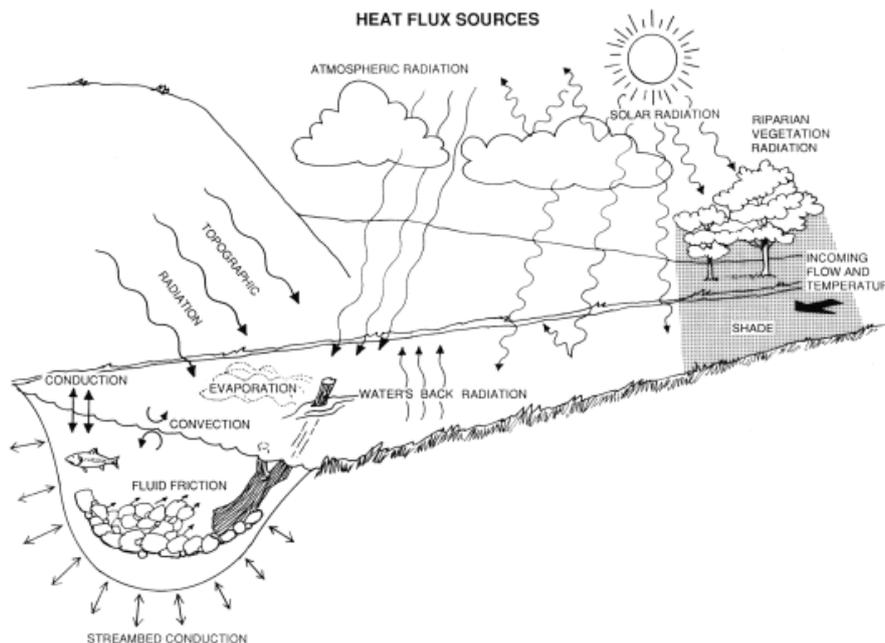


Figura 2.7. Componentes de flujo de calor modelados en SSTEMP (Theurer, Voos, and Miller, 1984)

2.6. MODELO IBER (2D)

Para determinar el ancho medio del cauce en función del caudal se ha utilizado el modelo Iber (Bladé et al., 2014) que es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujo en ríos y estuarios desarrollados por GEAMA (Universidad de A Coruña) y el Instituto Flumen (UPC-CIMNE). El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. En su primera versión incorpora un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencias y un módulo de transporte de sedimentos. Algunos de los campos de aplicación de la versión actual de Iber son: simulación de flujo en lámina libre en cauces naturales, evaluación de zonas inundables y estabilidad de los sedimentos del lecho.

Iber es un modelo de uso libre que se puede descargar de la página web www.iberaula.es, donde se ofrece además un manual de referencia hidráulico y manual de usuario.

2.6.1. Condiciones de contorno

El modelo Iber distingue entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por los cuales entra y sale el agua del dominio del cálculo. En los contornos cerrados se puede imponer una condición de deslizamiento libre o una condición de fricción de pared. Y con respecto a las condiciones abiertos se consideran diferentes alternativas en función del régimen hidráulico en el contorno. En los contornos de entrada se fija el caudal de agua y se asume que la dirección de flujo es perpendicular al contorno. En caso de que el flujo entre en régimen supercrítico, se impone adicionalmente el calado. La distribución del caudal unitario a lo largo del contorno se realiza de forma proporcional al calado en cada punto del mismo según la expresión $q_n = C \cdot h^{5/3}$, donde C es una constante que asegura que la integral del caudal unitario q_n a lo largo del contorno considerado sea igual al caudal total de entrada.

En los contornos de salida se impone el nivel de la lámina de agua en caso de que se produzca un régimen subcrítico. Sin embargo, si el régimen es supercrítico no es necesario imponer ninguna condición (Bladé et al., 2014).

2.6.2. Interfaz de preproceso y posproceso

La interfaz de la modelación bidimensional es de gran importancia debido a la cantidad y la variedad de datos que se requieren en la simulación numérica.



Uno de los procesos que requiere mayor tiempo y esfuerzo a la hora de desarrollar la simulación numérica del flujo en ríos es la generación de la malla de cálculo. Por ello, Iber incorpora las capacidades estándar de mallado GiD, como la creación de mallas estructurados y no estructurados, de triángulos y de cuadriláteros, mediante el uso de diversos algoritmos de mallado. Para topografías que presentan irregularidades o complejidades se implementó la metodología de creación de geometrías en formato RTIN (Regular Triangular Irregular Network). Las topografías resultantes permiten obtener mallas de gran calidad y robustez.



CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Sistema Hidrográfico del Alto Mijares

La cuenca del Alto Mijares se extiende íntegramente dentro de la provincia de Teruel. Está delimitada por dos grandes estructuras en domo, las sierras de Gúdar por el Norte y Javalambre al Sur. El área de la cuenca drenante es de 1682.33 km² hasta el punto de control de Alquería. Presenta una altitud media de 1238 msnm, y conforma el extremo Oeste de la cuenca total de Mijares (Figura 3.1). La cuenca del Alto Mijares constituye una de las tres cuencas principales del Sistema Hidrográfico del Júcar, y desemboca en el Mar Mediterráneo como las demás subcuencas.

Los cañones del Mijares conforman el tramo medio donde el río da lugar a una sucesión de encajamientos en los materiales calizos de las estribaciones de la Sierra de Gúdar y la Sierra del Espadán, perdiendo altitud rápidamente. El gradiente topográfico de aproximadamente de 200 metros a lo largo de apenas 150 km de recorrido explica los aprovechamientos hidroeléctricos e infraestructuras asociadas. Por lo tanto, existe la dificultad de estudiar el tramo medio entre el embalse de Arenós y Sitjar, por las múltiples modificaciones de su régimen natural, por lo que se ha optado limitar el estudio en la parte alta de la cuenca del río Mijares para la implementación del modelo hidrológico.

El nacimiento del río mijares se produce por confluencia de arroyos pequeños en la Sierra de Gúdar, tras alcanzar la localidad de Cedrillas y girar hacia el Sur para salir a Formiche Alto. El valle se ensancha formando la amplia cubeta de Mora. Esta macroestructura geológica de relieves más suaves y a gran altitud, forma la mayor parte de la cuenca del Alto Mijares. Al Sureste y pasando la estación de aforo Terde con cuenca drenante de 665 km², se incorpora desde el Oeste el río Albentosa que recoge las aportaciones de Javalambre, y por el Este los afluentes de Gúdar y Maestrazgo.

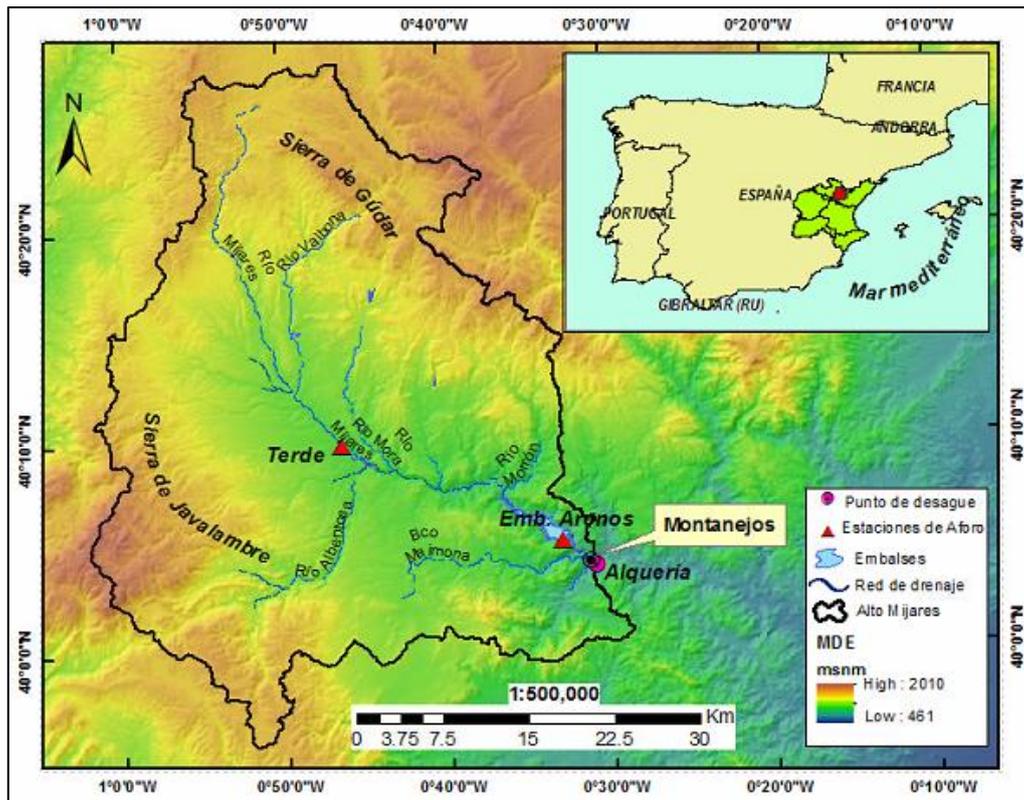


Figura 3.1. Mapa de ubicación del sistema hidrográfico del Alto Mijares

De todos los afluentes de la cuenca, la que mayor caudal descarga es el río Albentosa, que desciende desde la sierra de Javalambre y aporta $3.53 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio. Poco antes de esta desembocadura del Albentosa, el río Mijares recibe aporte de sus manantiales principales, por su margen izquierda aflora la fuente de Mar de Royo que aporta $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ y por la margen derecha la fuente de Babor y Escaleruela con un aforo de $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 3.2). El acumulado de las tres fuentes, llegan a sumar $2.15 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente, constituyendo la fuente principal de abastecimiento de agua y caudal base del río Mijares (CHJ, 2007).



Figura 3.2. Principales manantiales en Alto Mijares (a) Fuente de Escaleruela y (b) Fuente de Babor

3.1.2. Tramo de Montanejos

El tramo de estudio pertenece a la jurisdicción del municipio de Montanejos, y comprende una longitud de cauce de aproximadamente de 2.50 km, comprendido entre el embalse Cirat y el puente de Hierro (Figura 3.3). En este tramo se observa diversos cambios en la geomorfología del cauce y profundidad del río, así como la abundancia de la vegetación aguas arriba de fuente de baños.

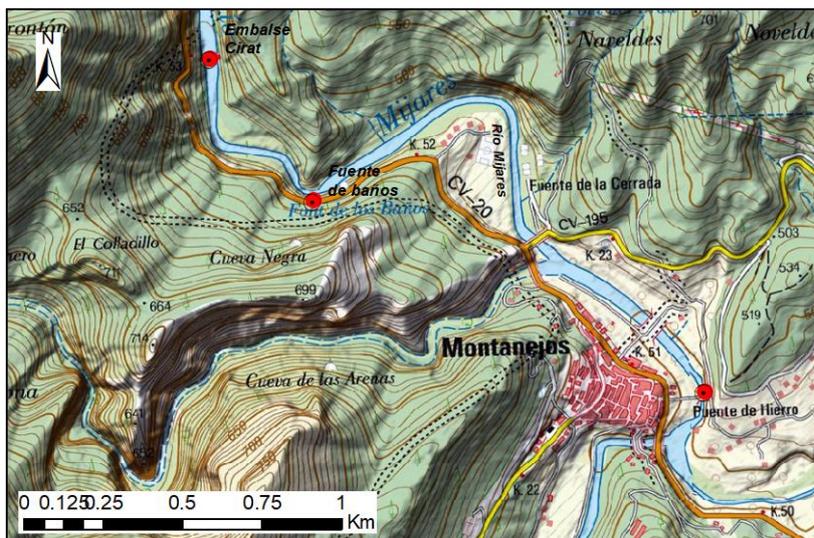


Figura 3.3. Mapa de localización del tramo de estudio y los puntos principales de estudio

El tramo Montanejos se caracteriza por tener baños termales provenientes de las descargas subterráneas del acuífero, en el tramo comprendido entre el embalse Cirat y el barranco la Maimona, tal como se puede ver en la Figura 3.4. Donde la mayor parte del año es visitado por los turísticos nacionales y extranjeros, con mayor continuidad en la estación verano y primavera. También en el tramo se observa una amplia gama de biodiversidad de especies acuáticas adaptados a las condiciones actuales.



Figura 3.4. Vista panorámica de la fuente de baños termales de Montanejos

3.1.3. Clima

La cuenca del Alto Mijares presenta un clima mediterráneo, con características bien marcadas entre la época más húmeda (primavera y otoño) y la más seca y calurosa (verano). A pesar de que las precipitaciones no son abundantes en exceso, el régimen térmico, determinado por el factor altitud y con características de temperatura bastante bajas, permite que la evapotranspiración no sea muy elevada en la parte alta, y en efecto el balance hídrico de la cuenca presenta excedentes (Hermosilla and Ferrer, 2011).

El régimen pluviométrico está caracterizado por la regularidad de las precipitaciones y una distribución espacial en función de la altitud. La precipitación media anual está por encima de los 480mm en la zona baja, no obstante, apenas supera 340mm en la parte central de la cuenca.

Las estaciones más lluviosas son la primavera y el otoño. Las dos estaciones exceden el 30% de la lluvia anual en casi todos los sectores de la cuenca. En verano se alcanza valores altos de precipitación que esta entre 100 y 150mm en el centro de la cubeta de Sarrión y primeras estribaciones de Gúdar producto de tormentas convectivas. Lo cual representa casi una tercera parte de la lluvia anual de la cuenca Alta.

3.1.4. Topografía

3.1.4.1. Cuenca del Alto Mijares

La topografía de la cuenca del Alto Mijares se ha caracterizado a partir del modelo de elevación digital, obtenido del portal del Instituto Geográfico Nacional de España¹ (IGN), con una resolución espacial de 100x100m.

La cuenca de estudio se encuentra entre la altitud 454 y 2010 m.s.n.m., donde el 50% de su área está por encima de la cota 1200 m.s.n.m., tal como se puede ver en la curva hipsométrica (Figura 3.6). La curva hipsométrica representado en la figura nos indica además que la cuenca se encuentra en la fase de madurez, encontrándose en equilibrio los procesos de sedimentación y erosión.

En la Figura 3.6 también se observan los polígonos de frecuencia, donde se aprecia que el 46% de la superficie se encuentra entre la cota 869 y 1076 m.s.n.m., según la clasificación

¹ <http://www.ign.es/web/ign/portal>

representado en la Figura 3.5. Donde además se puede distinguir que la zona central de la cuenca presenta pendientes suaves, mientras la parte baja y alta tiene una topografía con cambios bruscos de pendiente; lo que influirá en la formación acelerada de producción de escorrentía superficial.

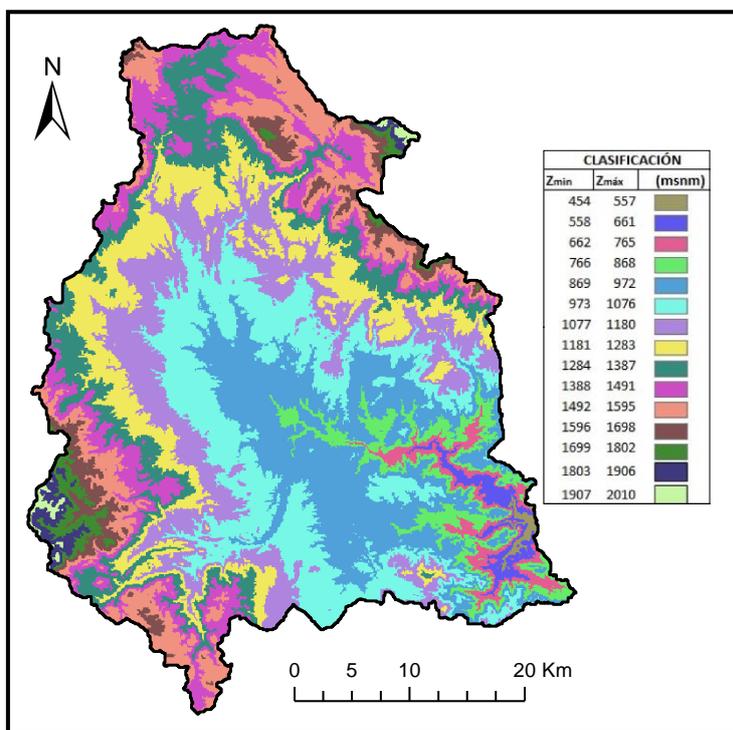


Figura 3.5. Mapa topográfico del Alto Mijares clasificado en función a su altitud

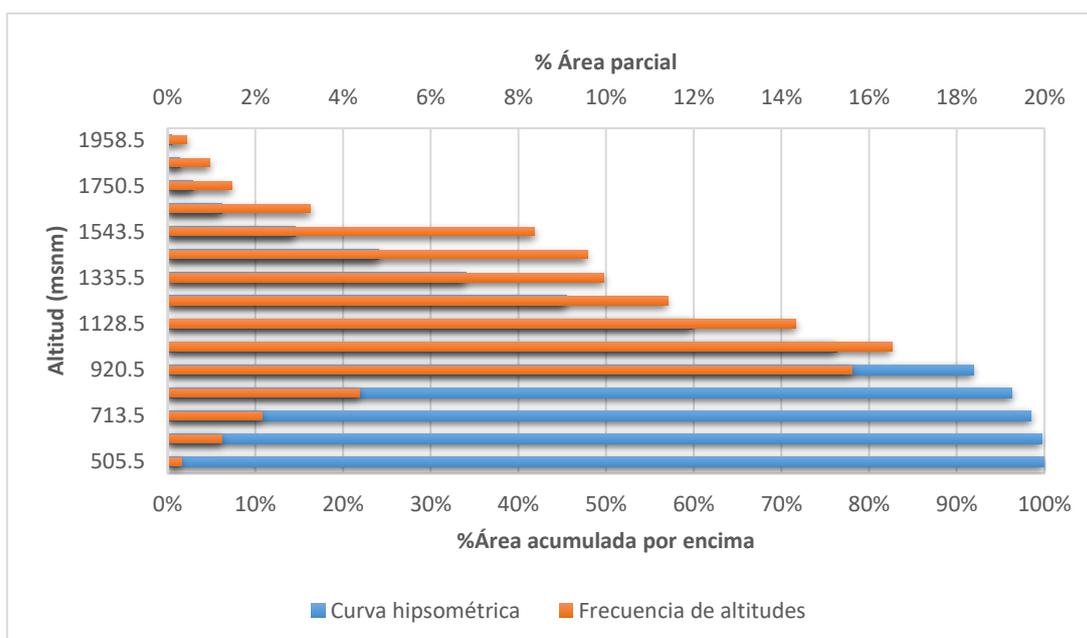


Figura 3.6. Curva hipsométrica y polígono de frecuencia de altitudes de la cuenca del Alto Mijares

3.1.5. Edafología

El estudio edafológico de la cuenca del Alto Mijares, esta descrita en la Base de Datos de Suelo Europeo (ESDB, por sus iniciales en inglés) a escala 1: 1,000,000, que proporciona un conjunto de parámetros del suelo europeo y los países mediterráneos para su uso en modelos agrometeorológicos y ambientales a nivel regional, estatal o continental.

La ESDB contiene una lista de Unidades Tipológicas del Suelo (UTS). Estas unidades son descritas por las variables (atributos) que especifican la naturaleza y propiedades de los suelos como la textura y el régimen hídrico. En la escala mencionada no es posible delimitar la UTS, por lo que se agrupan en Unidades de Mapa de Suelo (SMU) para formar asociaciones de suelos e ilustrar el funcionamiento dentro del paisaje. Cada SMU corresponde a uno o más polígonos en conjunto de datos geométricos, como se puede ver en la Figura 3.7.

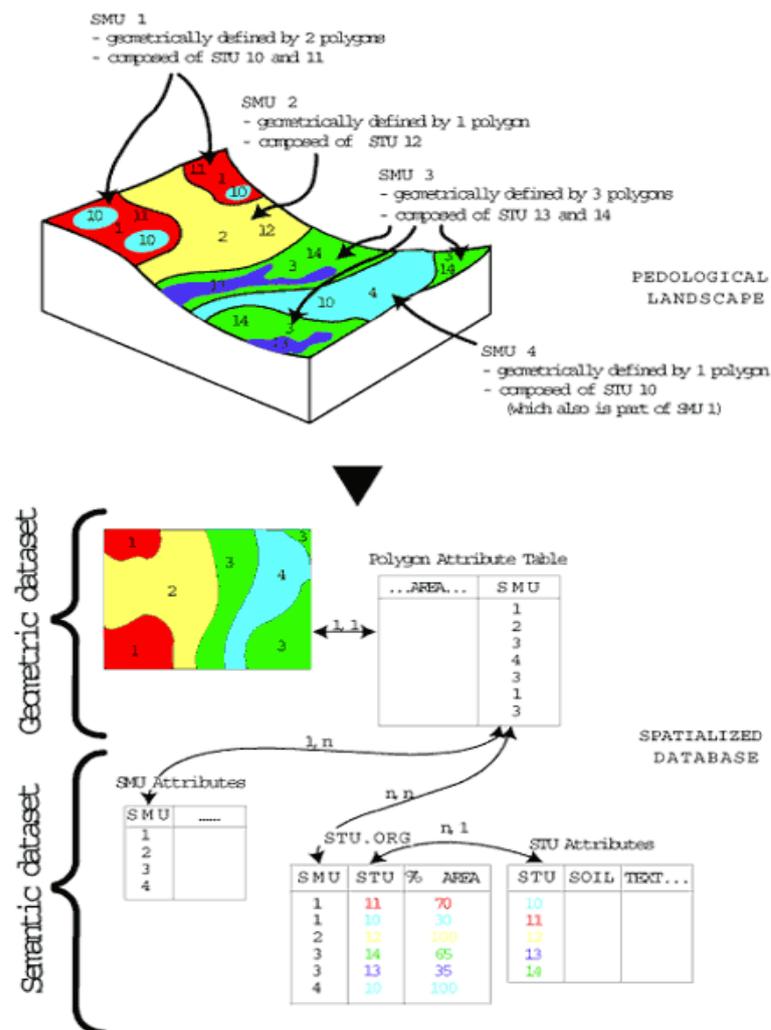


Figura 3.7. Información organizada de la base de datos del suelo europeo (The European Soil Database)

La ESDB está estructurado en 73 atributos que especifican las propiedades de los suelos, agrupados en 14 categorías según sus características de la siguiente manera: Limitación en el uso agrícola, clasificación de suelo de la Base de Referencia Mundial (WRB), textura, material parental, clasificación de suelo según la leyenda de la FAO, usos de suelo, obstáculos impermeables, humedad del suelo, propiedades mecánicas, hidrológicas, etc. Para valores de algunos atributos, se indica cuál es la confianza en el valor brindado. Este valor de confianza esta expresado cualitativamente como alta, moderado, bajo o muy bajo, como se ilustra en la Figura 3.8 y Figura 3.9.

En este trabajo se ha utilizado la información desarrollado por ESDB para caracterizar los parámetros hidrológicos que servirán de input al modelo. La ventaja de emplear esta base de datos con respecto a los tradicionales se justifica por la posibilidad de acceder desde cualquier plataforma en forma gratuita, para posteriormente realizar la edición con la ayuda de Sistema de Información Geográfica (SIG) ya sea en formato ráster o vectorial. No obstante, aún existe limitación en la modelación hidrológica, debido a su escala muy grande, lo que no permite representar la variabilidad espacial a una escala más reducida, tal como ocurre en la realidad.

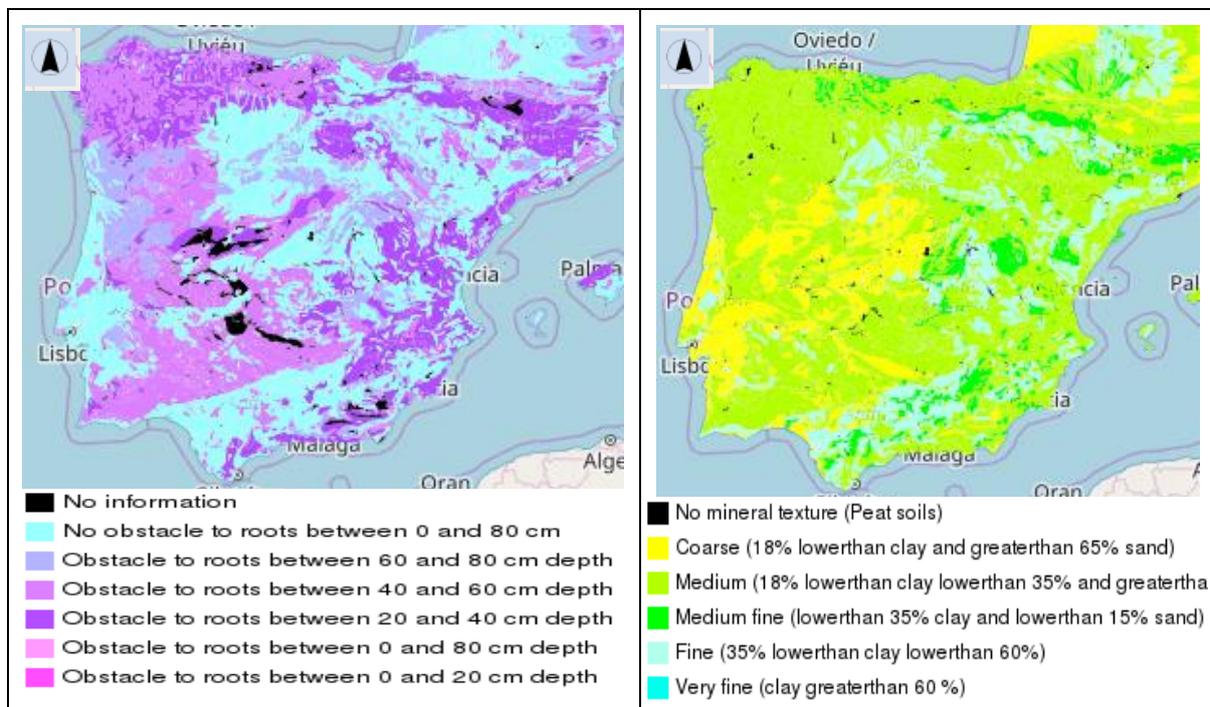


Figura 3.8. Mapa de atributos de obstáculo de raíces (ROO) y textura superficial dominante (TEXT-SRF-DOM) derivados de ESDB

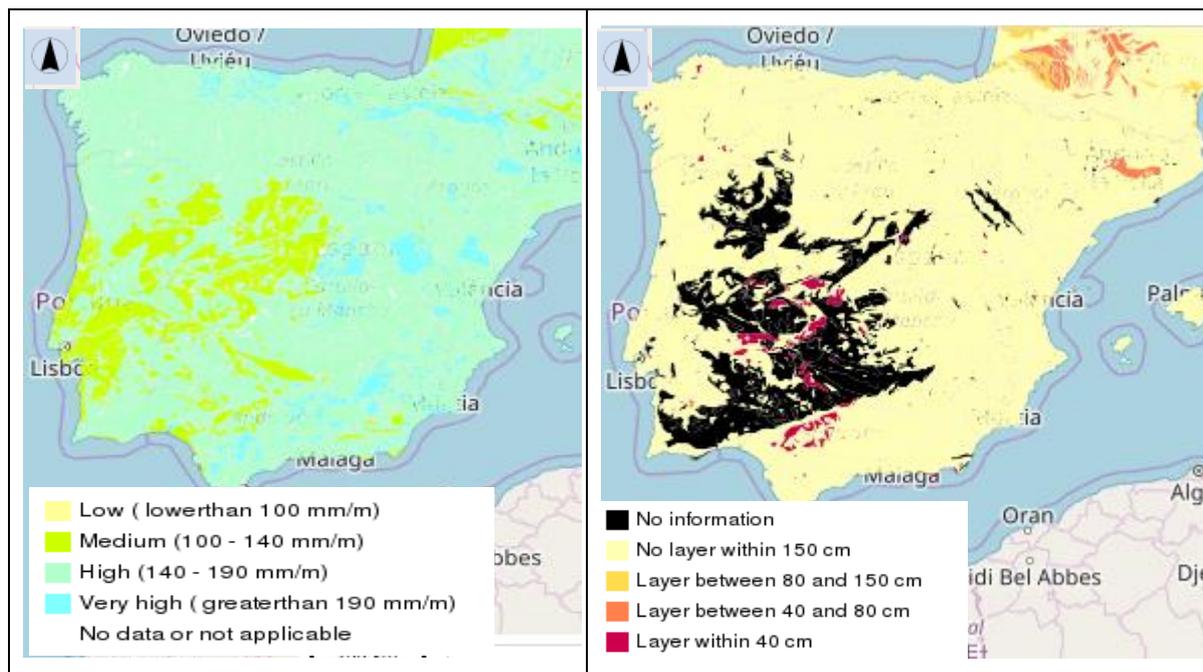


Figura 3.9. Mapa de atributos de capacidad de agua disponible en la parte superior del suelo (AWC-TOP) y capa impermeable en el perfil del suelo (IL) derivados de ESDB

3.1.6. Geología

La información geológica de la cuenca de estudio, es obtenido del Instituto Geológico y Minero de España (IGME²). Donde existen diferentes mapas de cartografía geológica e hidrogeológica, con escala 1:200.000, 1:50.000 y 1:25. 000. Además se cuenta con información de sistemas kársticos a escala 1:1000.000. Estos datos se pueden descargar y consultar en formato PNG y visualizar mediante ArcGIS.

3.1.6.1. Estratigrafía

La estructura de formación de la red fluvial se explica en base a la evolución tectónica. La depresión Sarrión (Figura 3.10) tiene un eje en el sentido de Noreste al Sureste y está separada por las sierras de Gúdar y de Javalambre. Esta depresión está conformada en su mayoría con materiales neógenos, fundamentalmente con arcillas y conglomerados del Mioceno. Esta depresión ha concentrado los derrames de las sierras laterales desde Mioceno medio, pero a pesar de su antigüedad el relleno de sedimentos no presenta demasiado espesor, tal que se puede observar el afloramiento de material jurásico en varios tramos del cauce principal.

² <http://www.igme.es/>

Por el Oeste se observa el eje triásico de Manzanera, que se extiende desde el Oeste hasta la depresión Sarrión, que principalmente está conformado por materiales erosionables como yesos y arcillas keuper, permitiendo que la cuenca del río Albentosa sea más grande de lo normal. Además, su alta impermeabilidad de estos materiales es la causa de numerosos y abundantes afloramientos que hacen un río muy caudaloso.

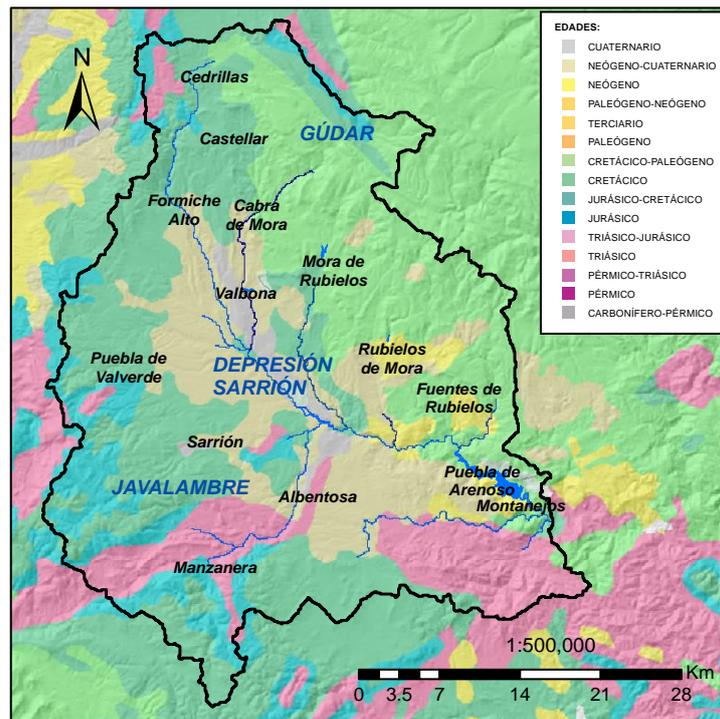


Figura 3.10. Mapa de formación geológico regional del Alto Mijares

3.1.6.2. Litología

La cuenca del Alto Mijares presenta cuatro tipos de litología, cada uno de ellos con una distribución espacial, como se observa en la Figura 3.11.

La formación de la sierra de Gúdar está constituido básicamente por materiales carbonatados de origen cretácico inferior; que es la combinación de calizas, margas y arcillas, que favorecen la existencia de afloramientos en ciertos contactos como en las zonas de: Mora de Rubielos, Valbona, Noguieruelas, Castellar, Cedrillas, etc. Mientras la sierra de Javalambre está conformado principalmente por material carbonatado de origen jurásico. Se trata de calizas medianamente cristalinas, siendo las intercalaciones superiores de material margosa, en el ámbito de Formiche Alto.

La depresión de Sarrión la conforman sedimentos detríticos del mioceno y cuaternario de carácter más grueso, con diversa potencia según el hundimiento de los bloques mesozoicos,

pero la más potente es la formada por los conglomerados y arcillas del mioceno superior y base del plioceno y detríticos gruesos.

Finalmente, el triásico del keuper, recorre por el Sur de Javalambre (Manzanera y Albentosa) y localmente en el trías de Alcalá de la Selva, con materiales plásticos que favorecen la aparición de manantiales.

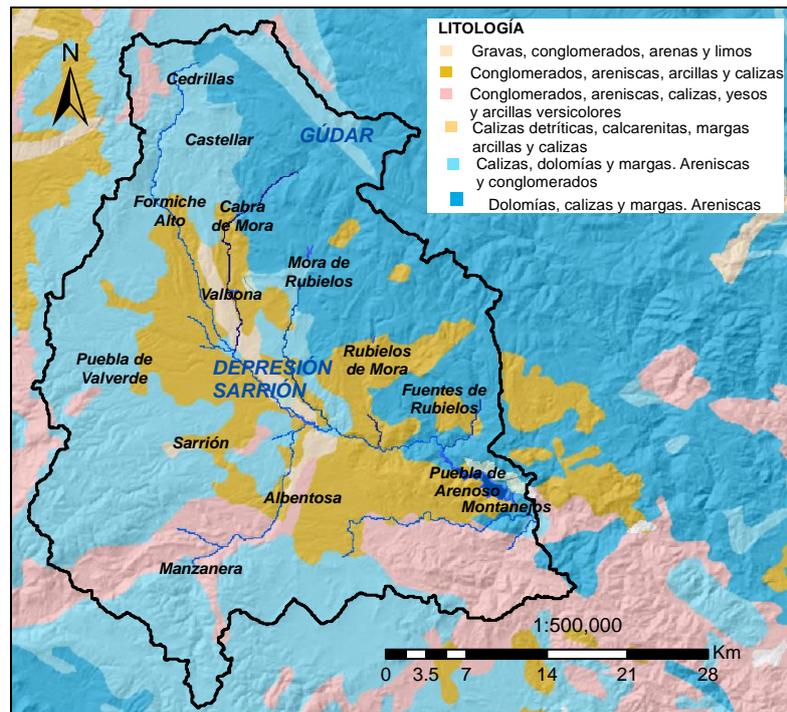


Figura 3.11. Mapa litológico de la cuenca del Alto Mijares

3.1.6.3. Hidrogeología

Uno de los parámetros para la modelación hidrológica es la permeabilidad, que depende de la composición y de la capacidad percolación de acuerdo a la geología descrita, junto con los usos de suelo, determinan la separación de los flujos superficiales y subterráneos del balance hídrico de la cuenca.

El mapa de permeabilidad, está realizado a partir del mapa Litoestratigráfico y que representa los niveles litoestratigráficos cartografiados agrupados por valores similares de permeabilidad. Se establecieron cinco tipos de permeabilidad: Muy alta, alta, media, baja y muy baja. Las distintas litologías se asociaron en siete grandes grupos: Carbonatadas, detríticas, detríticas del cuaternario, volcánicas, metadetríticas, ígneas y evaporíticas, dando lugar a una clasificación por tipos de acuíferos, establecidos según los procesos de formación de cada permeabilidad (Figura 3.12a).

La abundancia de estructuras litológicas con formación de material carbonatado favorece la presencia de zonas kársticas en la sierra de Gúdar y Javalambre, tal como se verá más adelante en el mapa de karst.

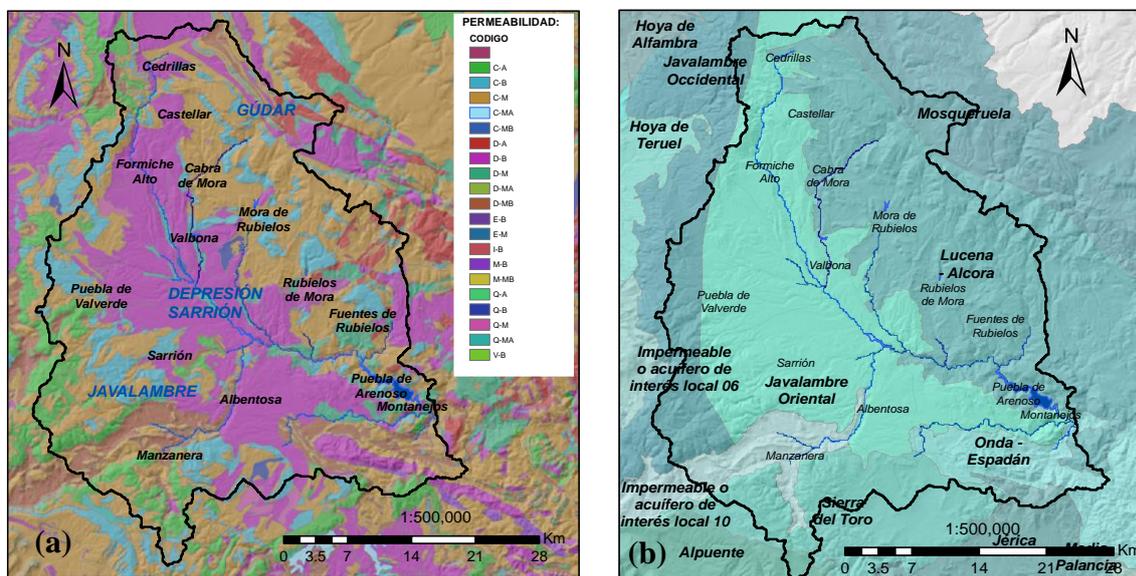


Figura 3.12. Mapas hidrogeológicos de Alto Mijares (a) Mapa de permeabilidad y (b) Mapa de masas de agua subterránea

Según la Directiva Marco del Agua (DMA) la cuenca del Alto Mijares se encuentra principalmente repartida entre la Masa de Agua subterránea (MASb) “Javalambre Oriental” y la masa “Lucena-Alcora” (Figura 3.12b), que se extienden por las formaciones mesozoicas (jurásico y cretácico), con las siguientes características:

La MASb **Javalambre Oriental**, es un acuífero libre, formado por material carbonatado, que tiene su descarga por manantiales hacia el río Mijares y una parte hacia el río Alfambra. Se localiza al Sur de la provincia de Teruel y el por el Oeste con la localidad de Puebla de Valverde. Al Este limita con los sistemas de Lucena-Alcora y Maestrazgo Occidental mediante el contacto del Jurásico y Mioceno de esta masa, conformado por materiales cretácicos de las masas adyacentes, donde el eje fallado de un anticlinal tiene dirección de Norte a Sur. El límite septentrional se establece según el contacto con los materiales mesozoicos pertenecientes al sistema del Maestrazgo Occidental. Al Sur limita con los afloramientos triásicos de Manzanera y con los materiales jurásicos de sierra del Toro. El acuífero está constituido por carbonatados del jurásico medio y superior, con espesores de aproximadamente 500-700 m, entre los que se intercalan margas de baja permeabilidad que no llegan a desconectar el

acuífero. Los materiales de baja permeabilidad que actúan de base impermeable están constituidos por arcillas yesíferas del keuper.

Por otro lado, MASb **Lucena-Alcora**, es acuífero libre, formado por material carbonatado. Se extiende entre las provincias de Teruel y Castellón. Al Norte está limitado por las sierras de Gúdar y al Sureste por los embalses María Cristina y Sitjar. Al Norte y Noreste se presentan algunos afloramientos de calizas y dolomías; y al Sur depósitos aluviales y coluviales cuaternarios. Estas formaciones sinclinales hacen que exista una fracturación, permitiendo la conexión hidráulica de los materiales. Además, la recarga parcial lateral procedente de Maestrazgo occidental, descarga hacia el río Mijares a través de su cauce y mediante manantiales.

3.1.7. Sistemas kársticos

De acuerdo a la mapa de karst del IGME a una escala de 1M (Figura 3.13), podemos ver, que a pesar de la escala muy grande, hay cinco zonas con una karstificación medianamente alta. Sin embargo, la más importante está localizado en la MASb de Javalambre Oriental, con una extensión mayor, y por ende es la principal zona de recarga de los manantiales de Babor y Escaleruela, descrita en la sección 3.1.1. Además, en esta región se presenta mayor cantidad de precipitación a lo largo del año, lo que favorece la recarga continua de los manantiales.

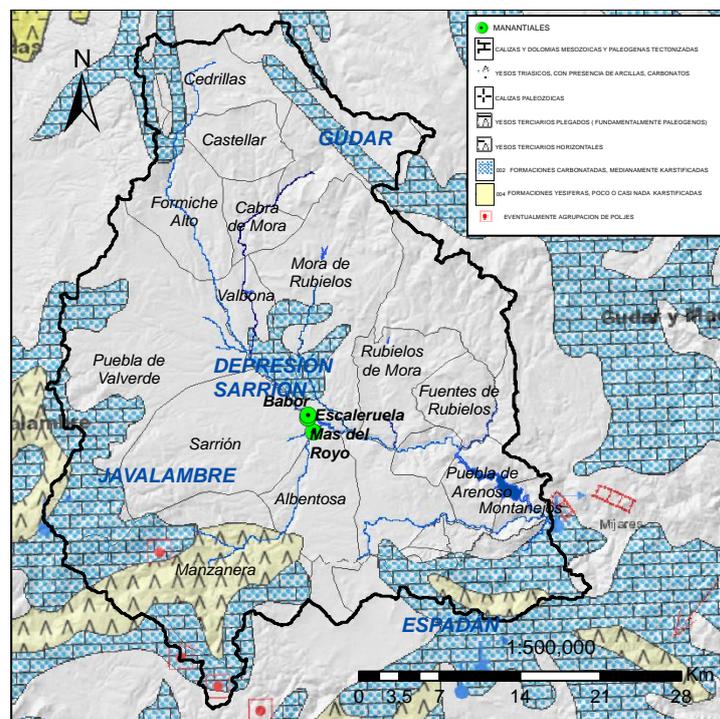


Figura 3.13. Mapa de karst a escala 1M en la cuenca del Alto Mijares

Por otro lado, tenemos sistemas secundarios en Cedrillas, Castellar, Alcalá de Selva y Mora de Rubielos, con característica más localizada y restringida a áreas de recarga, coincidentes con estratos de menor potencia y propiedades permeables más heterogéneas. La descarga de estas zonas de recarga se produce por la margen izquierda del río Mijares, específicamente con el afloramiento en el manantial Mar de Royo.

Las regiones kársticas con alta permeabilidad anulan casi en su totalidad la escorrentía superficial y interflujo, y las regiones con características impermeables favorecen la aparición de surgencias subterráneas de los materiales más permeables suprayacentes. Este hecho se representa a lo largo de la falla de Manzanera por la presencia de arcillas keuper, donde ocurren los afloramientos procedentes del sistema jurásico permeable karstificado de la Sierra de Javalambre. Para simular la descarga de los manantiales, se optó usar el mapa de permeabilidades de IGME, considerando como zonas karst al estrato con formación carbonatada.

3.1.8. Usos de suelo

Dentro del proyecto CORINE se crea el subprograma CORINE Land Cover³ (CLC), con el objetivo de obtener una base de datos de usos de suelo a escala 1:100.000, útil para el análisis territorial y la gestión de políticas europeas, mediante la interpretación a través de imágenes recogidas por los satélites LandSat y SPOT.

La información de mapa de ocupación de suelo en España correspondiente al proyecto CLC, está disponible para los años de 1990, 2000, 2006 y 2012. En la Figura 3.14 se presenta la distribución espacial de los usos de suelo en la cuenca del Alto Mijares, correspondiente al año de 1990 y 2000.

En la Figura 3.14 se muestra los mapas elaborados en base a la información de CLC 1990 y 2000, donde se observa que durante este periodo no hubo cambios significativos en los usos del suelo de la cuenca del Alto Mijares, por tanto, en principio se puede usar cualquiera de los dos mapas, sin embargo, en el presente estudio se ha trabajado con CLC 2000 por corresponder al periodo de calibración.

³ <http://centrodedescargas.cnig.es/>

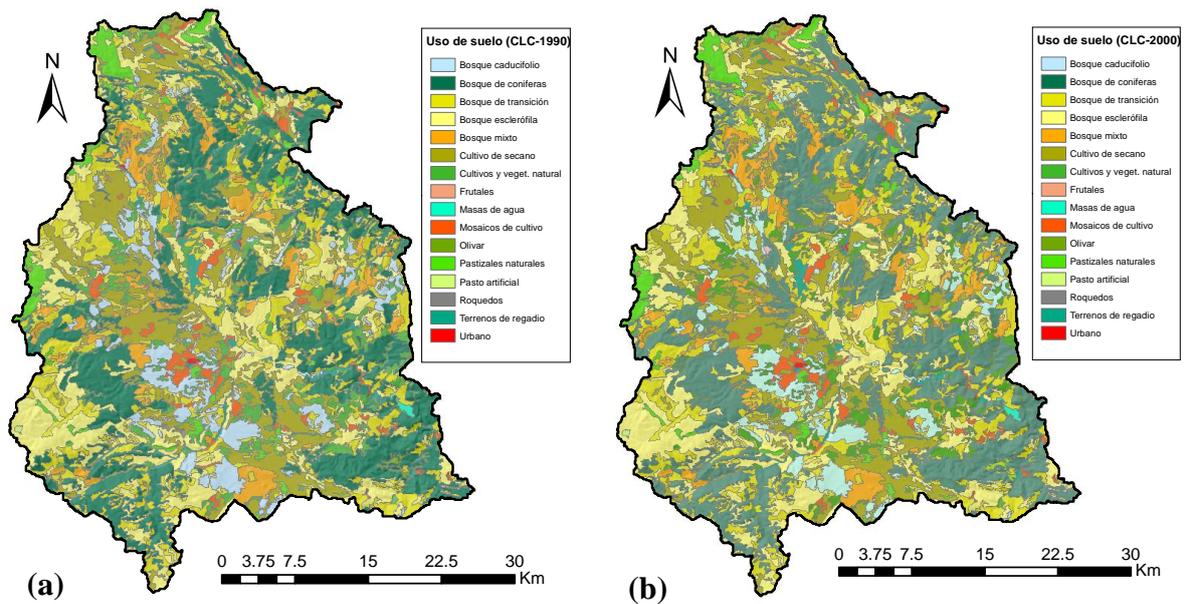


Figura 3.14. Mapa de distribución espacial de usos de suelo en Alto Mijares (a) CLC versión 1990 y (b) CLC versión 2000

Asimismo, en la Figura 3.15 se presenta la comparación de las dos clasificaciones de CLC de 1990 y 2000, donde se ratifica lo mencionado anteriormente, donde no se aprecia cambios significativos. Sin embargo, podemos ver que en la cuenca la cobertura más predominante son los bosques de coníferas con (25%), seguido de bosques esclerófila (17%), bosque de transición (17%), cultivos de secano (16%), cultivos y vegetación natural (7%), bosques caducifolios (6%), bosque mixto (5%), pastizales naturales (3%), Mosaicos de cultivo (2%), Viñedo (1%) y el resto de menor significancia representa el (1%).

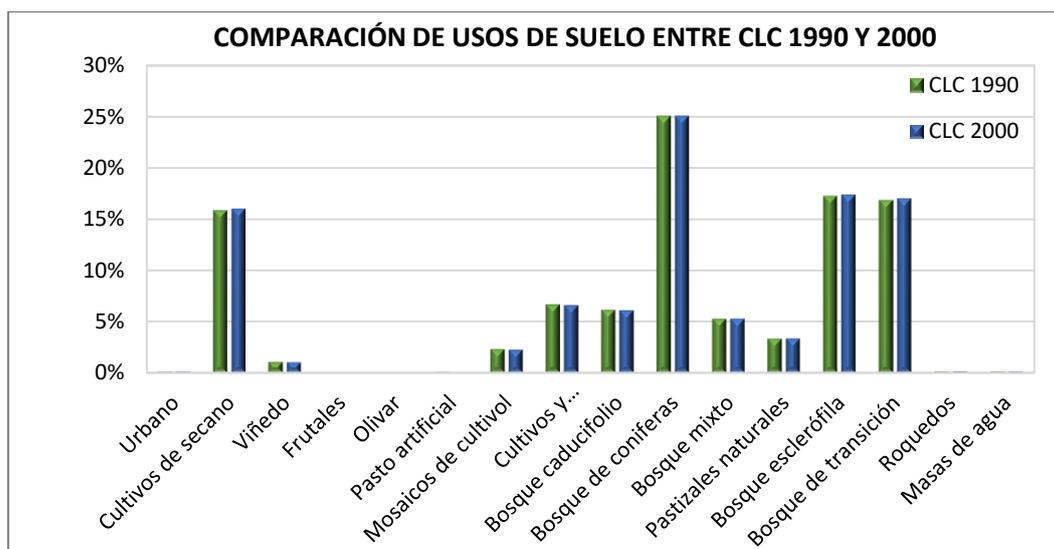


Figura 3.15. Comparación de usos de suelo de CLC 1990 y 2000 en Alto Mijares

3.2. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

3.2.1. Datos meteorológicos interpolados en Alto Mijares

La red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología⁴ (AEMET), está compuesta por más de 11,000 estaciones distribuidas por todo el territorio nacional de España, de las cuales aproximadamente 9,000 forman la red pluviométrica, 4,000 la termométrica y 3,500 la termopluviometría que codifican la temperatura y precipitación. A partir de estas estaciones se ha generado datos interpolados del proyecto Spain02, la cual fue elaborado por la Universidad de Cantabria⁵(UNICAN) en colaboración con AEMET.

En el desarrollo de este trabajo se ha visto conveniente utilizar los datos de la segunda versión de Spain02, de resolución horizontal 0.2° (aproximadamente 20km), debido a que la cuarta versión no cuenta con datos históricos anteriores a 1971, lo cual nos limita en la longitud temporal de simulación. Además, en el trabajo de (Gaona, 2015) se ha obtenido buenos resultados en modelación de evento, al usar esta fuente de información en la cuenca Mijares.

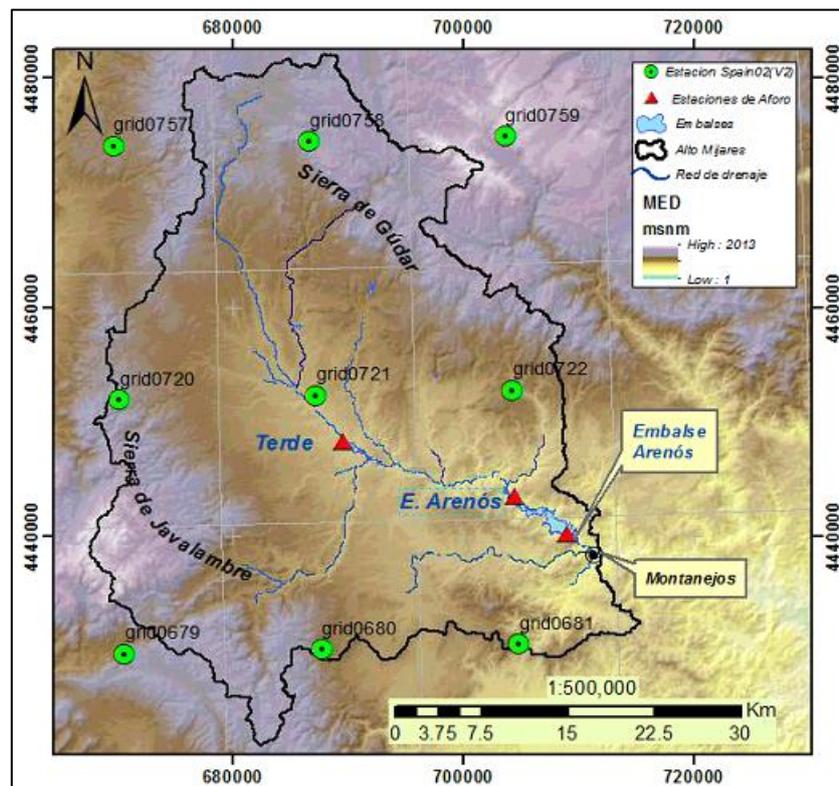


Figura 3.16. Distribución espacial de Spain02 (V2) y estaciones hidrométricas en Alto Mijares

⁴ <http://www.aemet.es/es/>

⁵ <http://www.meteo.unican.es/en/datasets/spain02>

En la Figura 3.16 se puede ver la distribución espacial de los datos meteorológicos del proyecto Spain02(v2), con fondo de mapa del elevación digital. Así mismo, en esta figura se observan las estaciones hidrométricas en color rojo, las cuales fueron fundamentales para calibrar y validar el modelo hidrológico en la cuenca de estudio.

3.2.1.1. Precipitación

La serie de precipitación utilizada para la modelación hidrológica, empieza el año 1991 y finaliza en el año 2008. En donde la mayor precipitación media mensual, corresponde a abril y mayo, con 49.82 y 56.18 mm cada uno, y el mes de menor precipitación se presenta en julio con 18.80 mm, tal como se puede ver en la Figura 3.17. Este comportamiento podría ser más favorecido si se considera el efecto orográfico en las partes más altas de la cuenca, como son las Sierras de Javalambre y Gúdar, dichas zonas registran precipitación la mayor parte del año, y que no son reflejados en los pluviómetros por la baja de densidad de estaciones en las partes altas.

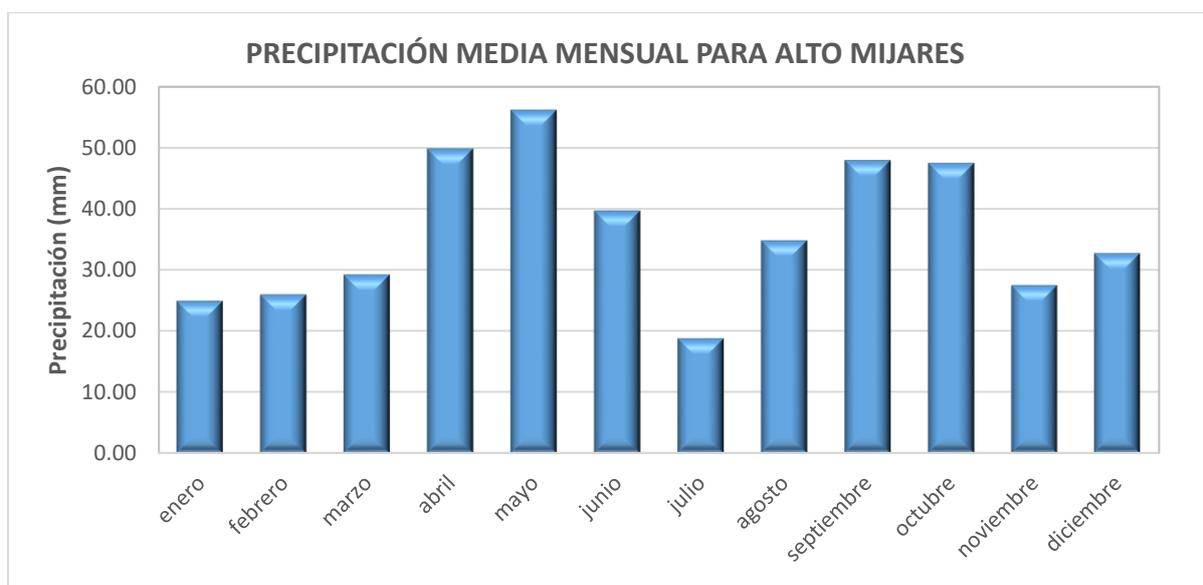


Figura 3.17. Precipitación media mensual de la serie Spain02 (v2), periodo (1991-2008)

3.2.1.2. Temperatura

La temperatura en Alto Mijares es típica de clima mediterráneo, donde la temperatura media mensual alcanza valores mayores en verano de 19.41 y 19.35°C, correspondiente a los meses de julio y agosto respectivamente; y con temperaturas menores en invierno, alcanzando a descender hasta 3.07°C en el mes de enero (Figura 3.18). Esta característica se reflejará en los valores altos de evapotranspiración de referencia en los meses de verano.

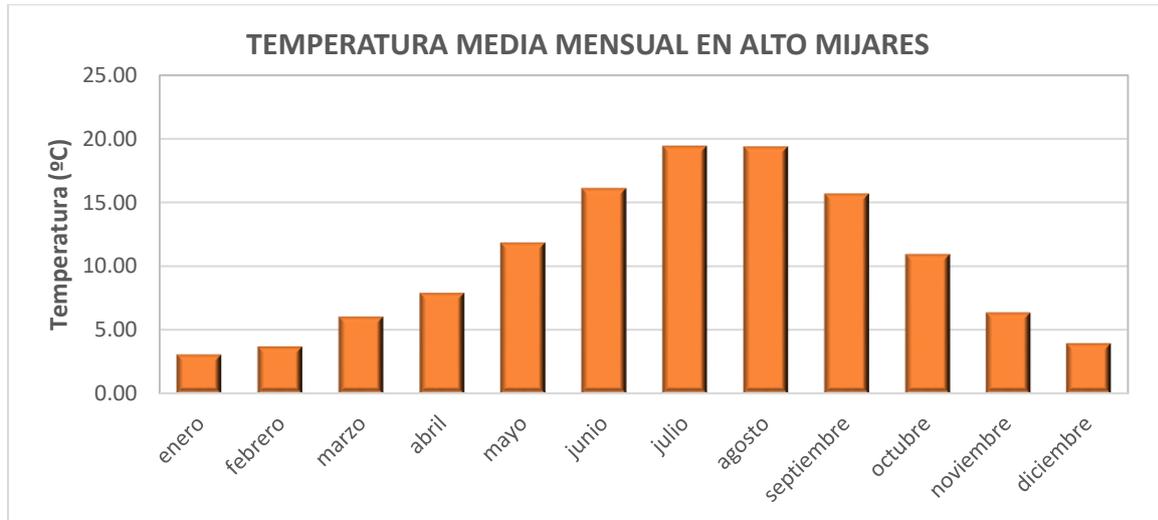


Figura 3.18. Temperatura media mensual de la serieSpain02 (v2), periodo (1991-2008)

3.2.2. Datos meteorológicos en tramo Montanejos

Actualmente no se cuenta con datos meteorológicos en la zona de estudio, sin embargo se dispone de registros medios mensuales de estaciones más cercanas, como Teruel y Castellón, administrados por AEMET y SIAR⁶. De los cuales se obtuvieron datos de humedad relativa y velocidad de viento. Asimismo, la serie de registros de temperatura del aire y del terreno han sido recopilados a partir de estaciones interpolados de Spain02(v2), correspondiente a la cuadrícula 681, que abarca toda la zona de estudio. La obtención de cada uno de estos datos meteorológicos se detalla a continuación, y los datos restantes fueron obtenidos directamente en la zona de estudio, tal como se explica en la metodología.

3.2.2.1. Temperatura media diaria mensual

La temperatura media diaria del aire, fue obtenido como media de los datos interpolados de temperatura máxima y mínima de Spain02 (v2). Estos datos se encuentran a una escala diaria a partir de enero de 1994 a marzo del 2008. Para el modelo SSTEMP se usó la media diaria mensual, y que posteriormente para simular a nivel de estaciones se trabajó con la temperatura más crítica.

La temperatura media diaria mensual en el tramo Montanejos presenta valores máximos en los meses de verano (julio y agosto), llegando a registrar 22.67 y 22.64°C, respectivamente, tal

⁶ www.siar.es/

como se observa en la Figura 3.19. Lo que finalmente favorecerá a que la temperatura del manantial se mantenga estable a lo largo del tramo durante estos meses.

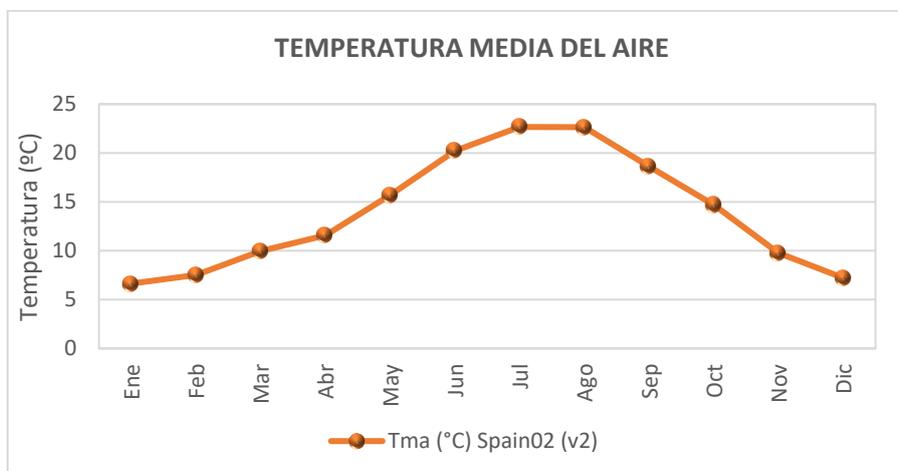


Figura 3.19. Temperatura media diaria mensual del aire en el tramo Montanejos

3.2.2.2. Humedad relativa

Los datos meteorológicos de humedad relativa correspondientes a la interpolación lineal de los datos de las estaciones de Teruel y Castellón-Almassora, a partir del cual se obtuvieron los valores medios mensuales para la zona de estudio (Figura 3.20), correspondiente al periodo de 1981 al 2010. En donde se puede apreciar que los valores más críticos se presentan en los meses de verano como era de esperarse, alcanzando una humedad relativa de 58.35%. Esto es debido a las altas temperaturas y escasas precipitaciones en estos meses. Mientras ocurre lo contrario en la estación invierno, llegando a registrar un valor máximo de 72.71% en el mes de diciembre.

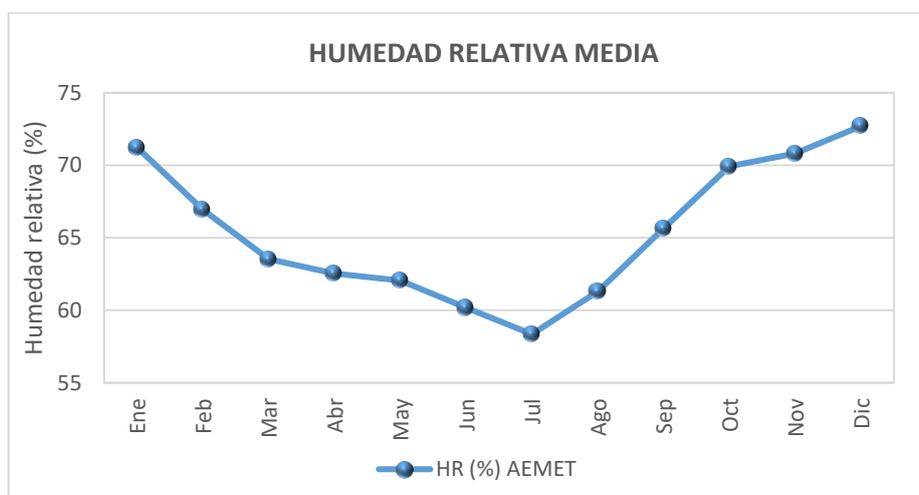


Figura 3.20. Humedad relativa media diaria para el tramo Montanejos

3.2.2.3. Radiación solar

La radiación solar fue estimada de las tablas meteorológicas de la guía de FAO en función de la latitud de la zona de estudio. Este variable se puede determinar también mediante el modelo SSTEMP; en función a los datos adicionales de coeficiente de polvo y el porcentaje de radiación de onda corta, reflejada desde suelo hacia la atmósfera. Al igual que las variables anteriores la radiación solar está determinada de acuerdo a las condiciones de clima mediterránea, con valores máximos en los meses de verano.

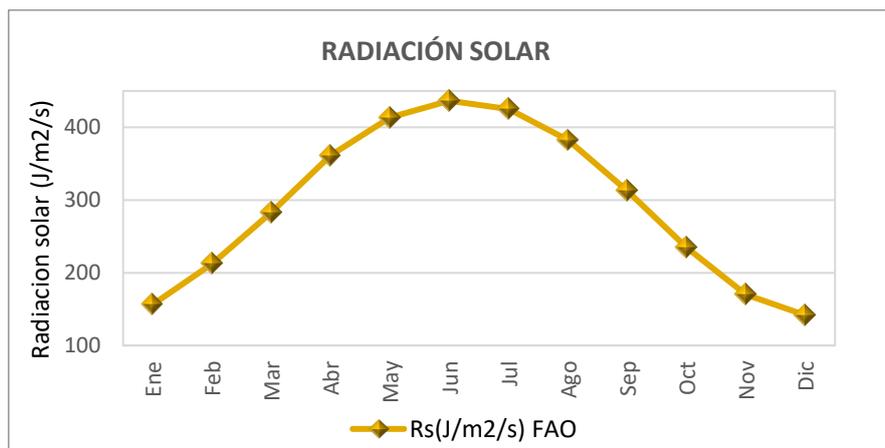


Figura 3.21. Radiación solar extraterrestre para el tramo Montanejos

3.2.2.4. Horas de sol

La nubosidad es otro de los parámetros que influye indirectamente en el cálculo de radiación atmosférica, y que representa la fracción de cielo cubierto de nubes. A partir de esta información se ha obtenido las horas de sol, mostrados en la Figura 3.22 . Donde podemos ver que la mayor insolación se registra en verano, con un valor pico de 60% en el mes de julio

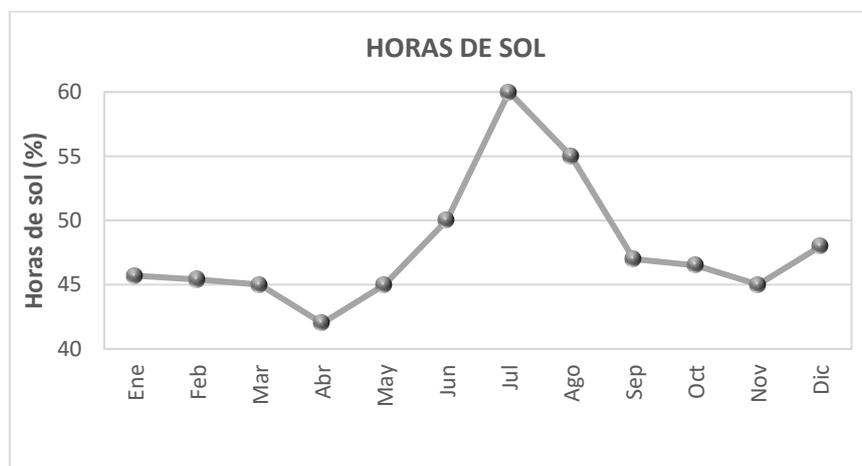


Figura 3.22. Porcentaje de horas de sol en el tramo Montanejos

Los datos de nubosidad fueron obtenidos del Atlas Climático de la Comunidad Valenciana (Pérez Cueva, 1994), correspondiente a la estación de Castelló. No obstante, para el modelo térmico se utiliza los datos de horas de sol.

3.2.2.5. Velocidad de viento

Y finalmente nos queda la velocidad de viento. Que, debido a la falta de datos en la zona, fue adquirido de los datos de SiAR, correspondiente a la estación CS05 Castelló Benadresa, con registros disponibles a partir de enero de 2001 hasta la actualidad. En la Figura 3.23 se muestra el promedio diario mensual, de todo el periodo el periodo disponible. En donde se puede ver que hay mayor de velocidad de viento en los meses de enero a mayo, llegando alcanzar el valor máximo de 1.20 m/s en el mes de marzo. Mientras que en el resto de los meses se encuentra próximo a 1m/s.

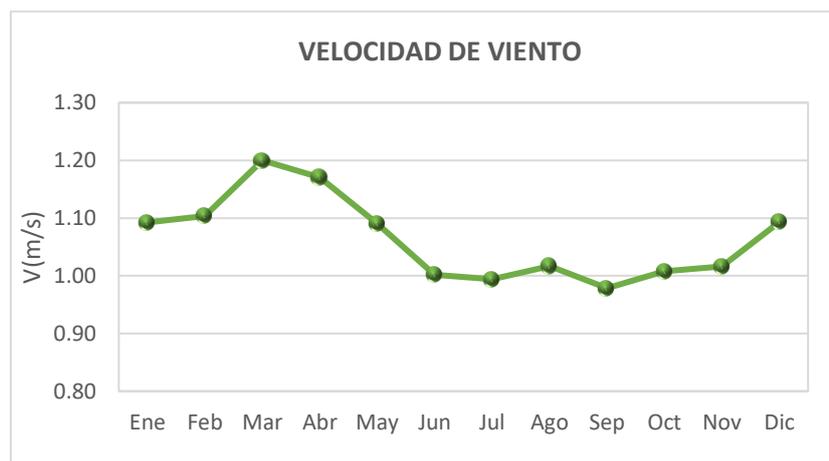


Figura 3.23. Velocidad de viento para el tramo Montanejos

3.3. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

La información hidrométrica necesaria para el modelo es a escala diaria, lo cual nos obliga a contar con registros de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA); lo cual dispone de datos de caudal y nivel en puntos seleccionados.

La ROEA desde que empezó a operar ha ido sufriendo una continua evolución para conseguir un mejor control y gestión de los recursos hídricos, tal es así, que no todas las estaciones cuentan con registros para el periodo elegido en este estudio (1991-2008), ya que algunas estaciones de aforos han dejado de prestar servicio por tener una mala ubicación y otras por interrumpirse largas series de gran valor histórico en años previos al inicio de operación de la red SAIH, tal es así, que en la cuenca del Alto Mijares se cuenta con tres estaciones

hidrométricas con registros disponibles para el periodo requerido, como se puede observar en la Tabla 3.1 y ubicados según la representación de la Figura 3.16.

Tabla 3.1. Estaciones foronómicas utilizados en la implementación del modelo hidrológico en la cuenca del Alto Mijares (CEDEX)

Código ROEA	Estación de aforo	Periodo de registro disponible	X UTM (ETRS89)	Y UTM (ETRS89)	Altitud (m.s.n.m)	Superficie de cuenca (Km2)
8030	Terde	1946-2013	689692	4448508	845	665
8134	Entrada Emb. Arenós	1991-2013	704144	4443552	602	1396
8145	Salida Emb. Arenós	1984-2014	709874	4440549	490	1430

Por ello, existe la necesidad de elegir entre la adopción de los datos del aforo a la entrada del embalse Arenós/ C.E. Los Cantos (ROEA 8134) o adoptar la serie calculada a partir del balance hídrico en base a caudales de salida y volumen de almacenamiento del embalse Arenós (ROEA 8145). Por esta razón hubo la necesidad de contrastar la aptitud de ambas series, mediante la comparación del aforo a la entrada del embalse Arenós/C.E. Los Cantos (ROEA 8134) y la serie calculada de entradas al embalse por medio de balance hídrico, tomando como referencia el periodo (1991-2008).

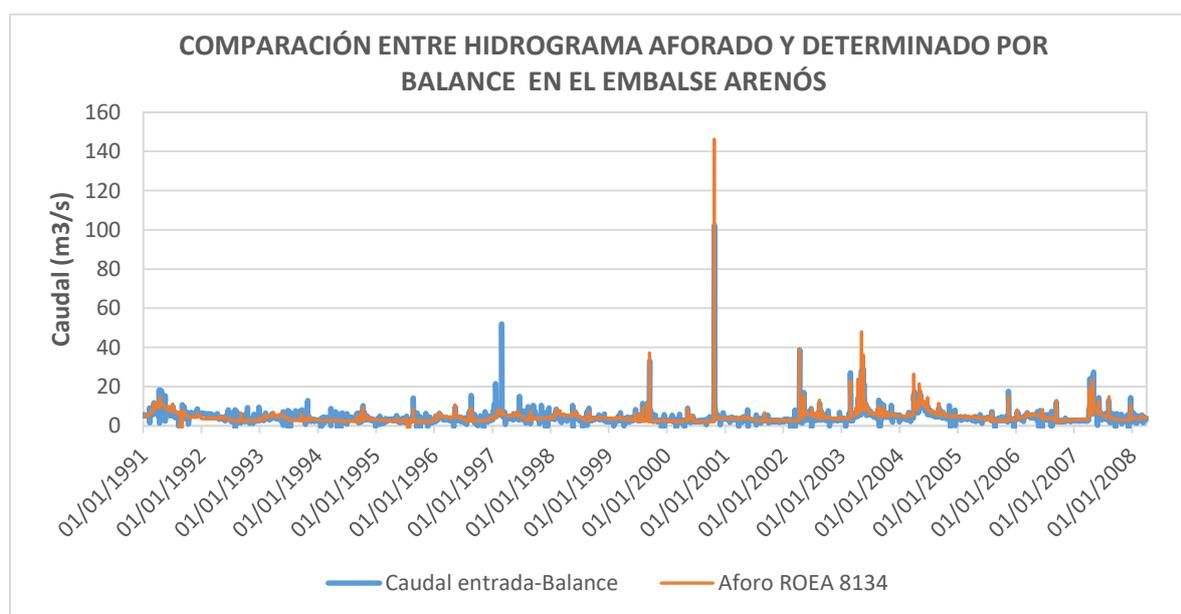


Figura 3.24. Comparación de la serie de aforo a la entrada del embalse Arenós/C.E. Los Cantos (ROEA 8134) frente a la serie de caudales de entrada al embalse

Haciendo análisis la Figura 3.24, se observa que la diferencia entre los valores extremos de la serie calculada respecto al aforado, asciende más del 30% para el conjunto de datos de caudal máximo diario, mientras que a efectos de recursos hídricos las diferencias apenas alcanzan el 3% entre las series.

Por tanto, dado que el objetivo principal es realizar una simulación continua, para representar adecuadamente los caudales bajos; y en vista de que considerar la mejor serie a estos efectos no perjudica de manera importante el análisis de los recursos hídricos, se decidió usar la serie de aforo ROEA 8134, como estación de validación en el caso del modelo TETIS y calibración para el modelo unicelular.

A continuación, se describe el régimen hídrico del río Mijares en las dos estaciones foronómicas elegidas.

3.3.1.1. Régimen hídrico del río Mijares en la estación Terde (ROEA 8030)

Está situado en el ámbito del municipio de Sarrión, provincia Teruel; con una superficie de cuenca aportante de 665 km². La estación Terde se encuentra ubicado aguas arriba de los manantiales de Escaleruela, Babor y Mar de Royo. Presenta un régimen hídrico de caudal medio de 0.48 m³/s, y una aportación anual máximo y mínimo de 33.34hm³ y 6.74 hm³, respectivamente (Figura 3.25a). Así mismo podemos observar en la Figura 3.25b la variación mensual de las aportaciones, registrando un valor máximo de 2.05 hm³ en el mes de mayo, y un mínimo de 0.82 hm³ en el mes de noviembre, correspondiente al periodo de 1991 al 2008.

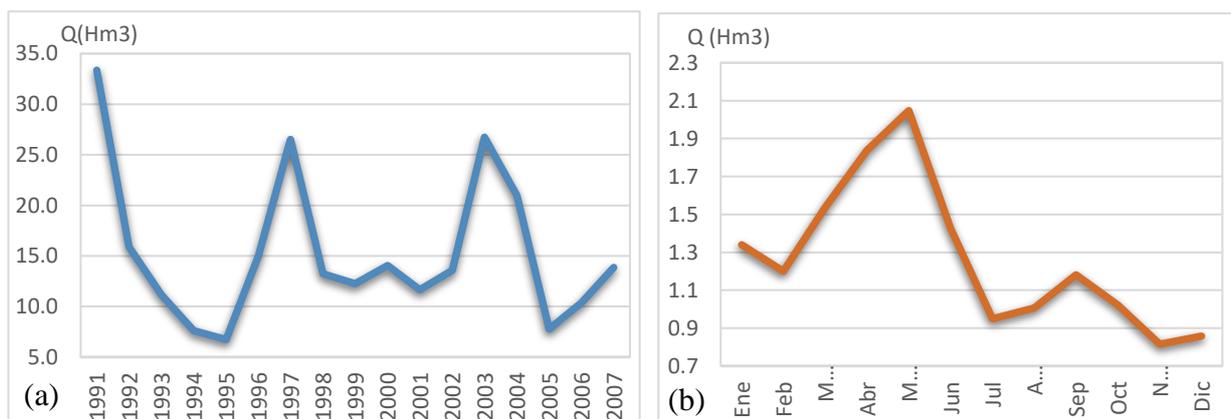


Figura 3.25. Serie de aportaciones media anual (a) y media mensual(b), en la estación Terde ROEA 8030

3.3.1.2. Régimen hídrico del río Mijares en la estación a la entrada de embalse Arenós (ROEA 8134)

Esta estación se encuentra en el municipio de Puebla Arenoso, provincia de Castellón, con superficie de cuenca aportante de 1395 km², emplazado a la entrada del pantano de Arenós. El río Mijares en este tramo representa un régimen hídrico de caudal medio de 4.36 m³/s, mayor a los registrados en la estación Terde, llegando incrementar más de siete veces con apenas doble de cuenca aportante; y está muy relacionado con la formación geológica de la cuenca y el aporte de los manantiales kársticos.

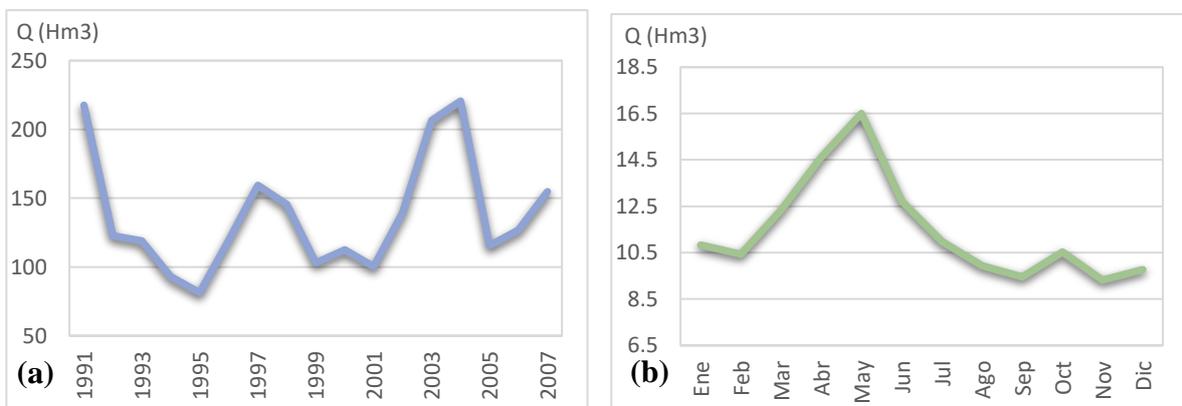


Figura 3.26. Serie de aportaciones media anual (a) y media mensual(b), en la estación a la entrada del embalse Arenós (ROEA 8134)

La tendencia del hidrograma anual observada en la Figura 3.26a, es similar al hidrograma de la estación Terde, excepto en el año de 1997, esto puede ser debido a la variabilidad espacial de la precipitación en la parte alta de la cuenca, tal como se observará más adelante en el mapa de precipitación corregida. Asimismo, el hidrograma mensual representado en la Figura 3.26 tiene similar tendencia de la estación Terde, con un valor máximo en el mes de Mayo y un valor mínimo en el mes de noviembre, con 16.50 y 9.31 Hm³ cada uno.



CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA

El modelo TETIS además de requerir la información hidrometeorológica, necesita una estructura de parámetros que caracterizan la variabilidad espacial del suelo, del sustrato y de la cubierta vegetal a escala de cuenca; representada mediante la estimación previa de mapas de parámetros a partir de la información disponible, lo cual está relacionado con la topografía, usos de suelo, edafología, litología y de otras características físicas de la cuenca que varían espacialmente.

La calidad de representación espacial está ligada con la calibración óptima del modelo, ya que con ésta se debe garantizar que el modelo refleje la realidad del medio donde se aplica. La calibración del modelo TETIS se realiza en la estación Terde (ROEA 8030), teniendo en cuenta los fenómenos kársticos. Posteriormente el modelo fue validado en la estación Arenós (ROEA 8134). Para ello, primero se ha estimado las descargas de las manantiales aguas abajo de la estación Terde, mediante la aplicación de un Modelo Unicelular (MU), para luego incluir en el hidrograma simulado en la estación Arenós, no sin antes realizar la calibración automática del modelo MU, en comparación con los caudales observados en la estación Arenós. Una vez realizado la validación espacial del modelo incluyendo las descargas de los manantiales, se procedió con la validación espacio-temporal del modelo, teniendo como referencia que los indicadores estadísticos de NSE sean mayores o iguales a los límites permisibles (LP) y otros índices de evaluación. Por último, luego de haber comprobado la bondad de los modelos se obtienen los parámetros y factores correctores óptimos, con lo cual se procede a realizar la predicción de la descarga del manantial termal Montanejos, mediante la extrapolación de estos parámetros y factores correctores. La metodología descrita se sigue de acuerdo al esquema de la Figura 4.1

Además, en los siguientes apartados se describe la determinación de cada uno de los inputs y mapa de parámetros que representan las propiedades físicas de la cuenca, y que son necesarias para llevar a cabo la modelación hidrológica distribuida.

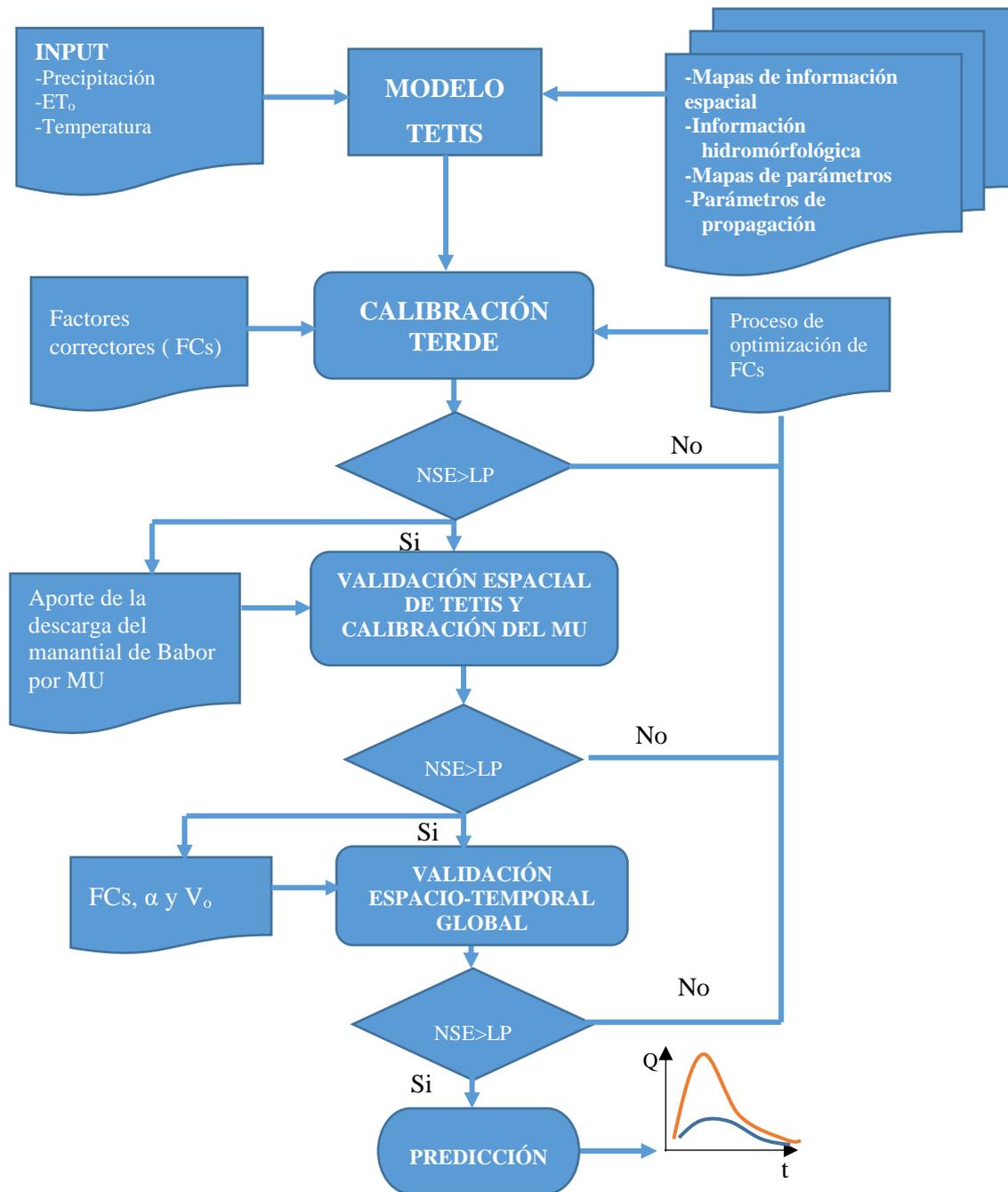


Figura 4.1. Esquema de la metodología de modelación hidrológica distribuida

4.1.1. Interpolación espacial de episodio de entrada

En la cuenca de estudio se ha seleccionado 9 estaciones de datos de Spain02, tanto para la precipitación y temperatura (Figura 3.16). En donde el periodo de análisis está entre enero de 1991 a marzo del 2008 a escala diaria. El modelo TETIS requiere una información distribuida a nivel celdas de estos datos de entrada, por lo que utiliza el método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW) para mejorar la densidad de datos en toda zona de estudio. Este método

consiste en la obtención de factores de ponderación w_{0j} con una función entre la distancia de un punto o celda (x_0, y_0) donde se quiere estimar el valor de la variable y las estaciones de medición (x_j, y_j) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$w_{0j} = \frac{1/d_{0j}^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{0i}^2}} \quad (4.1)$$

Donde n es el número de estaciones empleadas y d_{0j} se determina como:

$$d_{0j} = \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}, j = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

El valor de variable “ x ” en un punto de interés es calculado como la sumatorio del producto del respectivo factor de ponderación por el valor puntual registrado en cada una de las estaciones de mediciones empleadas, según la expresión (4.3).

$$x_0 = \sum_{j=1}^n w_{0j} x_j \quad (4.3)$$

Además, en el modelo TETIS existe una expresión para realizar la corrección por altura, siempre en cuando la correlación sea lineal entre estas dos variables (precipitación y altitud).

$$x_0 = \sum_{j=1}^n w_{0j} [x_j + x_j \cdot \beta (z_0 - z_j)] \quad (4.4)$$

Donde β representa la variación de “ x ” con la altura y varía entre 0 y 1, siendo su unidad m^{-1} .

En la implementación del modelo se ha activado la opción de interpolación de acuerdo a la ecuación (4.3) para los valores de evapotranspiración de referencia, y con la ecuación (4.4) la variable de precipitación. Además, se ha fijado un número de 4 estaciones más cercanas al punto en cuestión para aplicar la interpolación, ya que según la recomendación de (Francés et al. ,2014) se puede usar un máximo de seis estaciones para no generar interferencia en el modelo.

4.1.2. Estimación de evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se denomina como evapotranspiración de cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia, y se denomina ET_o .

En el año 1990 un grupo de expertos e investigadores en riego, revisan las metodologías propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, y posteriormente recomiendan la adopción del método combinado Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. El método de FAO Penman-Monteith, define el cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s.m^{-1} y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada (Allen et al., 2006) . Sin embargo, este método requiere de datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

Por lo que en este trabajo se usó la ecuación de Hargreaves (Hargreaves and Allen, 2003) para estimar ET_o , debido a la limitación en datos meteorológicos en la zona de estudio. La ecuación de Hargreaves está definido con la siguiente expresión:

$$ET_o = 0.0023 (T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (4.5)$$

Donde R_a es la radiación solar extraterrestre, expresado en ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$) y T_{med} , T_{max} y T_{min} , es la temperatura media, máxima y mínima diaria en ($^{\circ}\text{C}$).

La información utilizada para calcular la ET_o por la ecuación de Hargreaves, fueron la serie interpolada de temperatura de Spain02 (v_2), asumiendo como temperatura media entre la temperatura máxima y mínima; y en lo que respecta a radiación solar extraterrestre, esto fue obtenido en función de latitud de acuerdo a las “Tablas meteorológicas de la guía de FAO”, en donde los valores están expresados en ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$), por lo que para convertir a su equivalencia en ($\text{mm}/\text{día}$) fue afectado por 0.408. En este caso, la cuenca de estudio se encuentra a una latitud de 40° , por tanto, se emplea los valores mensuales correspondientes a esta latitud para los doce meses del año, como se puede ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores de radiación extraterrestre en(MJ/m²/día) para Alto Mijares (Allen et al., 2006)

Hemisferio Norte												
Lat.(°)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
40	15	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30	22.5	16.3	13.6

4.1.3. Elaboración de mapa de parámetros

El modelo TETIS requiere mapa de parámetros que representen la variabilidad espacial de las características físicas de la cuenca. Para ello, es necesario la estimación previa de estos a partir de la información disponible como la topografía, cubierta vegetal, mapa de suelos, permeabilidad y otras características de la zona de estudio.

En la Tabla 4.2 se observa los distintos tipos de información cartográfica utilizada para la estimación de los parámetros del modelo.

Tabla 4.2. Información cartográfica utilizada para la estimación de parámetros

Mapas	Escala	Parámetros estimados
Modelo de Elevación Digital (MED)	Píxel de 100x100 m	Mapa de pendiente, mapa de direcciones de flujo, mapa de celdas drenantes acumuladas y mapa de velocidad de flujo en la ladera
CORINE Land Cover 2000	1:100.000	Mapa de almacenamiento estático del suelo, mapa de intercepción, mapa de almacenamiento superficial por depresiones en el terreno.
Base de Datos de Suelo Europeo (ESDB)	1:1000.000	Mapa de almacenamiento estático del suelo y de conductividad hidráulica horizontal y vertical del suelo superior.
Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España	1:200.000	Mapa de permeabilidad vertical y horizontal del acuífero y mapa de karst.

A continuación se describe la estimación de los diferentes mapas de parámetros enumerados en la Tabla 4.2.

4.1.3.1. Parámetros derivados del MED

El Modelo de Elevación Digital (MED) hace la descripción de las características geomorfológicas de la cuenca y de los procesos hidrológicos que en ella ocurren, de cuya calidad depende la topología de la red de drenaje. Para la implementación del modelo TETIS se ha tomado un MED con una resolución espacial de 100x100 m, obtenido desde la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en formato ráster. El tamaño de celda fue elegido acorde a los tiempos de cálculo necesarios en el proceso de calibración automática de los parámetros del modelo.

Los mapas derivados del MED (Figura 4.2), y que representan las características geomorfológicas de la cuenca y relaciones topológicas de la red de drenaje son los siguientes:

- Mapa de direcciones de flujo
- Mapa de celdas drenantes acumuladas
- Mapa de pendientes.
- Mapa de velocidad de flujo en la ladera.

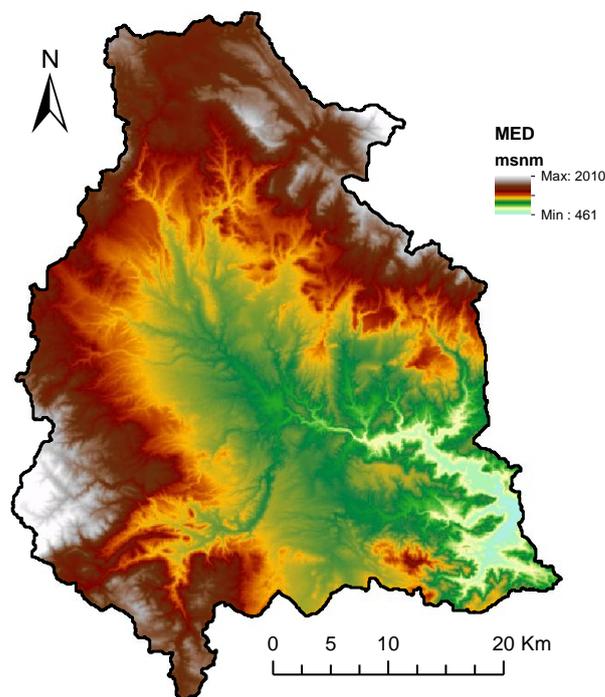


Figura 4.2. Modelo de elevación digital de la cuenca del Alto Mijares

Como paso previo a la obtención de los mapas, se procedió con la corrección del MED, con la finalidad de eliminar los sumideros y espurios que generan incertidumbre en la determinación

de las direcciones de drenaje derivadas de una baja precisión en las altitudes o de un tamaño excesivo de celdas, provocando que no exista una única pendiente máxima positiva.

El mapa de direcciones de flujo, representa la dirección en la que cada celda vierte sus aguas, y se ha estimado a través del módulo hidrológico de SIG, mediante el algoritmo D8 utilizada por ESRI, en donde el número a colocar en cada celda corresponde al valor asociado a la dirección de drenaje según se muestra en la Figura 4.3.

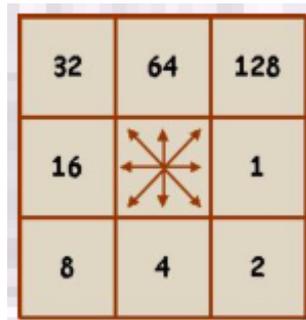


Figura 4.3. Codificación de dirección del flujo según ESRI

La obtención del mapa de celdas drenantes acumuladas depende del mapa de direcciones de flujo, en el que cada celda tiene asignado un valor igual al número de celdas que drenan a través de ella, y se define de acuerdo al criterio de área umbral.

Para determinar las áreas umbrales, es necesario diferenciar entre cauce, cárcava y ladera. En el modelo TETIS, las cárcavas es donde se produce el paso del flujo de ladera al cauce. La ladera es el resto de superficie que no es considerada cauce ni cárcava y en donde sólo ocurre escorrentía directa. Por tanto, para determinar el área umbral del flujo base y interflujo se ha utilizado el mapa de celdas drenantes acumuladas con apoyo del “Mapa de Líneas Azules” de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, donde se identifica los cauces principales de la red hidrográfica. Después de sucesivas iteraciones, se ha determinado un área umbral que está por debajo de 1 km² y que en las regiones de más escorrentía (Sierras de Gúdar y Javalambre) se manifiesta con apenas 0.50 km². Finalmente, el área umbral adoptado es de 0.90 km² para interflujo y 15.35 km² para flujo base.

Para determinar la velocidad del flujo existen distintas opciones. Una de ellas es asumir que la velocidad sea estacionaria y constante sobre toda la cuenca y considerar como parámetro del modelo un valor entre 1 y 0.01 m/s. Y la otra forma es definir que la velocidad de flujo sea estacionaria pero diferente en las distintas celdas de acuerdo al pendiente, expresado mediante la siguiente ecuación:

$$v = 1.4142S_o^{0.5} \quad (4.6)$$

Donde la v es la velocidad del flujo, expresado en (m/s) y S_o es pendiente del terreno en (m/m). El mapa de pendiente y de velocidad del flujo en ladera son importantes para el proceso de producción; así como el mapa de direcciones de flujo y celdas acumuladas para extraer el contorno de la cuenca hasta cualquier punto de interés sobre la red de drenaje.

Es importante señalar que todos los mapas de parámetros del modelo tienen que tener la misma resolución espacial y la cantidad de filas y columnas (Frances et al., 2017).

4.1.3.2. Parámetros derivados de los usos del suelo

Como ya se ha mencionado en el apartado 3.1.8, la información para caracterizar el uso del suelo es la mapa resultante del proyecto europeo CLC del año 2000.

Para calcular la evapotranspiración del cultivo, se necesita la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo (K_c). Este coeficiente de cultivo depende de las características de cobertura del suelo, propiedades de vegetación y resistencia aerodinámica que difiera del cultivo de pasto de referencia (Allen et al., 2006). En este trabajo se denominará como factor de vegetación (λ_v), puesto que no solo se evalúa cultivos sino todo tipo de coberturas.

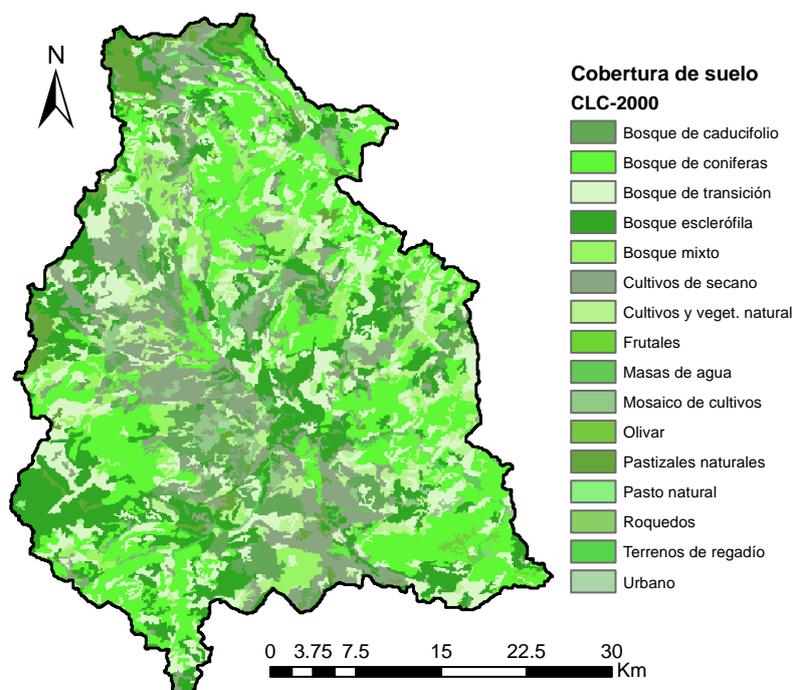


Figura 4.4. Distribución espacial de cobertura del suelo de acuerdo al mapa de CLC 2000

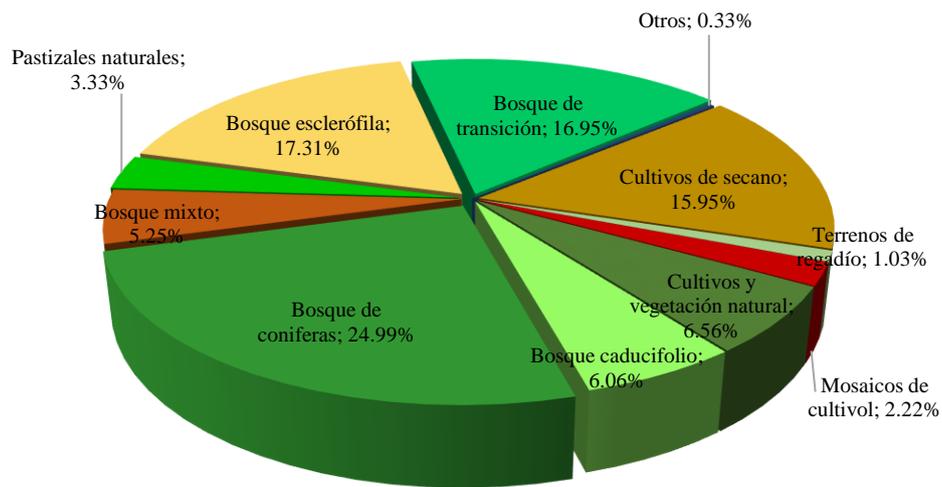


Figura 4.5. Distribución porcentual, según cobertura del suelo CLC 2000 en la cuenca del Alto Mijares

Para el cálculo de factor de vegetación en el caso de superficies cultivadas, se ha utilizado la metodología propuesta por la FAO. En donde el factor de vegetación integra las características que distinguen a un cultivo típico de campo el pasto de referencia. Para ello, primero se determina la duración de cuatro etapas de crecimiento Figura 4.6.

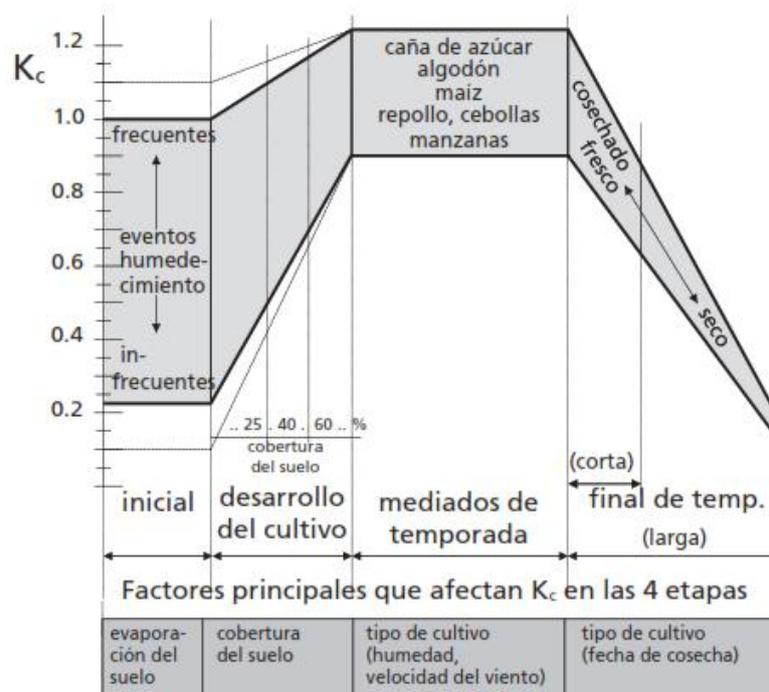


Figura 4.6. Rangos típicos esperados de factor de vegetación durante crecimiento (Allen et al. 2006)

- Etapa inicial: esta etapa está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo.

- Etapa de desarrollo del cultivo: esta etapa está comprendida desde que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa.
- Etapa mediados de temporada: desde fase anterior hasta el comienzo de la maduración
- Etapa final: hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia.

Para determinar el λ_v dentro de la etapa de desarrollo y final, se ha establecido una regresión lineal en función del valor inicial y final, previamente estimada. La primera fase nos da una ecuación con pendiente positiva, mientras la segunda una pendiente negativa. En base a estas ecuaciones y conociendo el periodo de duración de cada etapa se ha estimado el λ_v diario, así como el factor de vegetación mensual, que es el promedio de los valores estimados.

Para el caso de superficies no cultivadas no se especifica en la guía de la FAO, se ha tomado en cuenta valores mensuales de vegetación de otros estudios relacionados a la cuenca de estudio.

A continuación, se detallan los factores de vegetación obtenidos para los distintos usos del suelo según la clasificación de CLC nivel 3 del año 2000.

a) Factor de vegetación en superficies cultivadas

La determinación de factores de vegetación correspondiente a la superficie de cultivo son los siguientes:

- **Cultivo de secano (CLC-211):** Los cultivos estudiados para este uso son trigo, cebada, girasol y leguminosas como más representativos de la familia de gramíneas y leguminosas cultivadas en la zona, esto de acuerdo a la Encuesta Nacional de Superficies y Rendimientos de cultivo (ESYRCE) para la provincia de Teruel. En la siguiente tabla se muestra los factores de vegetación de estos cultivos, adaptados a la zona de estudio.

Tabla 4.3. Duración de las etapas y factor de vegetación para los cultivos trigo, cebada y girasol

Datos	Etapa				Total	Cultivo
	Inicial	Desarrollo	Mediados	Final		
Duración (días)	30	140	40	30	240	Trigo
λ_v	0.40	-	1.15	0.30	-	
Duración (días)	40	60	60	40	200	Cebada
λ_v	0.25	-	1.15	0.25	-	
Duración (días)	25	35	45	25	130	Girasol
λ_v	0.25	-	1.1	0.25	-	
Duración (días)	20	30	35	15	100	Leguminosas
λ_v	0.50	-	1.15	0.30	-	

- **Terrenos de regadío (CLC-212):** En este caso están los cultivos de regadío, así como su carácter tradicional y para autoconsumo, han obligado a proponer una mezcla de cultivos de regadío para zonas templadas de estación corta durante el verano. Esta mezcla incluye los cultivos predominantes de tubérculos (patatas), aliáceas (cebollas), brasicáceas (coles, berzas) y leguminosas (legumbres). En la Tabla 4.4 se muestra los factores de vegetación para cada uno.

Tabla 4.4. Duración de las etapas y factor de vegetación para cultivos de patata, cebolla, coles y legumbres

Datos	Etapa				Total	Cultivo
	Inicial	Desarrollo	Mediados	Final		
Duración (días)	25	30	45	30	130	Patatas
λ_v	0.50	-	1.15	0.75	-	
Duración (días)	25	30	30	10	95	Cebollas
λ_v	0.70	-	1.0	1.0	-	
Duración (días)	40	60	50	15	165	Berzas
λ_v	0.70	-	1.05	0.95	-	
Duración (días)	20	30	25	15	90	Leguminosas
λ_v	0.40	-	1.15	0.55	-	

- **Frutales (CLC-222):** El análisis para este cultivo se hace de acuerdo a ESYRCE, que hace referencia a la predominancia de la fruticultura. En base a los datos ponderados por superficie de cada provincia en la zona de estudio se han determinado tres cultivos principales (almendro, cerezo y otras drupáceas englobadas).

Tabla 4.5. Duración de las etapas y factor de vegetación para cultivos de almendro, cerezos y otras drupas

Datos	Etapa				Total	Cultivo
	Inicial	Desarrollo	Mediados	Final		
Duración (días)	20	70	105	45	240	Almendro
λ_v	0.4	-	0.9	0.65	-	
Duración (días)	20	70	100	40	230	Cerezos
λ_v	0.45	-	0.95	0.7	-	
Duración (días)	20	70	100	30	220	Otras drupas
λ_v	0.45	-	0.90	0.65	-	

- **Pasto artificial (CLC-231):** Los pastos artificiales se generan por cultivo de las principales especies forrajeras, principalmente leguminosas y gramíneas. De la encuesta de ESYRCE se observa como principal cultivo alfalfa, cuyo factor de vegetación está en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Duración de las etapas y factor de vegetación para cultivos de alfalfa y pastos

Datos	Etapa				Total	Cultivo
	Inicial	Desarrollo	Mediados	Final		
Duración (días)	10	30	25	10	75	Alfalfa
λ_p	0.4	-	0.95	0.90	-	
Duración (días)	10	20	60	90	180	Pastos de pastoreo
λ_p	0.4	-	0.9	0.85	-	

A partir de estos datos se calcula las medias mensuales para cada uno de los cultivos y finalmente la media mensual ponderado.

b) Factor de vegetación en superficies no cultivadas

- **Bosque caducifolio (CLC-311):** La superficie del suelo está ocupado por especies caducifolias que está caracterizada en detalle en el Inventario Forestal Nacional⁷ (IFN3), donde es posible determinar las especies predominantes como quercíneas y marcescentes. La característica de este tipo de vegetación hace necesario considerar la modulación de los factores de vegetación para representar el decaimiento de la cubierta vegetal, que presenta mínimos al final del periodo de invierno.

Tabla 4.7. Valores mensuales de factor de vegetación para caducifolios

λ_p	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Caducifolios	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8
Orlas	0.5	0.5	0.5	0.6	0.85	1.0	1.0	1.0	0.95	0.85	0.7	0.5

- **Bosque de coníferas (CLC-312):** El suelo está cubierto principalmente por bosque de coníferas de todos los tipos de cobertura presentes en la cuenca, con una cuarta parte de la extensión total. En el caso de pinares como sabinares la definición del coeficiente de vegetación resulta más sencilla que en otros usos forestales, debido al carácter perenne.

Tabla 4.8. Valores mensuales de factor de vegetación para bosques coníferas

λ_p	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Coníferas	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Coníferas de pequeño porte	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

- **Bosque esclerófila (CLC-323):** Suelo forestal dominado por especies arbóreas y matorral de pequeño porte con característica perenne. El más predominante es quercíneas

⁷<http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>

esclerófila. Se considera un factor de vegetación uniforme y unitario, para representar la cubierta perenne típica de los carrasales, pero para el acompañamiento arbustivo un carácter más estacional.

Tabla 4.9. Valores mensuales de factor de vegetación para bosque esclerófilo

λ_v	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Quercus esclerófilos	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Otros acompañantes	0.6	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.7	0.6

- **Pastizales naturales (CLC-321):** Los pastos naturales mediterráneos del piso meso y oromediterráneo están compuestos principalmente por leguminosas y gramíneas, siendo así, se puede aproximar su factor de vegetación por sus principales especies presentes.

Tabla 4.10. Valores mensuales del factor de vegetación para pastizales naturales

λ_v	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Leguminosas	0.4	0.4	0.5	0.75	0.95	0.9	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Gramíneas	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	0.85	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Otras	0.3	0.3	0.3	0.45	0.65	0.75	0.75	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3

c) **Factor de vegetación en clases de suelo heterogéneos**

- **Cultivos en mosaicos (CLC-242) y terrenos agrícolas con vegetación natural (CLC-243):** Los valores de factor de vegetación se obtiene previo la identificación de cultivo y vegetación en la cuenca de estudio. Posteriormente se multiplica los porcentajes de cada cultivo por los factores de vegetación, que se compone por un λ_v de mosaicos y cultivo con orlas naturales que intenta representar la propia heterogeneidad de los usos en la cuenca.
- **Bosque de transición (CLC-324):** La transición forestal se caracteriza por la mezcla de zonas claras y monte en formación. Para estimar su factor de vegetación se ha considerado la composición de los λ_v de pastos naturales, monte de coníferas y caducifolias. Finalmente se obtienen los valores intermedios entre uso forestal y los de terreno claro.

d) **Factor de vegetación para usos de suelo no vegetales**

- **Masas de agua (CLC-512):** Las masas de agua engloba ríos de caudal permanente y embalses. El factor utilizado para este uso en base a otros estudios relacionados a nuestra zona de estudio.

- **Suelo urbano (CLC-111):** De manera similar que, en el caso anterior, se ha considerado un valor de uno, constante durante todo el año por ser impermeable.
- **Roquedos (CLC-333):** Los roquedos no aparecen en los inventarios de uso de suelo, por tanto, se ha adoptado valores generales reflejados en las bibliografías aceptadas para este tipo de usos.

4.1.3.3. Abstracciones iniciales

Los procesos denominados abstracciones iniciales o pérdidas, se refieren a la intercepción de la lluvia por parte de la cubierta vegetal y el almacenamiento de agua en depresiones del terreno, los cuales se determinan en base al mapa de usos de suelo y pendiente del terreno. A continuación, se detalla la metodología adoptada para estimar cada uno de ellos en el modelo.

a) Intercepción máxima

La intercepción se refiere a la parte de la precipitación retenida por la cubierta vegetal y que se evapora directamente sin llegar al suelo. Los valores de intercepción máxima se obtuvieron de estudios previos y adaptados de acuerdo a los usos del suelo de la cuenca (Figura 4.7). Este parámetro se alimenta en el modelo TETIS, mediante un fichero de texto, juntamente con los factores de vegetación correspondiente a cada uso de suelo.

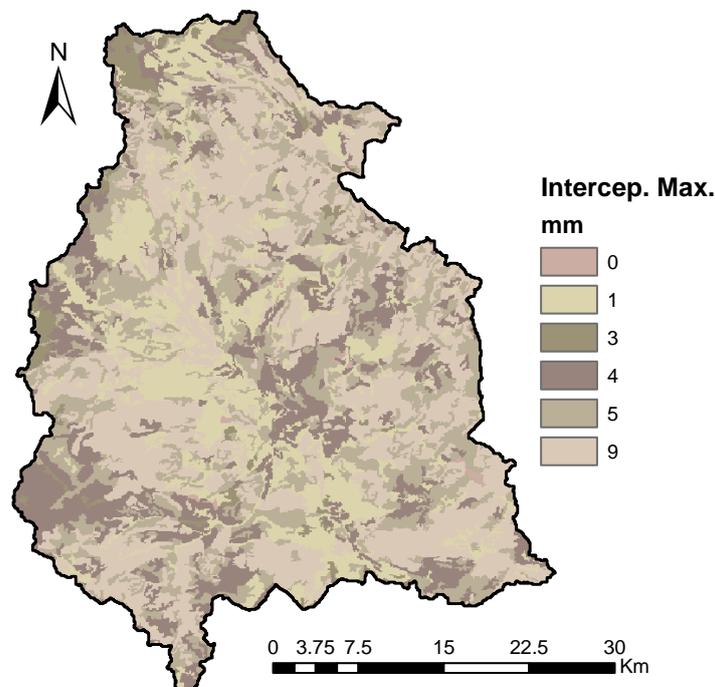


Figura 4.7. Mapa de intercepción máxima según cobertura de suelo en la cuenca del Alto Mijares

b) Almacenamiento superficial

Es la suma del almacenamiento en cubierta y almacenamiento en depresiones. Donde el primero está relacionado con el tipo de cubierta y el segundo con el pendiente del terreno.

En el caso de almacenamiento en depresión por pendiente, se ha realizado una modelización simple a partir del mapa de pendientes, asumiendo que los terrenos horizontales pueden almacenar como máximo 10 mm de lluvia; y a partir de este valor decrece en forma lineal, expresado mediante la siguiente ecuación (Francés et al., 2014).

$$A_{\text{depresión}} = 10 - 1.30S_o, \text{ si } S_o < 7.5\% \quad (4.7)$$

Donde el almacenamiento en depresión esta expresado en (mm), y S_o es pendiente del terreno en (m/m).

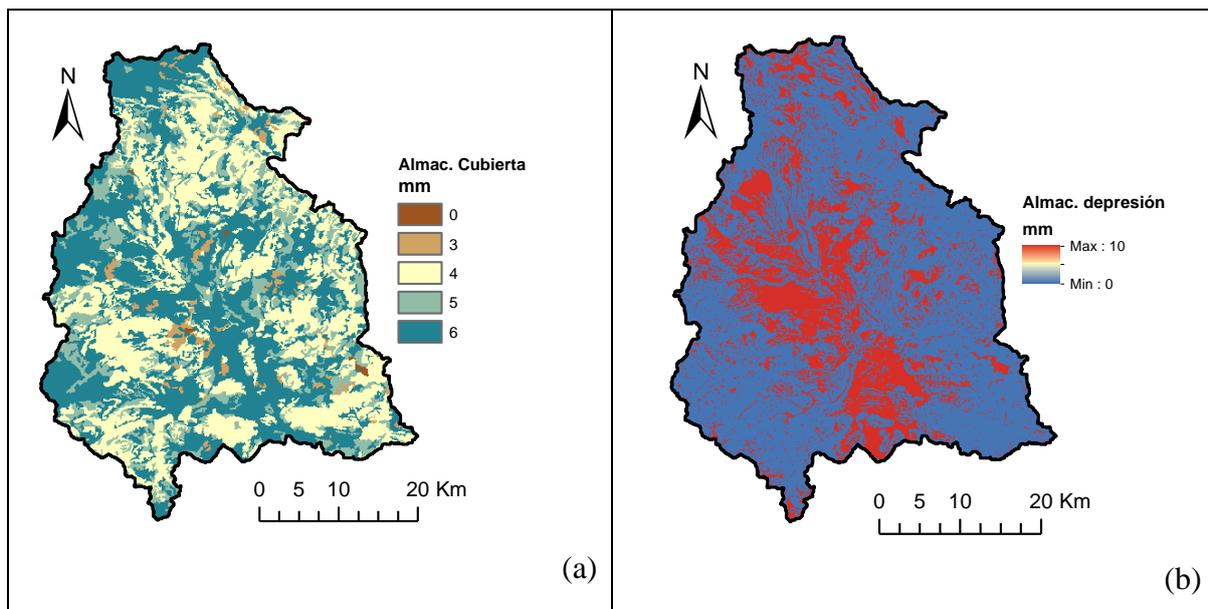


Figura 4.8. Mapas utilizados para estimar el almacenamiento superficial (a) almacenamiento en charco y (b) en depresión por pendiente del terreno

Finalmente en la Tabla 4.11, se muestra los valores de intercepción máxima y almacenamiento en la cubierta y profundidad de raíces, estimados para cada tipo de uso de suelo, los cuales fueron necesarios para calcular el almacenamiento máximo en tanque de cubierta vegetal y estático.

Tabla 4.11. Valores de intercepción, almacenamiento en cubierta y profundidad de raíces para los diferentes usos del suelo en la cuenca del Alto Mijares

Código	Uso de suelo	Intercepción máxima (mm)	Almacenamiento en cubierta (mm)	Profundidad de raíces (m)
111-142	Urbano	0	0	0.1
211	Cultivos de secano	1	6	0.8
212	Terrenos de regadío	1	6	0.5
222	Frutales	1	6	1.5
223	Olivar	1	6	1.0
231	Pasto artificial	3	6	0.6
242	Mosaico de cultivos	1	3	0.7
243	Cultivos y vegetación natural	5	6	0.75
311	Bosque caducifolio	9	4	1.0
312	Bosque de coníferas	9	4	1.25
313	Bosque mixto	9	4	1.0
321	Pastizales naturales	3	6	0.6
323	Bosque esclerófila	4	6	0.7
324	Bosque de transición	5	5	0.7
333	Roquedos	0	3	0.7
512	Masas de agua	0	0	0.0

4.1.3.4. Parámetros derivados del suelo

En este apartado se describe la metodología para obtener la distribución espacial de los parámetros hidráulicos del suelo y subsuelo, en base a la información disponible con que se cuenta para la zona de estudio.

a) Estimación de mapa de almacenamiento estático del suelo

También denominado almacenamiento capilar. Este parámetro está relacionado con la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo (H_u), se determinó a partir de la información cartográfica de la Base de Datos de Suelo Europeo (ESDB⁸), específicamente de los mapas de capacidad de agua disponible en la capa superior del suelo (AWC_{TOP}) y obstáculo de raíces (ROO), también adicional a esta información se requiere de mapas de almacenamiento superficial y profundidad de raíces, descrito en la sección 4.1.3.3; que esta reclasificado de acuerdo al tipo de uso de suelo y pendiente del terreno.

Luego de contar con la información mencionada, se superpone los mapas de ROO y profundidad de raíces, con la finalidad de escoger el valor mínimo de entre ambos. Como

⁸ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/>

siguiente paso se multiplica el mapa generado por el mapa AWC_TOP con la ayuda del herramienta ArcGIS, para finalmente sumar con el mapa de almacenamiento superficial y obtener la capacidad de almacenamiento del tanque estático (H_u), de acuerdo a la siguiente ecuación (4.8) propuesto por (Francés et al., 2014).

$$H_u = Alm. Sup. + AWC_TOP \times \min(Prof. raíces; ROO) \quad (4.8)$$

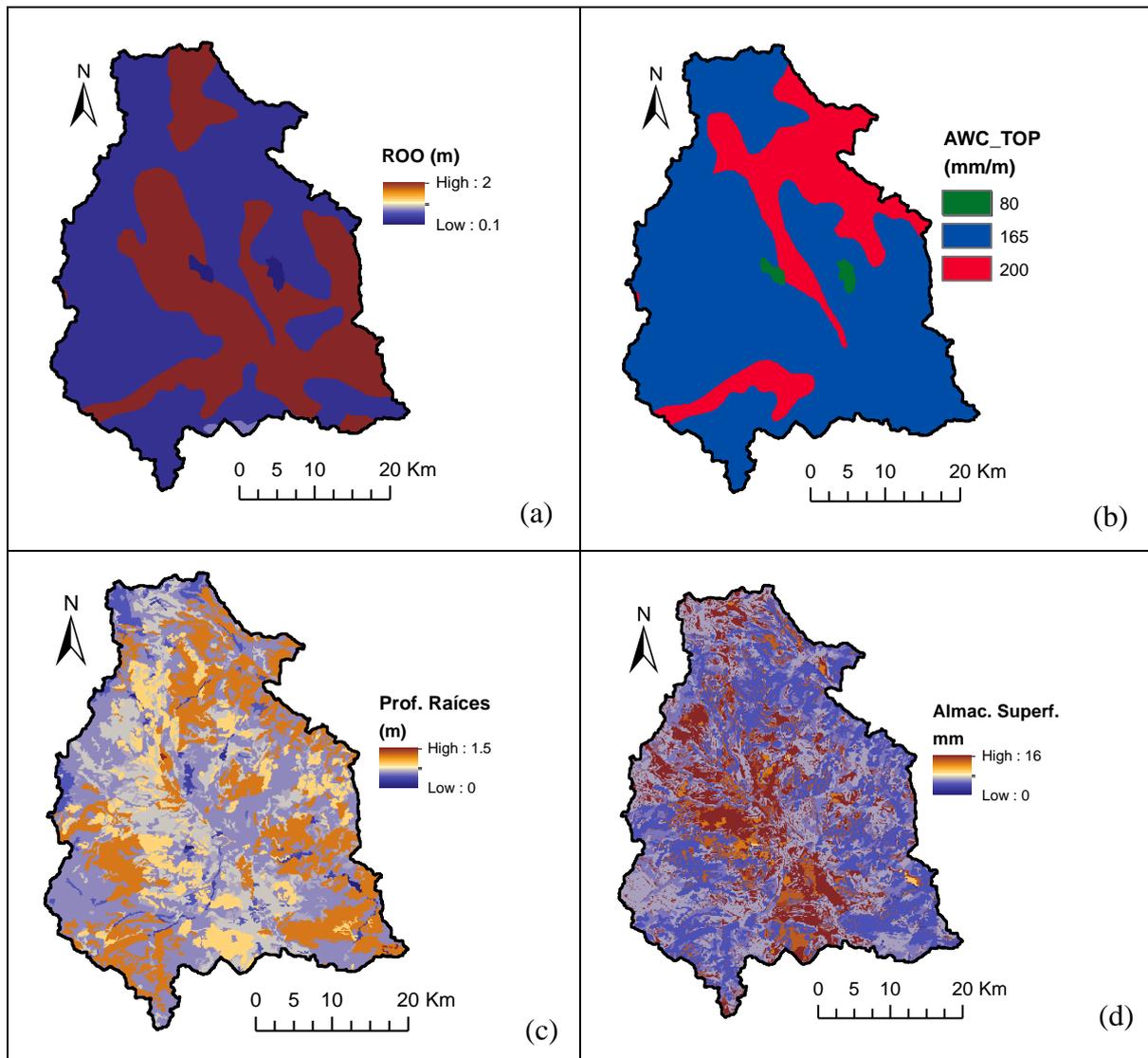


Figura 4.9. Mapas utilizados para estimar el almacenamiento estático: (a) Mapa de profundidad del suelo hasta alcanzar obstáculo, (b) Mapa de contenido de agua disponible, (c) Mapa de profundidad de raíces sin obstáculos y (d) Mapa de almacenamiento superficial

Luego de realizar la reclasificación de acuerdo a su valor medio dentro del rango de cada parámetro, se obtuvieron los mapas ilustrados en la Figura 4.9. En base a estos mapas se determinó el mapa de almacenamiento estático del suelo.

b) Estimación de mapa de capacidad de infiltración

El mapa de capacidad de infiltración del suelo saturado (K_s), se ha estimado a partir del mapa denominado textura superficial dominante (TEXT-SRF-DOM), obtenido de la Base de Datos de Suelo Europea (ESDB) y representado en la Figura 4.10. En esta capa los suelos están clasificados en seis categorías en función a su textura y tamaño medio de su granulometría, como se muestra en la Tabla 4.12.

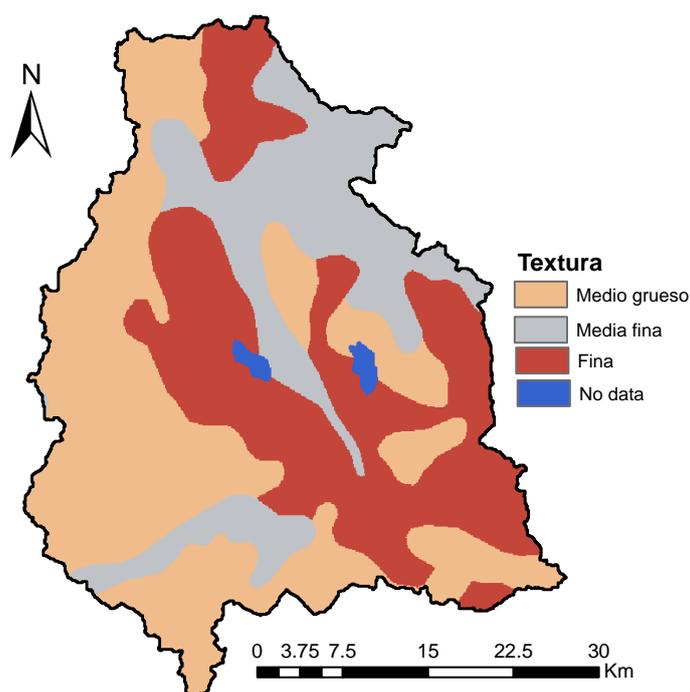


Figura 4.10. Mapa de textura superficial dominante derivado de ESDB

Tabla 4.12. Clasificación cualitativa y cuantitativa de la textura superficial dominante del suelo, obtenido de Centro de Datos de Suelo europeo (ESDAC)

Textura	Descripción
Textura no mineral	Suelos de turba
gruesa	Arcilla <18% y arena >65%
Media	Arcilla entre 18-35% y arena \geq 15%, ó arcilla <18% y arena entre 15-65%
Media fina	Arena <15% y arcilla <35%
Fina	Arcilla entre 35-60%
Muy fina	Arcilla >60%

Para estimar el parámetro de capacidad de infiltración gravitacional, se ha utilizado las funciones de pedotransferencia de (Saxton and Rawls, 2006), que permiten relacionar parámetros hidráulicos con algunas propiedades físicas del suelo como la textura y materia orgánica; y luego aplicando la metodología descrita por (Schaap and Van Genuchten, 2006), se han asignado valores a cada unidad cartográfica.

c) Estimación de mapa de capacidad de percolación

El mapa de capacidad de percolación (K_p) está caracterizado por la formación hidrogeológica de la cuenca. Para elaborar este mapa, se ha recurrido a la información del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), donde se dispone de información cartográfica de categorías cualitativas de permeabilidad del substrato rocoso a escala 1:200.000, y que está elaborado a partir del mapa Litoestratigráfico de España. En esta mapa se establecen cinco tipos de permeabilidad : Muy Alta (MA), Alta (A), Media (M), Baja (B), Muy baja (MB); y siete grupos de distintas litogías: Carbonatadas (C), Detríticas (D), Detríticas del cuaternario (Q), Volcánicas (V), Metadetríticas (M), Ígneas (I) y Evaporíticas (E), tal como se puede ver en la Figura 4.11; según la clasificación para la cuenca de estudio.

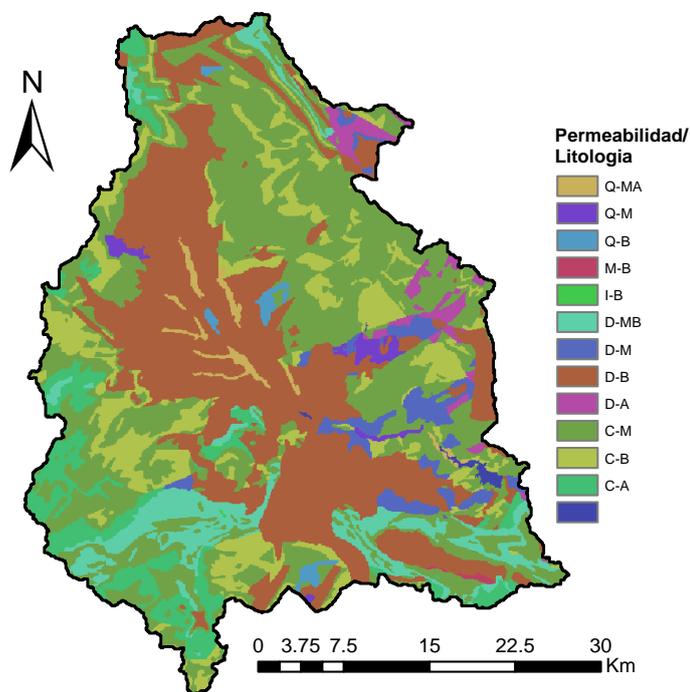


Figura 4.11. Mapa de permeabilidad y litoestratigrafía de la cuenca del Alto Mijares (IGME)

Para determinar la permeabilidad del substrato rocoso, se ha usado el mapa de permeabilidad y litoestratigrafía representado en Figura 4.11. A partir de esta clasificación se ha recurrido al

informe de modelación hidrológica de las cuencas vertientes de la Comarca de la Marina Alta (IIAMA, 2013), donde se asigna valores modales de acuerdo al tipo de material predominante a cada una de las formaciones cartografiadas. Posteriormente, estos valores de percolación han sido calibrados en su trabajo de fin máster de (Rios, 2017) en base a la investigación de (Puricelli, 2003) para todo el ámbito de la cuenca Júcar; por lo que en este trabajo se parte a partir de dichos parámetros, definiendo según la clasificación hidrogeológica de la zona de estudio. Sin embargo, en la cuenca del Alto Mijares los fenómenos kársticos juegan un rol fundamental en el ciclo hidrológico. Por esta razón se ha elaborado un mapa de localización de zonas potencialmente kársticas, de acuerdo a la metodología descrita en el siguiente apartado.

Por otro lado, para estimar los parámetros de conductividad hidráulica del interflujo (K_{ss}), conductividad hidráulica del flujo base (K_{sa}) y capacidad de pérdidas subterráneas (K_{ps}), no se tiene información, por lo que una buena aproximación es relacionar con los mapas predeterminados anteriormente de la siguiente manera: $K_{ss}=K_s$, $K_{sa}=K_p$ y $K_{ps}=0.1K_p$. La estructura separada de estos parámetros en el modelo TETIS, permite la calibración a través de cinco factores correctores diferentes para cada mapa.

4.1.3.5. Implementación de fenómenos kársticos en la zona de estudio

Para representar los fenómenos kársticos, en primer lugar, se hace la identificación de las zonas kársticas y, en segundo lugar, plantear una metodología para conectar las áreas de recarga del karst con los manantiales situados fuera de los límites de esa área. A pesar de que en la cuenca de estudio se cuenta con información cartográfica de zonas karst a una escala de 1M (Figura 3.13), no es suficiente debido a su escala muy grande que no permite representar de manera adecuada los procesos kársticos en el acuífero. Por lo tanto, en este trabajo se optó por implementar mediante la metodología descrita en el informe de (IIAMA, 2013). Para ello, se ha elaborado una mapa de localización de zonas potencialmente kársticas a partir de la información geológica de IGME, reclasificando a través del uso de SIG a las zonas de rocas carbonatadas con permeabilidad muy alta, alta y media como zonas con presencia de karst (Figura 4.12).

A partir del mapa de zonas kársticas elaborado en este estudio se ha redefinido los siguientes mapas:

- Los mapas de H_u , K_{sa} , K_s y de K_{ss} no se han modificado.

- El mapa de permeabilidad del sustrato (K_p), estimado anteriormente, fue modificado sumando un valor de 100.000 mm/h en las zonas kársticas, con la finalidad de que todo el flujo que llegue al tanque del acuífero kárstico pueda ser conducido al flujo subterráneo profundo, lo que finalmente representará la descarga en los manantiales mediante la aplicación de un modelo unicelular, ya que éstos manantiales no se encuentran aguas abajo de la estación Terde, como se observa en la Figura 4.12.
- De la misma manera para el parámetro de capacidad de flujo subterráneo profundo (K_{ps}), se ha utilizado el mapa corregido de K_p , con la finalidad de redireccionar el flujo en las zonas kársticas.

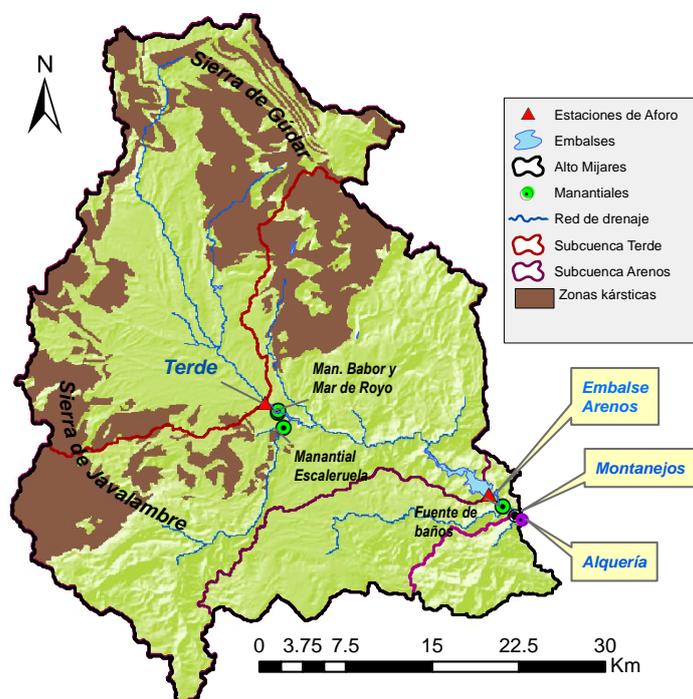


Figura 4.12. Localización de las zonas kársticas en la cuenca del Alto Mijares

La determinación del área de recarga de los manantiales kársticos derivan de un proceso iterativo de prueba y error, utilizando como referencia los comportamientos hidrológicos y los hidrogramas observados en las estaciones de aforo, expuestas en la sección 3.3. y el informe de la MASb de Javalambre Oriental (CHJ, 2008) donde se dispone de datos de aforos de los manantiales mencionados.

4.1.3.6. Parámetros geomorfológicos en la red de cauces

El modelo TETIS emplea para la propagación de la escorrentía en la red de drenaje, nueve parámetros geomorfológicos, estos relacionan la geometría y rugosidad de la sección

transversal del mismo, con el área de drenaje de la cuenca hasta la celda considerada mediante las relaciones algebraicas de tipo potencial. La información de los valores de los coeficientes y exponentes se obtienen normalmente a través de estudios regionales para zonas con características geomorfológicas homogéneas. En caso de no disponer con esta información, se recomienda utilizar los valores medios de la literatura (Vélez, 2003).

Para este estudio, se ha trabajado con los valores del estudio de la cuenca del Tajo (DIHMA, 2001) por presentar características hidrológicas similares al cuenca de estudio. Estos valores representados en la Tabla 4.13 fueron utilizados en el modelo, tanto para cárcavas y cauces.

Tabla 4.13. Valores adoptados de parámetros geomorfológicos para la cuenca de estudio(DIHMA, 2001)

Relación	Coeficiente		Exponente	
Q_b vs Λ	k	1.2968	φ	0.7571
w_b vs Q_b	c_1	3.1301	ε_1	0.5088
w_t vs Q_t	-	-	ε_2	0.3253
d vs $(y \cdot s_o)$	c_d	6.5156	θ	0.6548
n vs d	c_n	0.047	ξ	0.1667

4.1.4. Calibración del modelo TETIS

La calibración consiste en la estimación de los parámetros que representen mejor la realidad mediante la comparación de las predicciones con los datos observados. Sin embargo, la desventaja de los modelos conceptuales consiste en el concepto de equifinalidad (Beven and Freer, 2001), es decir, la existencia de conjunto de parámetros del modelo con los que se puede obtener similares medidas de ajuste. Pero en la actualidad existen técnicas de calibración con una análisis detallado de la estructura del modelo y de la incertidumbre de los parámetros que permiten reducir este problema (Ocampo and Vélez, 2014).

En el modelo TETIS la estructura de los parámetros efectivos están separados, tal es así que el valor efectivo en una celda de un parámetro determinado, es el resultado de la multiplicación del valor del mapa correspondiente estimado inicialmente, por un factor corrector que es común para todas las celdas (Francés, Vélez, and Vélez, 2008). Por lo tanto, el número de variables que se han de calibrar se reduce solamente a nueve factores correctores (FCs), seis valores

iniciales de las variables de estado y un coeficiente β que introduce la variabilidad espacial de la precipitación incorporando el efecto orográfico, Tabla 2.1. Facilitando de esta manera la etapa de calibración del modelo. Antes de calibrar se realizó un análisis de sensibilidad univariado para identificar los FCs más influyentes. En primer momento estos fueron calibrados manualmente, y en segunda instancia los FCs más sensibles fueron optimizados automáticamente, mediante el algoritmo SCE-UA. Los mejores FCs de calibración fueron seleccionados basados en el análisis gráfico y los parámetros estadísticos.

Los parámetros estadísticos evaluados son: El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), error en el volumen (VE), error cuadrático medio (RMSE) y la interpretación física de dichos parámetros. La metodología para calcular cada uno de estos parámetros se explica en la sección 2.2.3.

4.1.5. Calibración del modelo unicelular y validación de TETIS

Luego de haber logrado una calibración satisfactoria, se evaluó nuevamente el ajuste del modelo en escenarios distintos, para un nuevo set de variables de entrada y salida, sin ajustar los FCs previamente calibrados, es decir, se validó el modelo a nivel temporal, espacial y espacio-temporal. Además, la validación de la consistencia final de los parámetros y de los resultados obtenidos se efectuó mediante la observación de las curvas de duración de caudales.

Antes de realizar la validación del modelo TETIS primero se determinó las descargas de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo, las cuales descargan aguas abajo de la estación Terde al río Mijares. Para ello, se implementa un modelo unicelular para determinar dichas descargas, asumiendo como fuente de recarga el flujo subterráneo profundo obtenido del modelo Tetis en las zonas kársticas. Asimismo, se realiza la calibración de este modelo conjuntamente con el hidrograma obtenido de la simulación con el modelo TETIS, mediante una hoja de cálculo, utilizando la función solver del programa Excel, ya que el caudal observado en la estación Arenós es la suma del hidrograma simulado más el aporte de los manantiales. De esta manera resulta a la vez la validación espacial del modelo Tetis, incluyendo los flujos kársticos. Finalmente, se realiza la validación espacio-temporal con el hidrograma integrado en el periodo comprendido entre enero de 1994 hasta marzo del 2008, evaluando en todo momento mediante los parámetros estadísticos.

4.1.6. Simulación en Montanejos

Luego de haber comprobado la bondad de ajuste de los dos modelos implementados hasta la estación Arenós. Se extrapolan los parámetros y factores correctores óptimos para predecir la descarga del manantial termal Montanejos para el periodo (Oct.1986-Sept.2006), periodo en el cual fue establecido el régimen del caudal ecológico en el tramo comprendido entre el embalse Arenós y azud Huertacha. La zona de recarga de este manantial termal es la cuenca intermedia Montanejos, comprendido entre el embalse Arenós y el punto de desagüe Alquería, y que está conformado principalmente por las subcuencas la Maimona y el Montán, tal como se puede ver en la Figura 4.12. Esta hipótesis fue corroborada in situ, mediante una caracterización geológica e hidrológica. En donde se pudo observar que los ríos de las dos subcuencas se clasifican como efímeros. No obstante, en el río Montán se observa un flujo base hasta el tramo intermedio, a partir del cual se infiltra para luego aflorar por medio del manantial en estudio, favorecido por la formación geológica con permeabilidad alta con gradiente hidráulico hacia el manantial termal, como se puede ver en la Figura 4.13.



Figura 4.13. A la izquierda se observa el río Montán en la confluencia con el río Mijares y a la derecha el flujo base en el tramo intermedio.

Por su parte el río Maimona aparte de ser efímero se caracteriza por tener una mala calidad, por poseer un alto contenido de materia orgánica a la salida del cauce, producto del vertido de aguas residuales de los municipios aguas arriba. Por lo que se observa a la salida un río eutrofizado con bastante presencia de algas (Figura 4.14).

De esta manera queda demostrado que la recarga es proveniente de las dos subcuencas, descargando específicamente en el tramo comprendido entre el embalse Cirat y el río Maimona, hecho que fue contrastado mediante aforos y medición de conductividad eléctrica a lo largo del tramo de estudio.

Por lo tanto, para determinar la descarga del manantial termal Montanejos, primero se simuló las recargas del acuífero mediante el modelo Tetis, que en este caso se denomina como flujo subterráneo profundo; luego de esto, se aplica el modelo unicelular para determinar la descarga en base a los parámetros calibrados y la recarga previamente estimada.

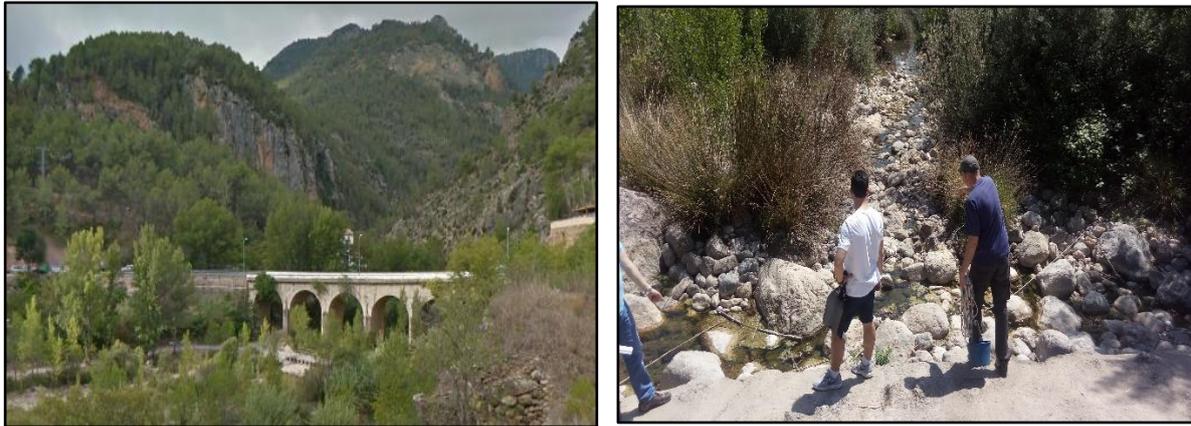


Figura 4.14. Vista panorámica a la salida del río Maimona en confluencia con el río Mijares

4.2. MODELACIÓN DE TEMPERATURA DEL RÍO CON SSTEMP

Para modelar la temperatura del río Mijares en el tramo Montanejos, se utilizó el modelo SSTEMP, para simular la variación de la temperatura media del agua durante las cuatro estaciones del año y a lo largo del tramo de estudio para diferentes escenarios.

El modelo está basado principalmente para calcular el calor ganado o perdido de una parcela de agua a medida que el flujo pasa a través de cada segmento. Esto se logra al simular los diversos procesos de flujo de calor que determinan el cambio de temperatura (Figura 2.7). El flujo de calor neto se calcula como la suma de calor hacia o desde la radiación atmosférica de onda larga, radiación solar de onda corta, convección, conducción, evaporación, vegetación de ribera (sombreado), fricción del fluido del lecho y la radiación reflejada del agua. El modelo SSTEMP primero calcula la radiación solar y cuánto es interceptada por el sombreado. Esto es seguido por los cálculos de los componentes de flujo de calor restantes para el segmento de flujo. El modelo tiene la opción de estimar la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera terrestre, sino se puede introducir directamente a partir de otra fuente de información. Esta radiación pasa a través de los efectos atenuantes de la atmósfera y es reflejada en la superficie del agua en función del ángulo de incidencia del sol. Para el sombreado, SSTEMP calcula la duración del día considerando los tiempos de salida y puesta del sol teniendo en cuenta la topografía local Este y Oeste. Por lo tanto, la topografía local produce una disminución

porcentual en el nivel de horas de luz natural. A partir de este amanecer / ocaso local, el programa determina el porcentaje de luz que filtra la vegetación riparia. Este filtrado es el resultado del tamaño, la posición y la densidad de la vegetación de sombra en ambos lados de la corriente (Bartholow, 2010). Los datos requeridos por el modelo se observa en la Figura 4.15.

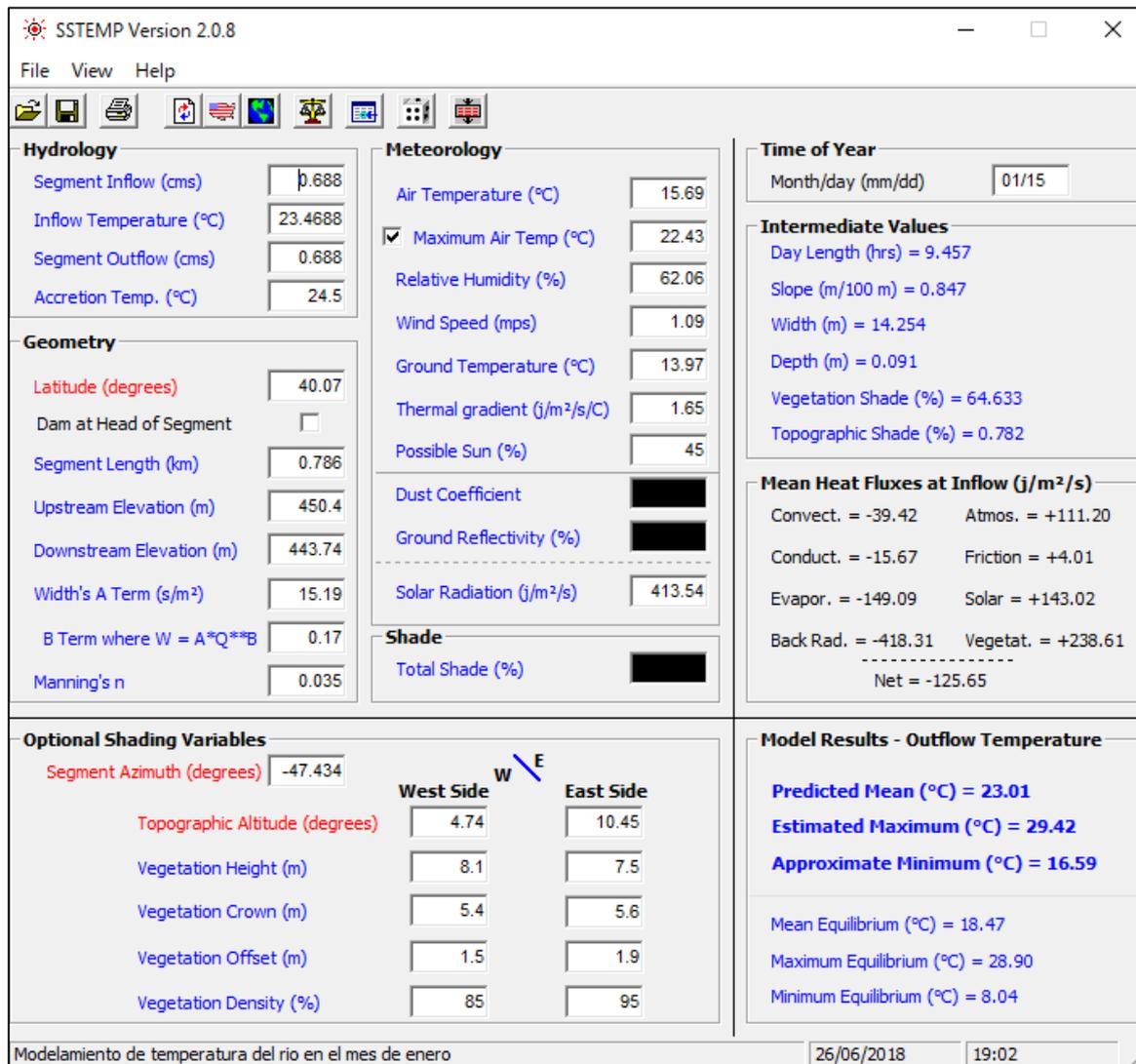


Figura 4.15. Interfaz de trabajo del modelo de temperatura SSTEMP

Para mayor información acerca de la aplicación y fundamento teórico del modelo SSTEMP se puede consultar (Bartholow, 2002; Theurer, Voos, and Miller, 1984).

4.2.1. Variables meteorológicas

El modelo SSTEMP es un modelo mecánico de transporte de calor unidimensional que predice las temperaturas medias y máximas del agua en función de la distancia del cauce y el flujo de calor ambiental; por lo que requiere una serie de datos para la simulación. Las variables meteorológicas necesarios para la modelación son: radiación solar, velocidad de viento, humedad relativa, temperatura del terreno, gradiente térmico y horas de sol.

Para la estimación de temperatura del terreno y temperatura de entrada del agua desde el embalse Cirat, se utilizó la temperatura media anual y mensual del aire, respectivamente. Esto de acuerdo a la recomendación de (Bartholow, 2002), ya que no se dispone de registros históricos en la zona de estudio.

Por otra parte, la temperatura del flujo de entrada lateral del manantial termal es 24.4 °C durante todo el año, según mediciones realizadas in situ (Figura 4.16).



Figura 4.16. Medición de temperatura del manantial termal Montanejos in situ

Por último, tenemos el gradiente térmico, que es la tasa de entrada o salida térmica del lecho del río al agua. En caso de no contar con la información se puede usar un valor predeterminado de 1.65 (J/m²/s/°C), según (Bartholow 2002), independientemente del sistema de medida utilizado.

En la Tabla 4.14 se muestra el resumen de las siguientes variables meteorológicas de entrada al modelo.

Tabla 4.14. Resumen de datos meteorológicos para el tramo de estudio

Mes	Temp. de aire(°C)	HR (%)	Velocidad de viento (m/s)	Temp. de terreno (°C)	Gradiente térmico (J/m2/s/ °C)	Horas de Sol (%)	Rs(J/m2/s) FAO
Ene	6.64	71.24	1.09	13.97	1.65	45.7	156.25
Feb	7.51	66.94	1.10	13.97	1.65	45.4	212.50
Mar	9.96	63.53	1.20	13.97	1.65	45.0	283.33
Abr	11.58	62.53	1.17	13.97	1.65	42.0	361.46
May	15.69	62.06	1.09	13.97	1.65	45.0	413.54
Jun	20.24	60.18	1.00	13.97	1.65	50.0	436.46
Jul	22.67	58.35	0.99	13.97	1.65	60.0	425.00
Ago	22.64	61.29	1.02	13.97	1.65	55.0	382.29
Sep	18.61	65.65	0.98	13.97	1.65	47.0	312.50
Oct	14.71	69.94	1.01	13.97	1.65	46.5	234.38
Nov	9.77	70.82	1.02	13.97	1.65	45.0	169.79
Dic	7.22	72.71	1.09	13.97	1.65	48.0	141.67

4.2.2. Variables hidrológicas

Las variables hidrológicas están referidas al caudal de descarga del manantial termal Montanejos, que previamente ha sido obtenido de la modelación hidrológica correspondiente al periodo (oct.1986-sept.2006). Asimismo, es necesario disponer de datos de temperatura a la salida del embalse Cirat y del propio manantial termal, para poder realizar la modelación para los diferentes escenarios.

En la Tabla 4.15 se observan las descargas medias diarias mensuales del manantial termal, el caudal ecológico establecido para el tramo de estudio y el caudal complementario en el caso de que la descarga del manantial sufra una reducción importante hasta llegar a su capacidad mínima de descarga, que viene a ser 0.24m3/s, para el periodo de referencia líneas arriba. Por tanto, en base a estos caudales se plantean tres escenarios distintos.

En el primer escenario se realiza la simulación solo considerando la descarga del manantial termal. Mientras que en el segundo caso, con las sueltas del caudal ecológico establecido desde el embalse Cirat y finalmente para compensarla descarga del manantial para una probabilidad de ocurrencia de 100%, que es un caso de situación de emergencia o sequía prolongada.

Tabla 4.15. Datos hidrológicos y térmicos del manantial Montanejos y embalse Cirat

Mes	Manantial Montanejos		Embalse Cirat		
	Q _{man} Esc.1 (m ³ /s)	Temperatura de salida (°C)	Q _e Esc.2 (m ³ /s)	Q _{comp} Esc.3 (m ³ /s)	Temperatura de entrada (°C)
Ene	0.65	24.4	0.4	0.16	6.64
Feb	0.66	24.4	0.4	0.16	7.51
Mar	0.65	24.4	0.4	0.16	9.96
Abr	0.65	24.4	0.4	0.16	11.58
May	0.67	24.4	0.4	0.16	15.69
Jun	0.68	24.4	0.4	0.16	20.24
Jul	0.67	24.4	0.4	0.16	22.67
Ago	0.64	24.4	0.4	0.16	22.64
Sep	0.62	24.4	0.4	0.16	18.61
Oct	0.61	24.4	0.4	0.16	14.71
Nov	0.62	24.4	0.4	0.16	9.77
Dic	0.63	24.4	0.4	0.16	7.22

La descarga del manantial termal, se asignó con una hipótesis lineal a lo largo del segmento uno al seis. Esto de acuerdo a la caracterización hidrogeológica y contrastación mediante aforos a lo largo del tramo de estudio, sin la suelta de embalse Cirat (Figura 4.17). Además, estos aforos sirvieron también para validar los resultados obtenidos en la simulación de la descarga del manantial termal de Montanejos.



Figura 4.17. Vista fotográfica de aforo del río Mijares en el tramo final de Montanejos

4.2.3. Variables geomorfológicas e hidráulicas del cauce

Las características geomorfológicas del cauce (longitud, elevación y sección transversal) se han obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), que tiene una resolución espacial de 5x5m, y fue obtenido desde la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en formato ráster (Figura 4.18). Las secciones transversales son necesario para determinar la elevación promedio sobre el nivel del mar y las pendientes de cada segmento del cauce.

Además, la elevación se utiliza para determinar la presión atmosférica y las correcciones meteorológicas adiabáticas por el modelo.

El intercambio de calor entre el agua y el entorno es una función de la superficie de la lámina de agua. Por lo tanto, los cambios significativos en los anchos de flujo promedio son indicadores de los cambios necesarios en las definiciones del tramo de flujo.

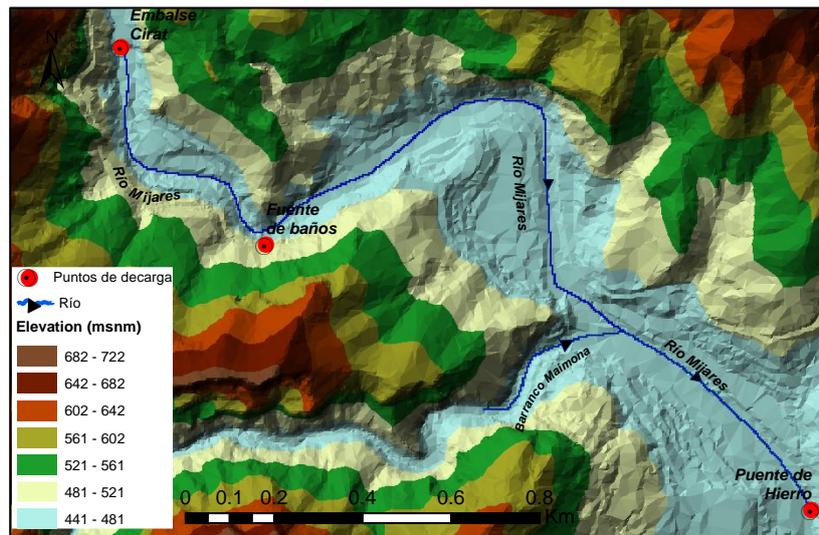


Figura 4.18. Modelo digital del terreno del tramo Montanejos

Para determinar el ancho medio del cauce en función del caudal, se ha utilizado el modelo hidráulico Iber. Para ello, primero se generó la malla de la geometría del cauce a partir del modelo digital del terreno, utilizando la metodología RTIN (Figura 4.19), que consiste en discretizar la superficie del terreno en triángulos rectángulos isósceles, hasta que todos los triángulos formen una superficie similar al terreno con una precisión requerida.

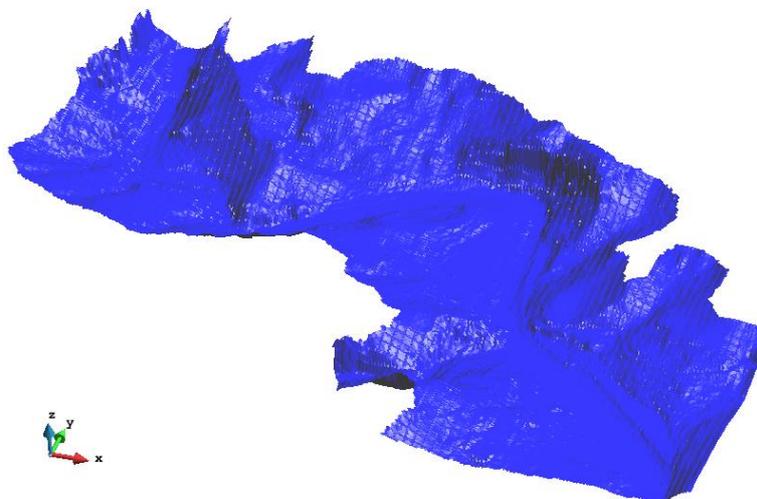


Figura 4.19. Malla de cálculo formado por una red Irregular de Triángulos Rectángulos (RTIN)

Una vez generada la malla, se asignan las condiciones de contorno de entrada y salida. En la entrada, se asignó un caudal constante para un régimen subcrítico, y a la salida una condición de flujo supercrítico. Además, se definió una condición inicial en estado seco y el coeficiente de rugosidad de Manning en función del uso de suelo (Figura 4.20), el cual ha sido determinado de la tabla de (Chow, 1994) . Una vez definido estas condiciones se procedió a correr el modelo para un tiempo de simulación de cinco horas, con un intervalo de informe de resultados cada diez minutos para diferentes escenarios.

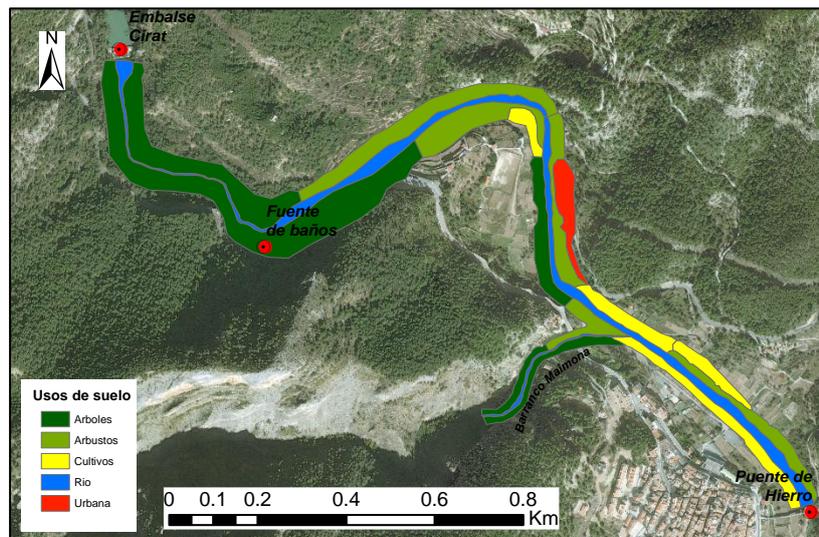


Figura 4.20. Usos del suelo del tramo de estudio para asignación de coeficiente Manning

Después de realizar la simulación para diferentes caudales en régimen estacionario, se obtuvieron los diferentes anchos mojados en cada segmento del tramo de estudio. A partir de estos valores obtenidos, se estimó el coeficiente A y el exponente B de la ecuación $W=AQ^B$ ajustando a una regresión de tipo potencial. Finalmente, la geometría del cauce será representado mediante esta ecuación en el modelo SSTEMP.

Para mayor información del modelo Iber se puede consultar en (Bladé et al., 2014).

4.2.4. Variables de sombra

El módulo de sombra contiene la información necesaria para ejecutar el modelo de sombra al mismo tiempo que el modelo de temperatura. Los valores de sombra producidos por el modelo SSTEMP se utilizan para calcular el efecto de sombreado ribereño y topográfico sobre la temperatura del agua. El modelo de sombra requiere datos de pendiente transversal del cauce, el azimut del segmento del río, el ancho del cauce y los parámetros vegetativos como la altura

promedio de vegetación, corona promedio de vegetación, distancia desde el borde del agua hasta la vegetación y densidad de la vegetación. Estos valores se muestran en la Tabla 4.16 para el lado Oeste de cada uno de los segmentos del cauce.

Tabla 4.16. *Parámetros para estimar sombra por efecto de la vegetación y topografía del terreno al lado oeste del cauce*

LADO OESTE						
Tramo	Azimut(°)	Altitud topográfica (°)	Altura de vegetación (m)	Corona de vegetación (m)	Distancia de vegetación (m)	Densidad de la vegetación (%)
1	6.136	13.801	9.5	3.6	0.8	90
2	-71.571	13.913	6.4	2.5	0.9	85
3	17.655	12.394	5.6	1.5	3.5	70
4	-65.072	8.449	3.6	2.6	2.5	50
5	-65.072	7.032	6.2	4.5	2.0	90
6	4.047	5.396	12.0	6.2	0.5	95
7	-47.434	4.745	8.1	5.4	1.5	85

De la misma forma se tiene para el lado Este del cauce, representados en la Tabla 4.17. A partir de estos datos el modelo SSTEMP determina el porcentaje de sombra total para cada uno de los segmentos.

Tabla 4.17. *Parámetros para estimar la sombra por efecto de vegetación y topografía del terreno, al lado este del cauce*

LADO ESTE						
Tramo	Azimut(°)	Altitud topográfica (°)	Altura de vegetación (m)	Corona de vegetación (m)	Distancia de vegetación (m)	Densidad de la vegetación (%)
1	6.136	11.934	8.3	4.1	0.8	92
2	-71.571	8.746	7.3	3.0	1.2	80
3	17.655	31.598	6.8	2.0	3.0	65
4	-65.072	29.447	3.1	3.5	2.0	55
5	-65.072	8.253	5.5	4.5	1.0	95
6	4.047	9.012	12.5	7.0	0.9	95
7	-47.434	10.448	7.5	5.6	1.9	95

Estos parámetros serán calibrados en función a las temperaturas medias observadas a lo largo del tramo de estudio.



CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. ANÁLISIS DE SERIES METEOROLÓGICAS

5.1.1. Precipitación

En la Figura 5.1 se muestra la tendencia de la precipitación anual con la altitud, donde al lado izquierdo se representa la correlación muy baja sin aplicar el factor orográfico, mientras que al lado derecho después de haber corregido por el factor orográfico obtenido de la calibración con el modelo Tetis, el valor R^2 es de 0.88, lo que nos indica que el efecto orográfico explica en 87.67% la correlación entre precipitación anual y la altitud, mejorando de esta manera en el balance del recurso hídrico en la cuenca.

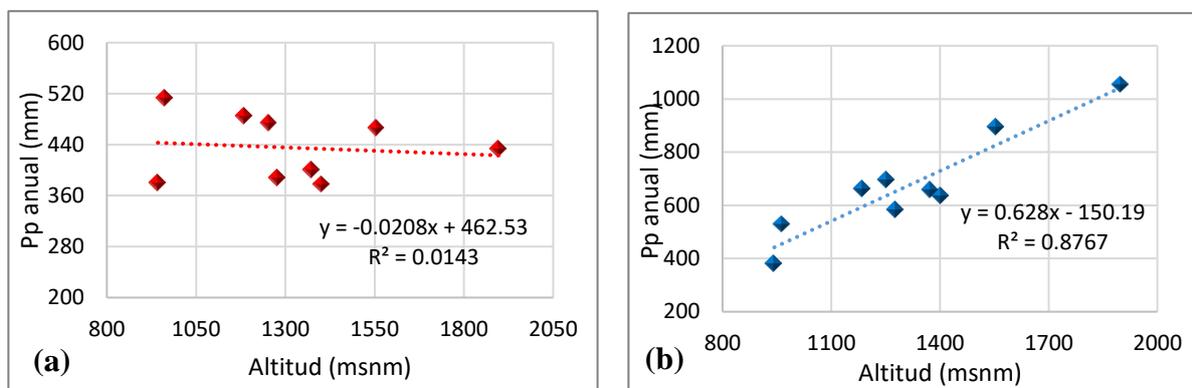


Figura 5.1. Tendencia de la precipitación anual con la altitud (a) Sin corrección (b) con corrección por factor orográfico

Antes de aplicar el factor orográfico, se observó una infraestimación de valores de precipitación en las partes altas de la cuenca, debido a la baja densidad de pluviómetros de AEMET en estas zonas; tal como se puede observar en la Figura 5.2; y por consiguiente había una subestimación en el balance hídrico medio de la cuenca. Sin embargo, luego de corregir por el factor orográfico se logró obtener una mejor representación de la precipitación a nivel espacial y temporal, tal como se puede ver en la Figura 5.3, donde la precipitación media anual correspondiente al periodo de enero de 1991 a diciembre del 2007 tiene una correlación lineal con la altitud.

La información ha sido interpolada por el método de IDW para generar campos de precipitación en ambos casos; obteniéndose valores por encima de 620mm en las partes altas de la cuenca luego de la corrección por el efecto orográfico.

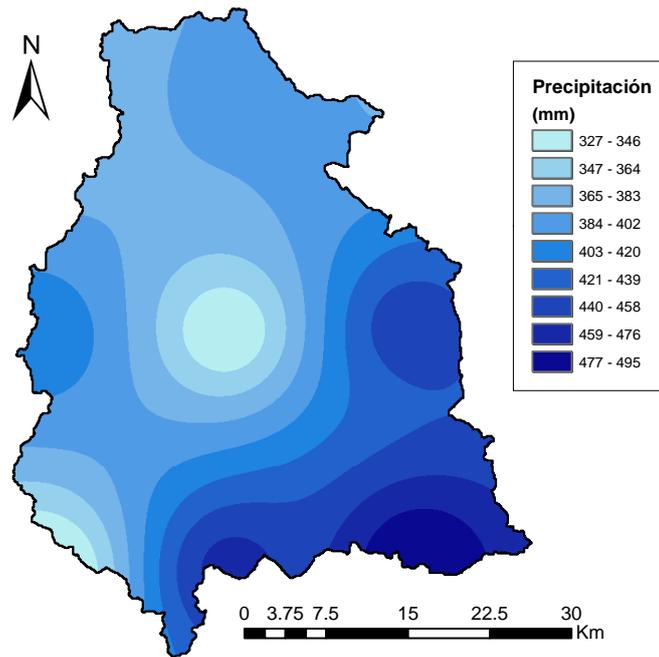


Figura 5.2. Mapa precipitación media anual sin corregir por el factor orográfico

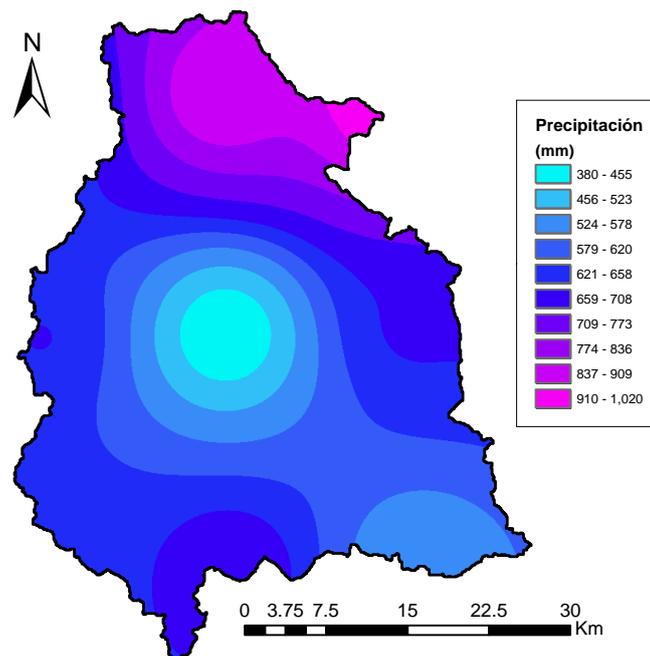


Figura 5.3. Mapa de precipitación media anual después de corregir con el factor orográfico

5.1.2. Evapotranspiración de referencia

El mapa de evapotranspiración de referencia ha sido construido por el método de interpolación IDW, correspondiente al mismo periodo de la precipitación. En la Figura 5.4 se observa los valores medias anuales de evapotranspiración de referencia para la cuenca del Alto Mijares, obtenidos por el método de Hargreaves.

Asimismo, en la Figura 5.4 se aprecia que la mayor evapotranspiración se registró al Sureste de la cuenca, alcanzando un valor medio de 1,117mm. Mientras que los valores mínimos se encuentran al Norte y al Suroeste, con un rango de valores que están entre 958mm y 994mm, respectivamente. De esta manera podemos notar que la evapotranspiración tendrá mayor incidencia en las partes bajas, y como consecuencia repercutirá en el balance hídrico promedio de la cuenca.

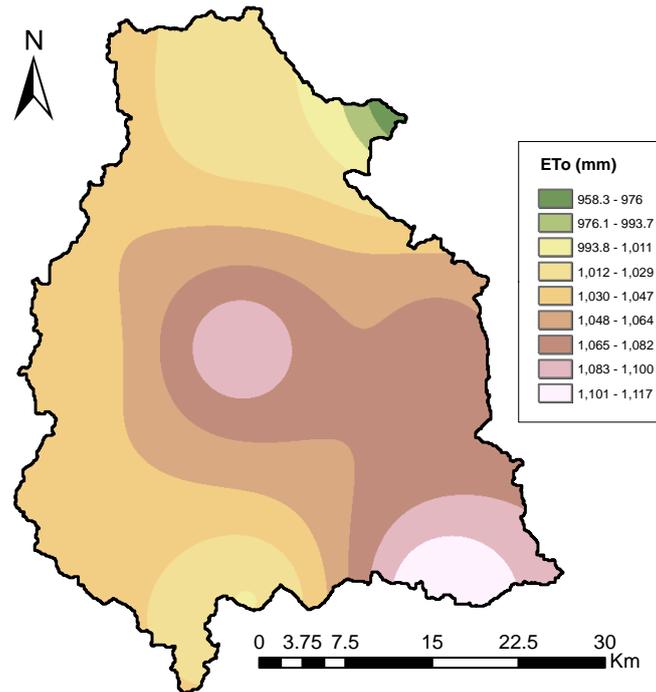


Figura 5.4. Mapa de evapotranspiración de referencia media anual en la cuenca Alto Mijares para el periodo 1991-2008

Por otro lado, tenemos la evapotranspiración de referencia media mensual, que varía entre los valores en torno a 184mm en el mes de Julio y apenas 28mm en el mes de diciembre, y está muy caracterizado por el clima mediterráneo, con valores altos en la época de verano y mínimos en la estación invierno, como se puede ver en la Figura 5.5.

En el Anejo se adjunta los datos hidrometeorológicos utilizados en la modelación hidrológica a paso diario, tanto para la calibración y validación.

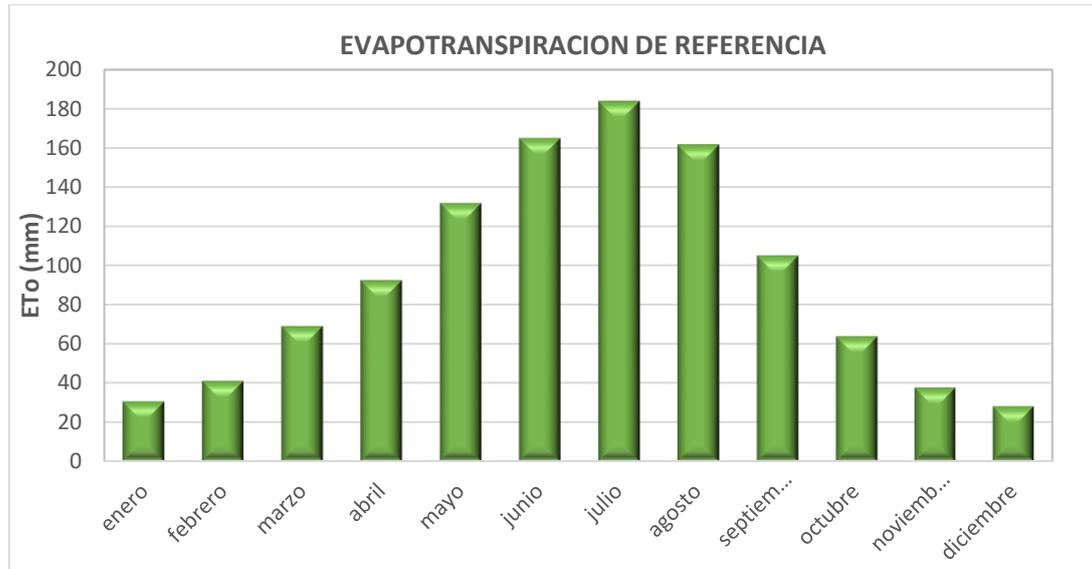


Figura 5.5. Evapotranspiración de referencia mensual para la cuenca del Alto Mijares

5.1.3. Temperatura

Al igual que las demás variables meteorológicas, la temperatura del aire también está influenciado por la altitud en la cuenca del Alto Mijares. La temperatura media anual esta entre 8 y 10 °C en las partes altas de la cuenca, mientras que en la parte central está sobre los 11 °C. Asimismo, se observa temperaturas medias máximas en parte baja, llegando a registrar hasta un valor de 13 °C aproximadamente, tal como se observa en la Figura 5.6.

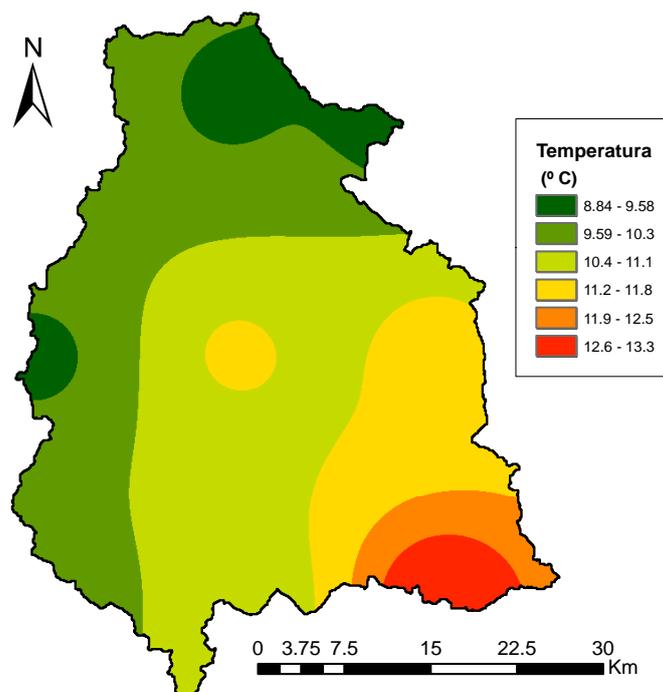


Figura 5.6. Mapa de temperatura media anual en la cuenca del Alto Mijares

5.2. PARÁMETROS FÍSICOS DEL MODELO TETIS

Estos mapas fueron obtenidos a partir de la información disponible de las características físicas de la cuenca y utilizando como herramienta de trabajo SIG, para el procesamiento de datos. Algunos de estos parámetros están basados en referencias bibliográficas y otros en estudios existentes. En los apartados siguientes se representan los resultados de cada uno de estos parámetros físicos.

5.2.1. Mapas derivados de MED

La estructura topografía de la cuenca es un factor determinante para conocer la respuesta hidrológica ante un evento de precipitación (K. J. Beven and Kirkby 1979; Kirkby and Chorley 1967). Por lo tanto, la representación de los modelos hidrológicos distribuidos es mediante un MED, que se define como una estructura numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Olaya F. 2004). El MED ha sido obtenido de IGN para la zona de estudio con una resolución de 100x100m, que es la resolución de trabajo utilizado para todos los mapas. A partir de esta información se ha generado mapa de pendientes, direcciones de flujo, celdas drenantes acumuladas y velocidad de flujo en la ladera (ver Figura 5.7). Los cuales permiten representar en el modelo las características geomorfológicas de la cuenca y las relaciones topológicas en la red de drenaje.

En el mapa de pendientes (Figura 5.7c), presenta mayores valores al Noreste y Suroeste de la cuenca, llegando a un máximo de 136%; y en la parte central las pendientes son más bajas, que bordean entre 0 a 50%, lo que finalmente favorecerá al encharcamiento de la precipitación en estas zonas.

Por otro lado, el valor de la velocidad de flujo en la ladera está directamente relacionado con el pendiente del terreno, fluctuando entre un rango de 0 a 1.65 m/s (Figura 5.7d). Estos valores serán utilizados en el modelo para determinar la escorrentía directa.

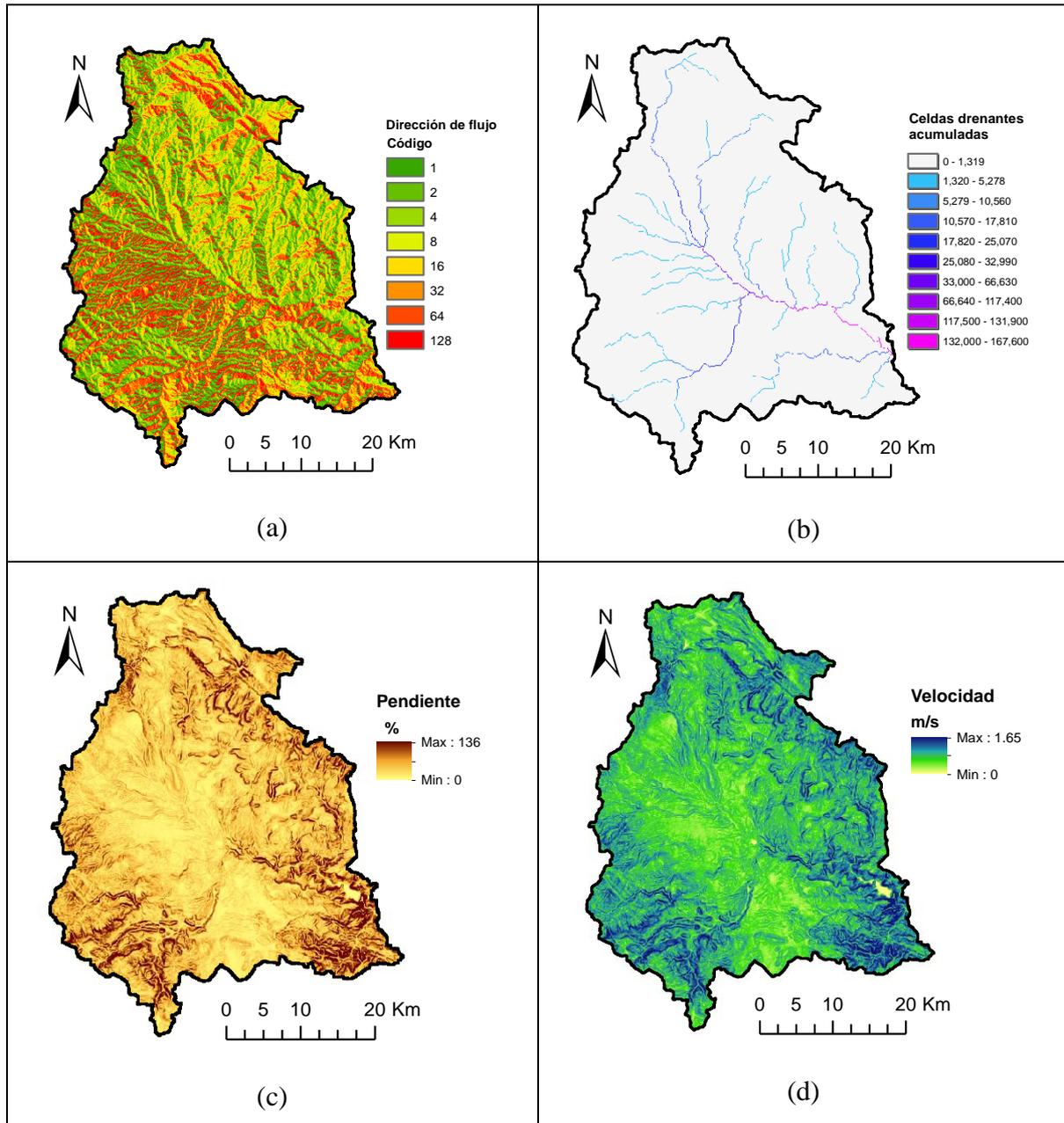


Figura 5.7. Parámetros derivados de MED para la cuenca Alto Mijares: (a) Mapa de direcciones de flujo, (b) Mapa de celdas drenantes acumuladas, (c) Mapa de pendiente y (d) Mapa de velocidad de flujo en la ladera

5.2.2. Factores de vegetación derivados de usos de suelo

El factor de vegetación es un parámetro que representa el comportamiento del ciclo vegetativo de la cobertura vegetal y permite evaluar la variabilidad en el ciclo anual de evapotranspiración de referencia. Este factor depende del tipo de cultivo (altura, grado de cobertura del suelo), fases de desarrollo del mismo (fecha de cosecha) y del clima. En la Figura 5.8 se muestra los valores mensuales; y su distribución espacial se aprecia en la Figura 4.4, donde el mayor

porcentaje de área está cubierta por plantas coníferas, lo que repercute a mayor tasa de evapotranspiración a lo largo de su periodo vegetativo.

Tabla 5.1. Valores de factor de vegetación según tipo de cobertura del suelo de CLC del año 2000.

Tipo de cobertura vegetal	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Urbano	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cultivos de secano	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1	1.0	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Terrenos de regadío	0.3	0.3	0.3	0.6	0.8	0.9	0.8	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3
Frutales	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	0.4	0.4
Olivar	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Pasto artificial	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Mosaicos de cultivos	0.3	0.3	0.4	0.6	0.9	0.9	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
Cult. y Veg. Natural	0.3	0.3	0.4	0.5	0.9	0.9	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
B. caducifolio	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.7
B. de coníferas	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Bosque mixto	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
Past. Naturales	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	0.8	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
B. esclerófila	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
B. de transición	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	0.9	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
Roquedos	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Masas de agua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

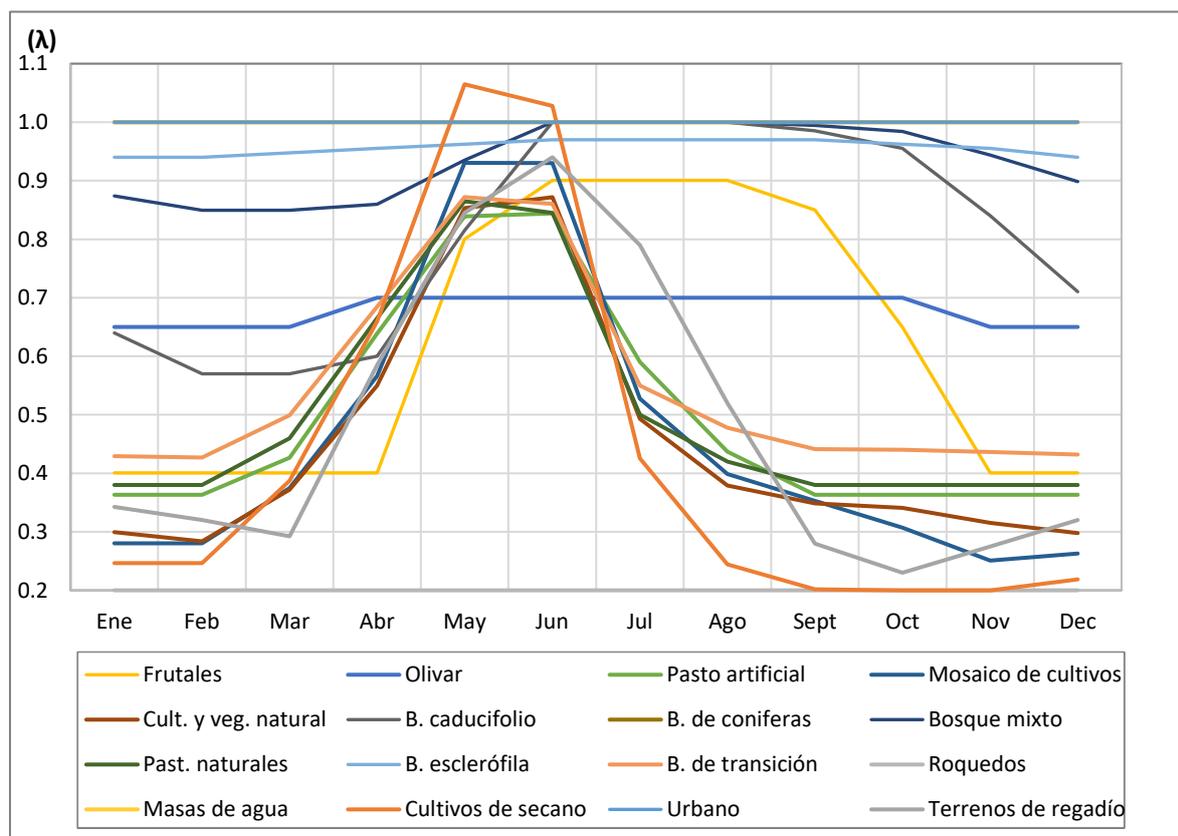


Figura 5.8. Factor de vegetación mensual según el tipo de cobertura del suelo en la cuenca del Alto Mijares

5.2.3. Mapas de parámetros edafológicos e hidrogeológicos

El mapa de almacenamiento estático (Hu) representa las abstracciones iniciales y el contenido de agua útil o almacenamiento capilar del suelo, representado en la Figura 5.9. Donde se aprecia además la distribución espacial del tanque de almacenamiento estático, con valores máximos que oscilan entre 200-264mm en la sierra de Gúdar y en la cabecera de la cuenca del río Albetosa. Los cuales están conformados básicamente por materiales carbonatados de origen cretácico, que es la combinación de calizas, margas y arcillas que favorecen la existencia de afloramientos por presentar alta impermeabilidad. Además en la Figura 5.9 se aprecia que la mayor parte de la cuenca tiene una capacidad de almacenamiento que esta entre 60-132mm, lo cual favorece a la rápida respuesta de la cuenca una vez superado su capacidad máxima.

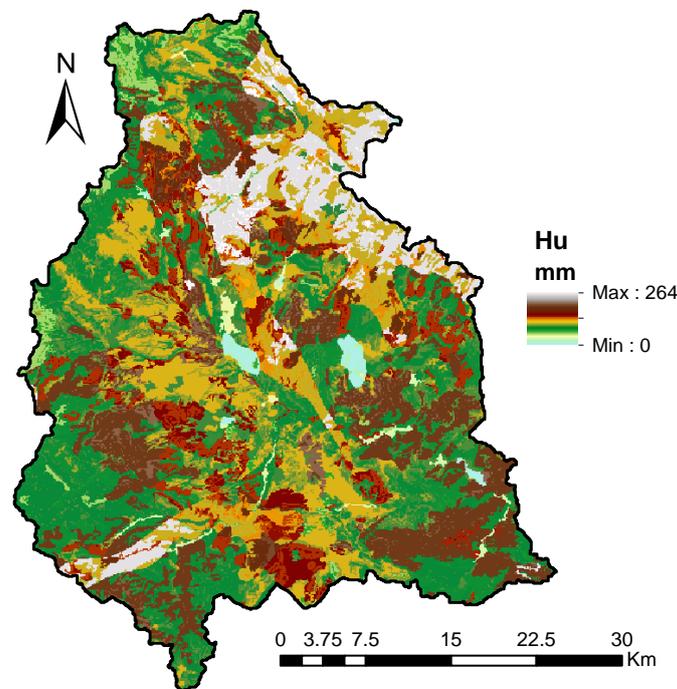


Figura 5.9. Mapa de almacenamiento estático (Hu) para la cuenca del Alto Mijares

En el caso de conductividad hidráulica del suelo (Saxton and Rawls, 2006) presenta un conjunto de valores de conductividad hidráulica saturada en función de textura del suelo y contenido de materia orgánica. En caso de disponer con datos de campo, estas deberán ser usados para calibrar las predicciones variando los parámetros de entrada dentro de los límites aceptables. Es como así se obtuvo el mapa de capacidad hidráulica saturada, representado en la Figura 5.10 el perfil del suelo superior, lo cual fue utilizado en el modelo para modelar los procesos de infiltración e interflujo. Asimismo, en la figura se observa que en la sierra de

Javalambre se presenta valores altos de capacidad de infiltración saturada, esto debido a la presencia de zonas kársticas conformado por material carbonatado que tienen una capacidad de infiltración mayor que otros materiales dentro de la cuenca.

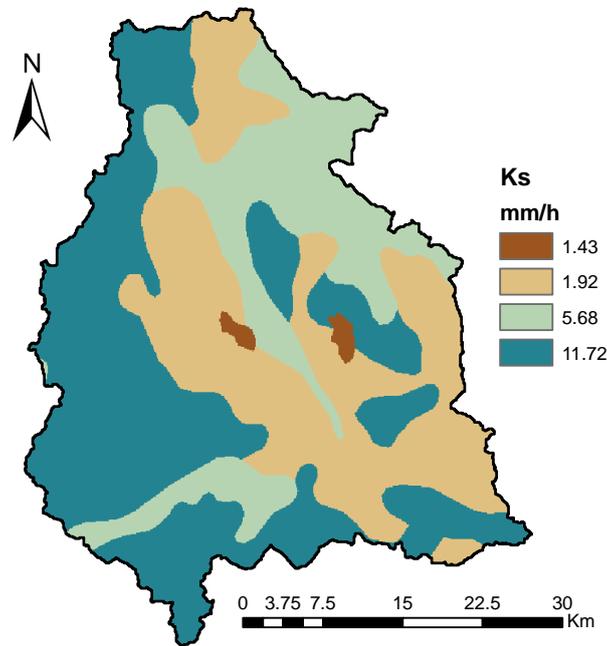


Figura 5.10. Mapa de capacidad de infiltración (K_s) para la cuenca del Alto Mijares

En el caso del parámetro K_p , éste representa las características hidrodinámicas de las capas inferiores del suelo. Los procesos físicos que depende de este parámetro son la percolación, el flujo base y flujo subterráneos profundo (Vélez, 2003). Para su determinación se ha utilizado los valores definidos por (Rios, 2017) para materiales consolidados y no consolidados. A partir de esa información se ha estimado los valores de conductividades hidráulicas para la cuenca de estudio, como se muestra en la Figura 5.11.

Una vez determinado los valores de permeabilidad del sustrato para la cuenca del Alto Mijares, éstos se han redefinido de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.1.3.5. En donde se ha corregido el mapa de permeabilidad del sustrato (K_p), sumando un valor muy alto en las zonas kársticas, con la finalidad de redireccionar el agua al flujo subterráneo profundo, que posteriormente descargará en los manantiales que están ubicados fuera del límite del área drenante; que finalmente el mapa modificada se representa en la Figura 5.12. Esto nos ayudó a simular los procesos de percolación y flujo subterráneo profundo en el acuífero kárstico.

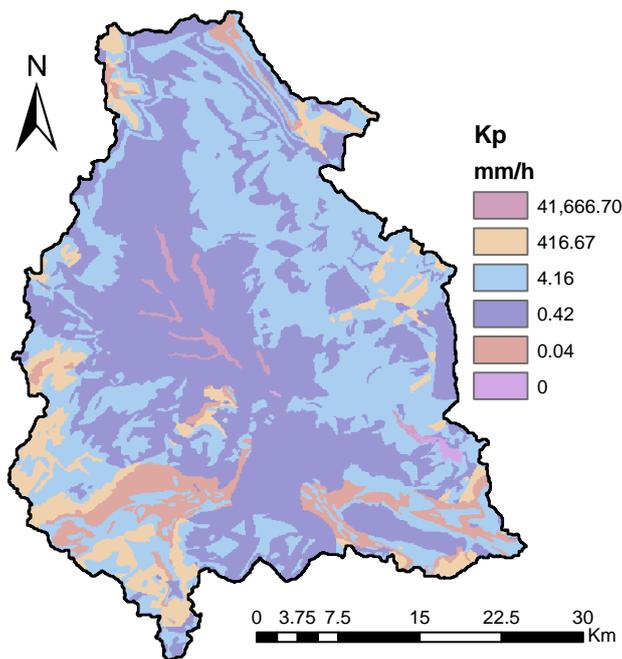


Figura 5.11. Mapa de capacidad de percolación (K_p) para la cuenca del Alto Mijares

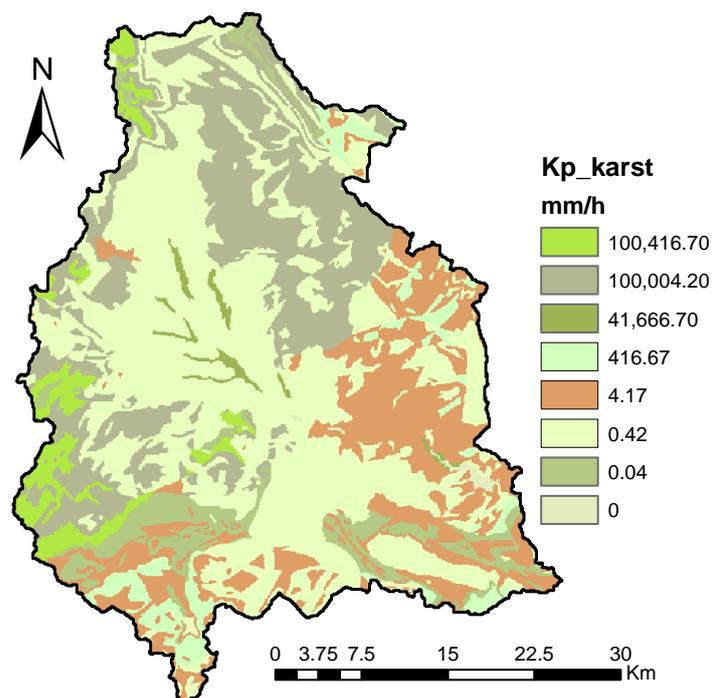


Figura 5.12. Mapa de capacidad de percolación modificado (K_p _Karst), según el mapa de zonas kársticas en la cuenca del Alto Mijares

En el mapa se puede notar que las zonas adyacentes al río Mijares tienen una capacidad de permeabilidad baja, cuyo valor está entre 0.041- 0.42 mm/h. Este hecho favorece el afloramiento de flujos subterráneos en estas zonas, como son los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo.

5.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO TETIS

La calibración fue realizada en la estación Terde (ROEA 8030), por ser una estación de aforo con poca alteración del régimen natural, y donde además se analizó el efecto de los fenómenos kársticos para el periodo de 2000 al 2004. Este periodo seleccionado además es muy representativo para modelar las fluctuaciones máximas y mínimas de los caudales observados, que permitió obtener parámetros efectivos más robustos capaces de representar los flujos bases del río Mijares y las descargas de los manantiales kársticos, ubicados aguas abajo de la estación en referencia.

Los resultados de la evaluación se muestran en la Figura 5.13 y Tabla 5.2 basados en el análisis gráfico y estadístico del modelo TETIS.

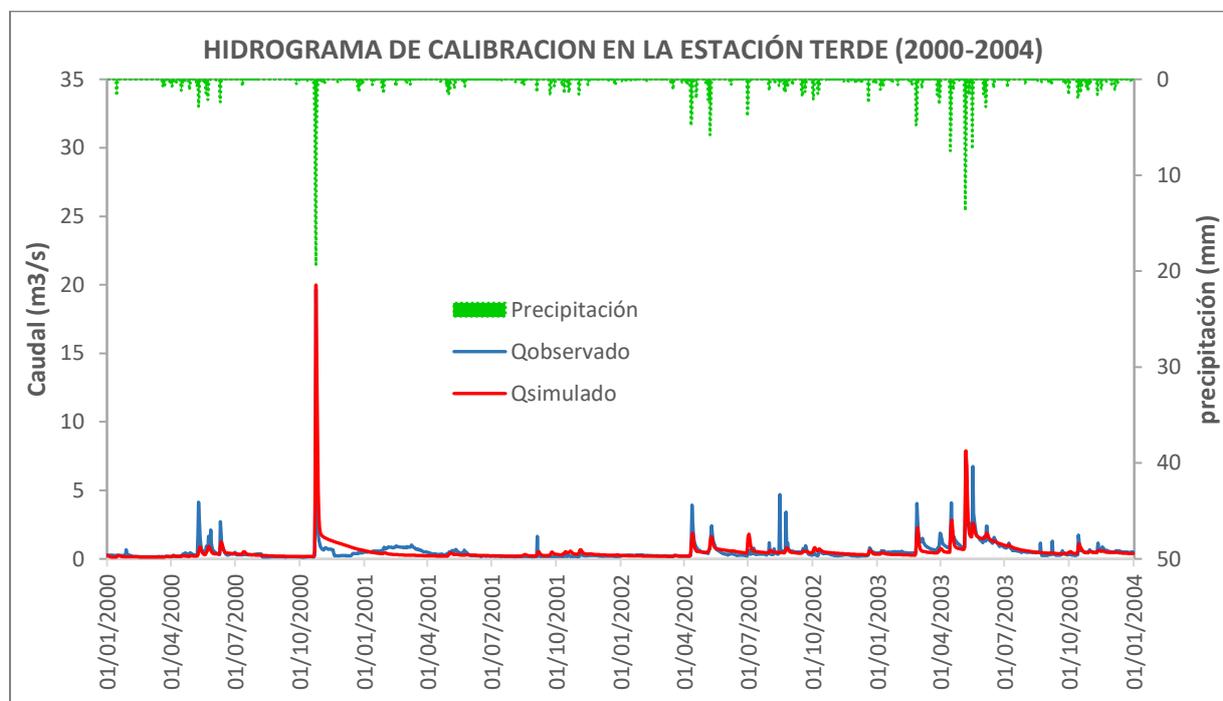


Figura 5.13. Hidrograma resultante de la calibración automática para el periodo comprendido entre 2000 y 2004, en la estación Terde (ROEA 8030)

Como se puede observar en la Figura 5.13, el hidrograma obtenido en la calibración reproduce de manera satisfactoria los caudales observados a lo largo de todo el periodo a excepción del mes de agosto del año 2002, donde se aprecia que los eventos generados por lluvias concentradas resultan más difícilmente representables, como es el caso de las tormentas localizadas en la época estival en donde la precipitación no cubre completamente la cuenca, por lo que el caudal simulado apenas refleja las crecidas. Sin embargo, se ha obtenido un índice

de NSE de 0.61, RMSE de 0.48 m³/s y un error en volumen apenas de 0.13%, tal como se observa en la Tabla 5.2.

Por lo tanto, de acuerdo a estos parámetros obtenidos podemos decir que la calibración es satisfactorio según los criterios de evaluación de (Moriassi et al., 2008).

Tabla 5.2. *Parámetros estadísticos de evaluación de la calibración del modelo en la estación Terde (ROEA 8030)*

Criterio de evaluación	Periodo	(2000-2004)	Unidad
Índice de eficiencia NSE		0.61	---
Qmax. observado		19.67	m ³ /s
Qmax. simulado		19.99	m ³ /s
RMSE		0.48	m ³ /s
Volumen observado		66.08	Hm ³
Volumen simulado		66.17	Hm ³
Error en volumen (VE)		-0.13	%

Después de la calibración automática con el algoritmo SCE-UA, se obtienen los factores correctores óptimos presentado en la Tabla 5.3. Estos factores correctores fueron utilizados en la validación y para la predicción de la descarga del manantial de Montanejos como se verá más adelante.

Tabla 5.3. *Factores correctores óptimos del modelo TETIS para la cuenca del Alto Mijares*

Factor corrector del modelo	FCs	Valor
Almacenamiento estático	FC ₁	3.975
Evapotranspiración	FC ₂	0.828
Infiltración	FC ₃	0.840
Escorrentía directa	FC ₄	1.287
Percolación	FC ₅	0.471
Interflujo	FC ₆	170.609
Flujo subterráneo profundo	FC ₇	0.087
Flujo base	FC ₈	260.033
Velocidad del flujo base	FC ₉	0.133
Factor de interpolación de la lluvia	β	0.002

Por otra parte, tenemos el comportamiento del tanque de almacenamiento estático (H₁) y del acuífero (H₄) hasta la estación Terde, representado en la Figura 5.14. En donde se observa que

el aumento del nivel del tanque estático está muy caracterizado por las precipitaciones ocurridas en ese periodo, así como la evolución del nivel del tanque del acuífero, pero de manera más lenta, con una tendencia creciente. El agua almacenada en el tanque H1 solo sale por evapotranspiración potencial, en cambio el tanque H4 es el que regula el flujo base del río Mijares.

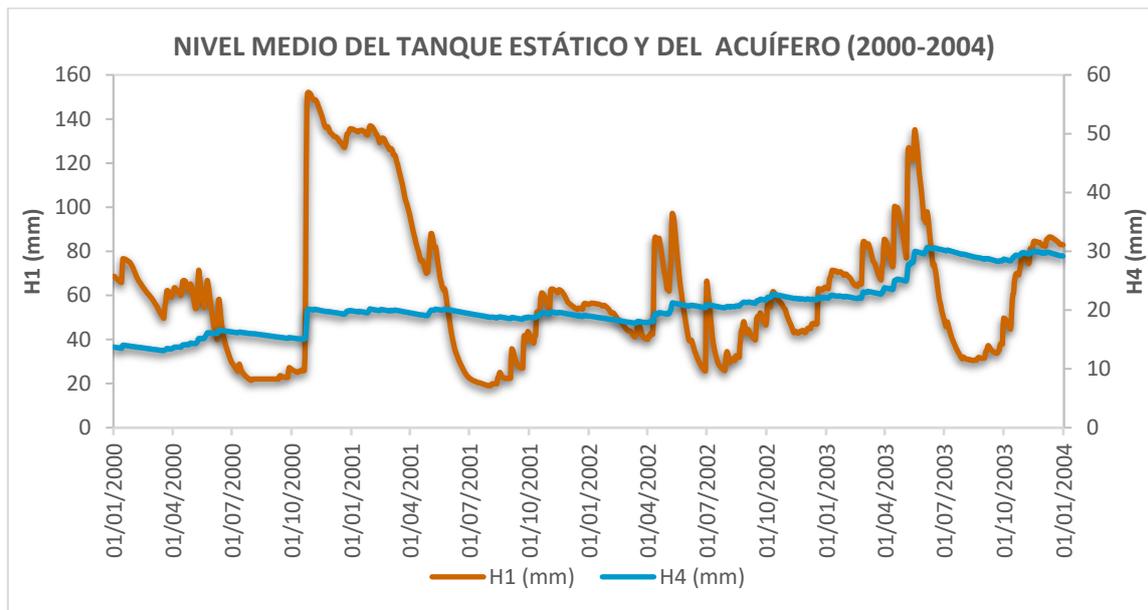


Figura 5.14. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero subterráneo en la estación Terde en el periodo (2000-2004)

Los flujos y almacenamientos medios de la cuenca corresponden a las series temporales de los valores medios obtenidos después de la simulación. En la Tabla 5.4 se muestra el resumen del balance hídrico medio anual de la cuenca hasta la estación Terde, donde la lluvia directa es la diferencia entre la precipitación e interceptación; predominando además el flujo subterráneo profundo que viene a ser la recarga parcial de los manantiales ubicados aguas abajo de Terde.

Tabla 5.4. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el Periodo comprendido entre (2000-2004)

Flujos y almacenamientos medios	Valor (mm/año)
Precipitación	434.39
Evaporación desde interceptación	131.54
Lluvia directa	302.86
Evapotranspiración	214.21
Excedente	85.19
Escorrentía directa	5.07

Interflujo	11.76
Flujo base	8.17
Caudal simulado	24.99
Flujo subterráneo profundo	56.01

El balance hídrico considerando los fenómenos kársticos, cambia sustancialmente respecto a calibrar sin tener en cuenta estos procesos. Puesto que al calibrar con la inclusión del karst en la estación Terde, gran parte del caudal es desviado por el acuífero como flujo subterráneo profundo, el cual tendrá su descarga en los manantiales ubicados aguas abajo de esta estación, formando aportes importantes en la estación Arenós.

5.4. VALIDACIÓN TEMPORAL DEL MODELO TETIS

Utilizando los mismos factores correctores obtenidos en la calibración, se realizó la validación temporal del modelo Tetis en el periodo de 1994 al 2008 y en la misma estación de calibración. En la Figura 5.15 y Tabla 5.5 se muestran los resultados de evaluación, basados en análisis gráfico y estadístico como en el caso anterior.

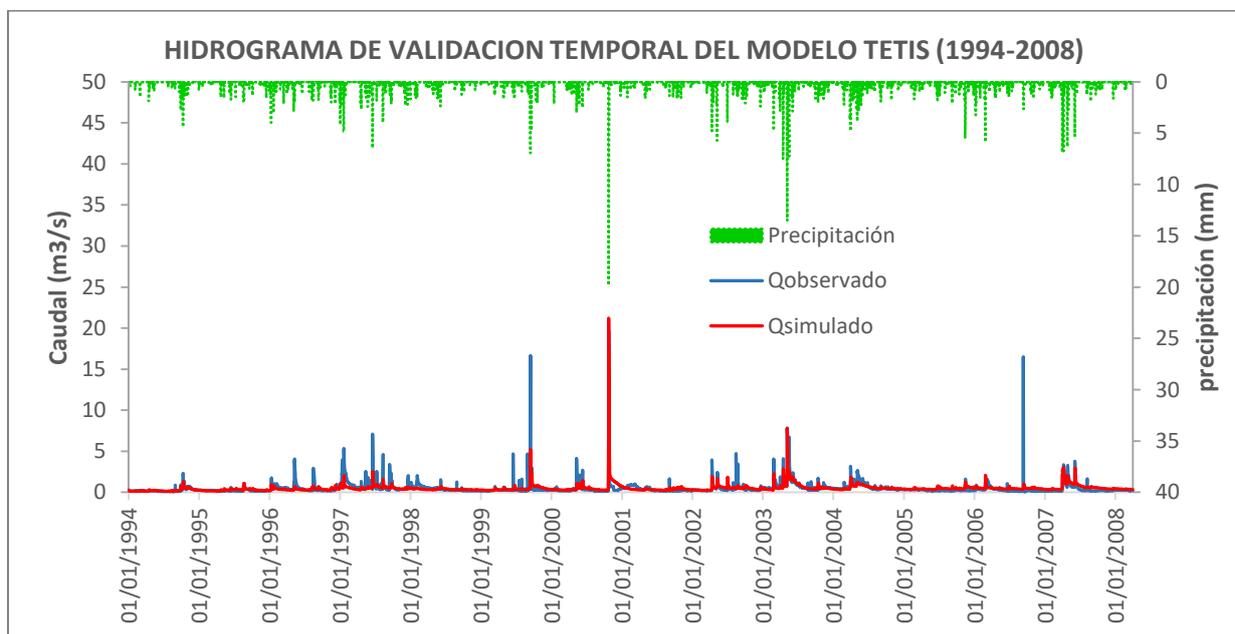


Figura 5.15. Hidrograma resultante de la validación temporal en el periodo de 1994 – 2008, en la estación Terde (ROEA 8030)

En la Figura 5.15, haciendo una comparación visual del hidrograma simulado y el observado, se aprecia que el modelo logra reproducir de forma aceptable los caudales base a lo largo de todo el periodo. No obstante, existen eventos simulados que no llegan a representar

adecuadamente los flujos observados debido a tormentas localizadas en las partes de la cuenca, sobreestimándose ligeramente en el balance general.

Los indicadores estadísticos para esta validación temporal se presentan en la Tabla 5.5 , donde se obtiene un NSE de 0.40, RMSE de 0.51 m³/s y un error en volumen de 8.55% , corroborándose que el modelo representa de forma aceptable los diferentes procesos hidrológicos, a pesar de que el valor de NSE no es del todo satisfecho, puesto que este coeficiente de eficiencia es muy sensible a valores extremos(Legates and McCabe Jr., 2005). Sin embargo, el objetivo de este trabajo es realizar una simulación continua para representar adecuadamente el caudal base del río Mijares y por tanto se puede dar por valido el resultado.

Tabla 5.5. Criterios de evaluación del modelo en validación temporal para el periodo (1994-2008)

Criterio de evaluación	Periodo (1994-2008)	Unidad
Índice de eficiencia NSE	0.40	---
RMSE	0.51	m ³ /s
Volumen observado	201.25	Hm ³
Volumen simulado	218.45	Hm ³
Error en volumen (VE)	-8.55	%

Por otro lado, tenemos la evolución del tanque de almacenamiento estático y del acuífero, esquematizado en la Figura 5.16.

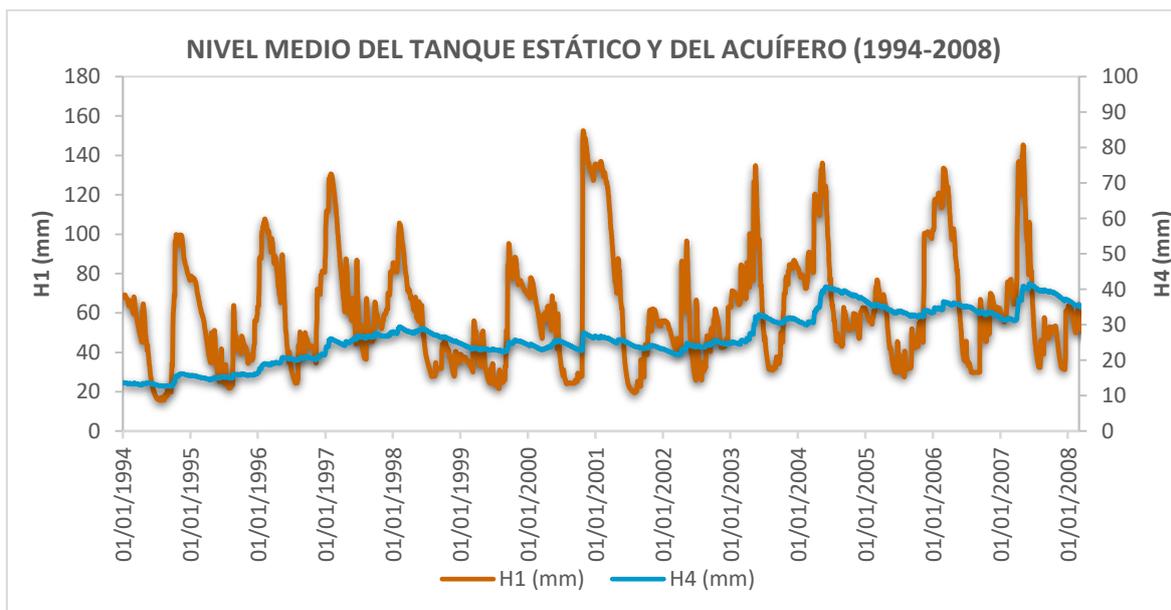


Figura 5.16. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero subterráneo en la estación Terde para el periodo (1994-2008)

En donde se puede apreciar como en el caso anterior que está muy caracterizada por las precipitaciones con mayor intensidad en el tanque estático, y en el caso del acuífero subterráneo la evolución de nivel se mantiene casi constante, con un ligero incremento al final del periodo de simulación.

En la Tabla 5.6 se observa que en el balance hídrico medio de la cuenca, la mayor aportación a la escorrentía total se da por medio del flujo base, lo que hace que el río Mijares se caracterice como permanente. Y la otra parte del flujo de mayor magnitud es desviado hacia la recarga de los manantiales, representado como flujo subterráneo profundo en el modelo; producto de los fenómenos kársticos en la cuenca. Así como también, se resalta que el mayor flujo de salida por evapotranspiración desde el tanque de almacenamiento estático y evaporación del agua interceptada en la vegetación, quedando reflejado la incidencia de la cobertura vegetal en el balance hídrico.

Tabla 5.6. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el periodo de validación Temporal (1994-2008)

Flujos y almacenamientos medios	Valor (mm/año)
Precipitación	425.72
Evaporación desde intercepción	143.52
Lluvia directa	282.23
Evapotranspiración	202.88
Excedente	80.78
Escorrentía directa	3.09
Interflujo	9.67
Flujo base	10.54
Caudal simulado	23.30
Flujo subterráneo profundo	55.98

5.5. VALIDACION ESPACIAL Y CALIBRACIÓN DEL MODELO UNICELULAR

La validación espacial del modelo Tetis se realiza en la estación del embalse Arenós (ROEA 8134), para el mismo periodo de calibración. La validación se realiza conjuntamente con calibración del modelo unicelular, obteniéndose un coeficiente de descarga de 0.0019 día^{-1} y volumen inicial del acuífero de 99.42 hm^3 , mediante estos parámetros se determinó la descarga de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo, que en promedio alcanza un valor de $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$, representado en la Figura 5.17. Posteriormente esta descarga fue incorporada al

hidrograma simulado por el modelo Tetis, mediante una hoja de cálculo, ya que los manantiales llegan a descargar al río Mijares aguas abajo de la estación Terde.

La inclusión del karst ha permitido representar de manera adecuada la descarga de los manantiales, producto de la recarga por precipitación en las zonas kársticas en las cabeceras de cuenca, así los caudales simulados en la estación Arenós representan muy bien el flujo base y la forma de la curva de recesión(Figura 5.18).

Los parámetros obtenidos en la calibración del modelo unicelular se utilizaron para realizar la validación temporal del modelo, así como la validación espacio-temporal en el caso del modelo integral Tetis, tal como se explica en el siguiente apartado.

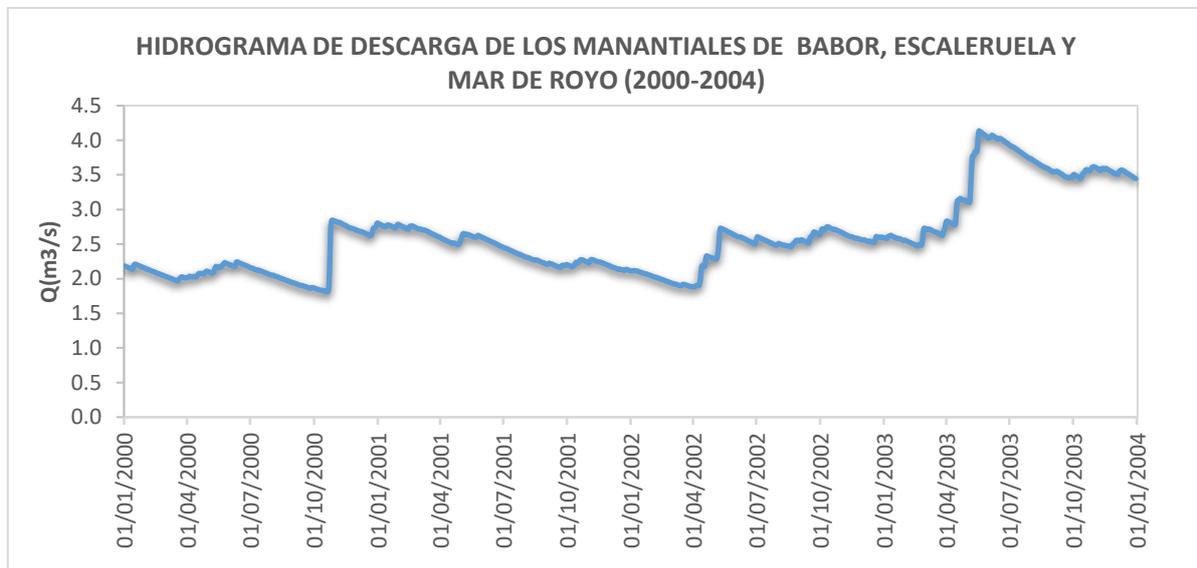


Figura 5.17. Hidrograma de descarga de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Rojo en el periodo (2000-2004)

En la Figura 5.18 se observa el hidrograma integrado por los dos modelos. En donde el caudal simulado del hidrograma logra reproducir de manera satisfactoria el flujo base en todo el periodo de validación. Sin embargo, hay una ligera infraestimación de los eventos máximos, pero que no corresponde a los objetivos del presente estudio.

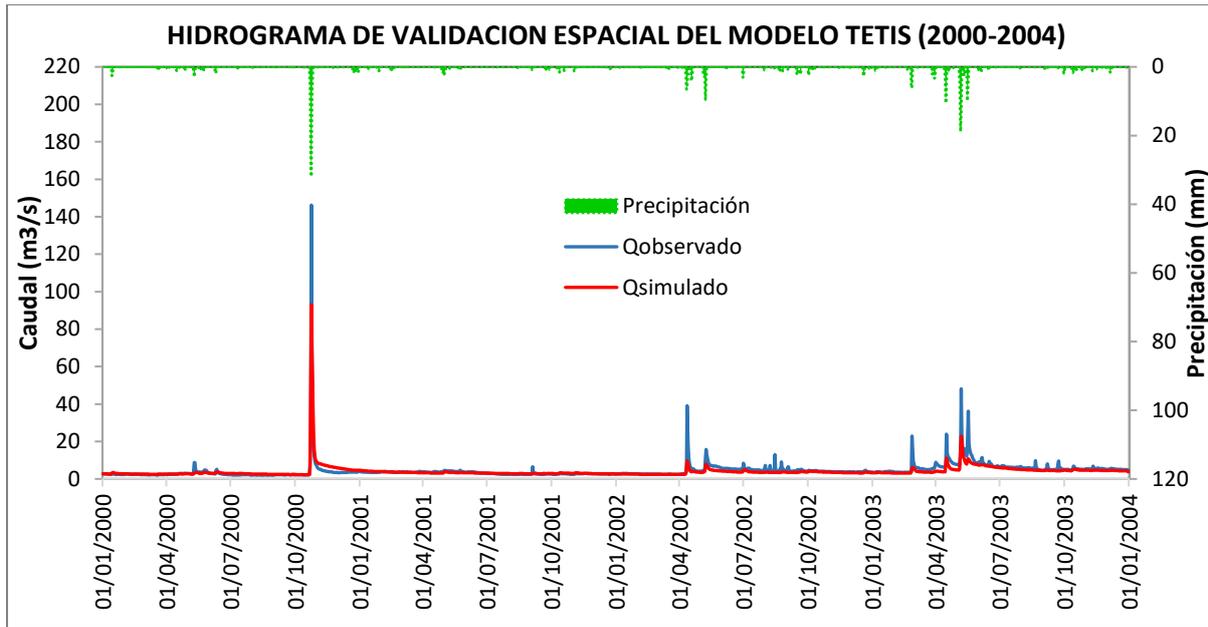


Figura 5.18. Hidrograma resultante de la validación espacial para el periodo (2000-2004) correspondiente a la estación del embalse Arenós (ROEA 8134).

Asimismo, los parámetros estadísticos fueron determinados en la misma hoja calculo; a partir de los caudales simulados y observados en la estación Arenós, como se puede observar en la Tabla 5.7, donde se aprecia los valores de NSE, RMSE y VE para la validación espacial del modelo, resultando 0.76, 2.46 m³/s y 10.78% respectivamente, lo cual refleja que la eficiencia del modelo es bueno, según la clasificación de (Ocampo and Vélez, 2014).

Tabla 5.7. Criterios de evaluación en validación espacial en la estación Arenós (ROEA 8134) para el periodo (2000-2004).

Criterio de evaluación	Periodo (2000-2004)	Unidad
Índice de eficiencia NSE	0.76	---
RMSE	2.46	m ³ /s
Volumen observado	559.19	Hm ³
Volumen simulado	498.91	Hm ³
Error en volumen (VE)	10.78	%

En la Figura 5.19 se observa la evolución del nivel de agua, tanto en el tanque estático y en el acuífero, estimado por el modelo Tetis. El nivel del acuífero se mantiene casi constante, excepto con una tendencia ascendente en el tramo final, lo cual es también reflejado en los caudales observados en la Figura 5.18. Mientras el tanque H1 está directamente relacionado con la precipitación y evapotranspiración potencial, alcanzando valores máximos cuando se tiene recargas importantes.

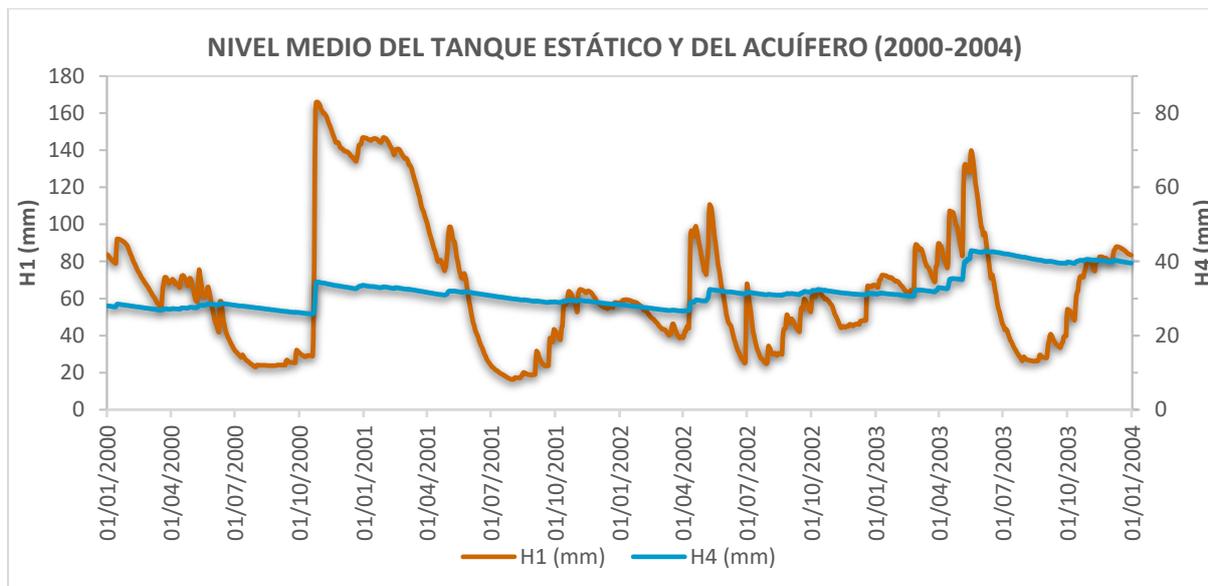


Figura 5.19. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero en la estación del embalse Arenós para el periodo (2000-2004)

En la Tabla 5.8 se observa el balance hídrico de la cuenca, donde la mayor aportación a la escorrentía total es por flujo base (78.08%), seguido de interflujo (13.56%) y escorrentía directa (8.37%); por lo que se concluye que el incremento de flujo base es debido a la descarga de los manantiales, haciendo que el río Mijares se comporte como permanente. Sin embargo, el flujo subterráneo profundo no existe, ya que todo el aporte de la cuenca drenante es registrado en la estación del embalse Arenós, esto de acuerdo al balance medio de la cuenca.

Tabla 5.8. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el periodo de validación espacial (2000-2004)

Flujos y almacenamientos medios	Valor (mm/año)
Precipitación	474.10
Evaporación desde interceptación	139.16
Lluvia directa	334.95
Evapotranspiración	234.22
Excedente	100.92
Escorrentía directa	7.35
Interflujo	11.91
Flujo base	68.59
Caudal simulado	87.85
Flujo subterráneo profundo	0.00

5.6. VALIDACIÓN ESPACIO - TEMPORAL DEL MODELO INTEGRADO

La validación espacio-temporal del modelo integrado se realizó en la estación Arenós (ROEA 8134) para el periodo (1994-2008). En donde la descarga total media de los manantiales kársticos de Babor, Escaleruela y Mar de Royo es de 2.87 m³/s, manteniendo los mismos parámetros calibrados del modelo unicelular, tal como se observa en la Figura 5.20. Por lo tanto, se hacemos una comparación con las medias de las descargas registradas de los manantiales en el informe de la (CHJ, 2015), apenas hay una diferencia de 21% con respecto al observado, que en este caso viene a ser de 2.15 m³/s de las tres fuentes.

Como se puede visualizar en la Figura 5.21, donde el modelo logra representar de forma satisfactoria el caudal base simulado frente al observado en todo el periodo, lo que nos indica que las condiciones impuestas de las variables de estado y aportaciones de los manantiales subterráneos fueron las correctas.

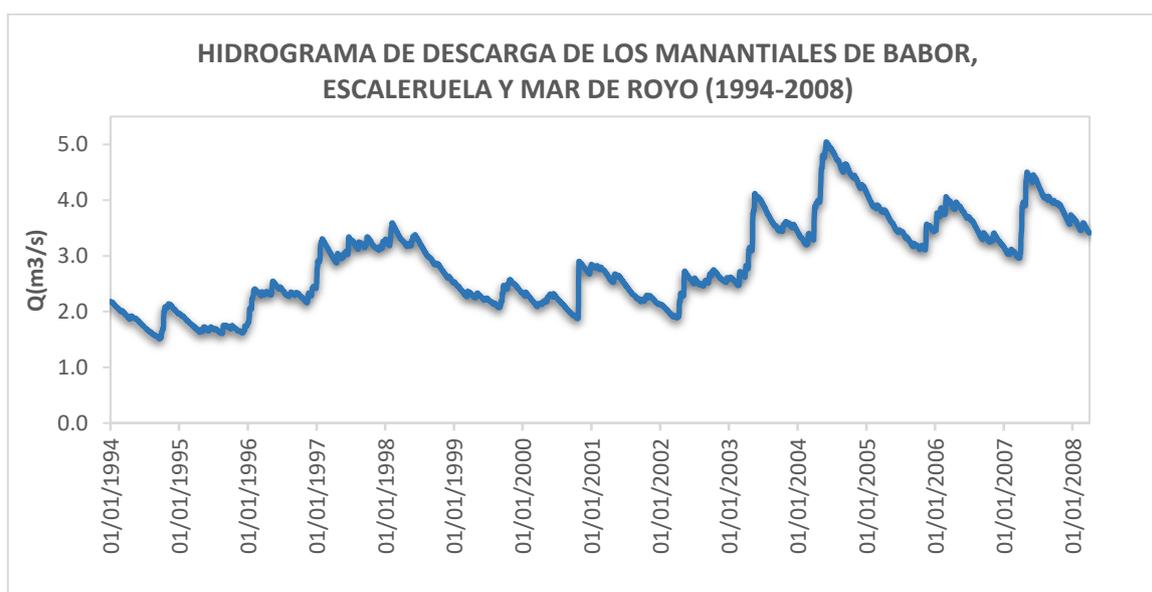


Figura 5.20. Hidrograma de descarga de los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo en el periodo (1994-2008)

Todo lo anterior apunta a que la existencia de núcleos kársticos favorece la preferencia de los flujos subterráneos frente a la escorrentía superficial en la cuenca Alta e intermedia del río Mijares. La aparición de los manantiales subterráneos reintegra los flujos al río Mijares, tal es así, que el caudal medio en la estación Arenós es siete veces mayor que en la estación Terde, con apenas el doble de la cuenca drenante.

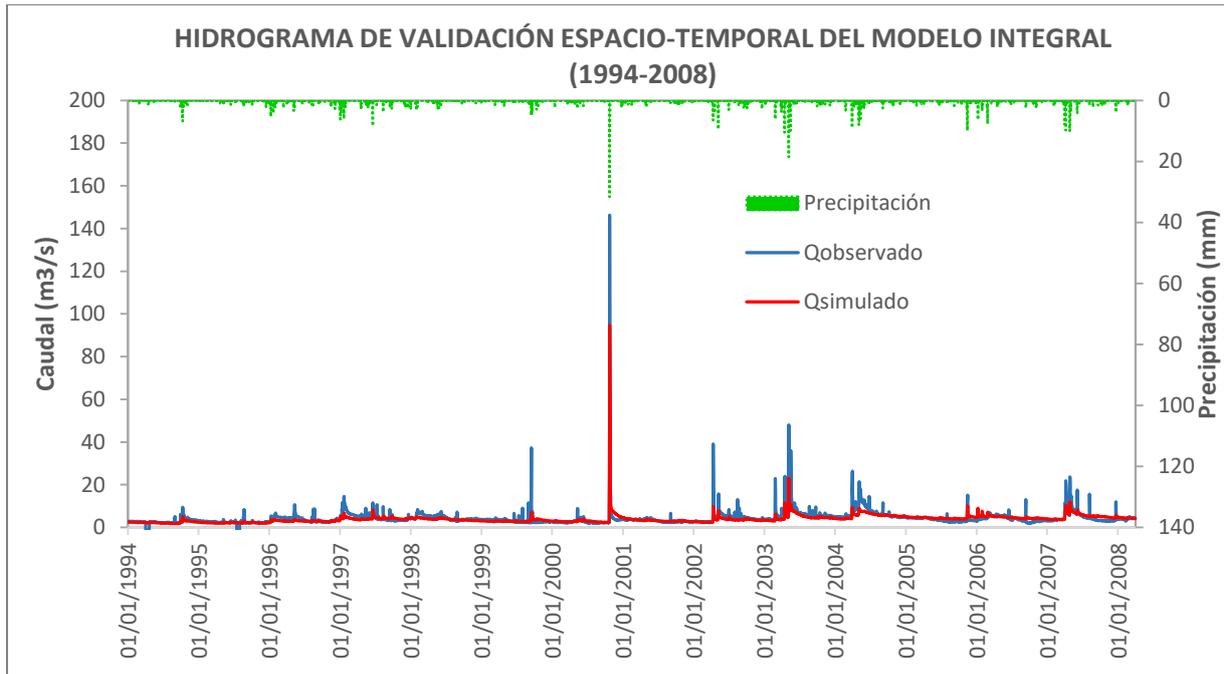


Figura 5.21. Hidrograma resultante de la validación espacio-temporal para el periodo de 1994-2008, en la estación Arenós (ROEA 8134).

Por otro lado, tenemos los indicadores estadísticos de la eficiencia del modelo, representados en la Tabla 5.9 resultando un RMSE=1.87 m³/s y un índice NSE=0.67, lo que nos indica que el modelo representa de forma favorable los diferentes procesos caracterizados en otro periodo de tiempo y estación.

Tabla 5.9. Criterios de evaluación en validación espacio-temporal en la estación ROEA 8134 para el periodo 1994-2008.

Criterio de evaluación	Periodo(1994-2008)	Unidad
Índice de eficiencia NSE	0.67	---
RMSE	1.87	m ³ /s
Volumen observado	1895.74	Hm ³
Volumen simulado	1758.84	Hm ³
Error en volumen (VE)	7.22	%

De la misma que en los casos anteriores se muestra el nivel medio de los tanques de almacenamiento estático y del acuífero en la Figura 5.22, donde en el primer caso el tanque experimenta incrementos muy rápidos debido a las recargas y requerimientos hídricos de la vegetación, mientras que en el segundo tanque el nivel fluctúa de manera más lenta, ya que el agua subterránea recién llega a infiltrarse cuando el tanque estático este saturado.

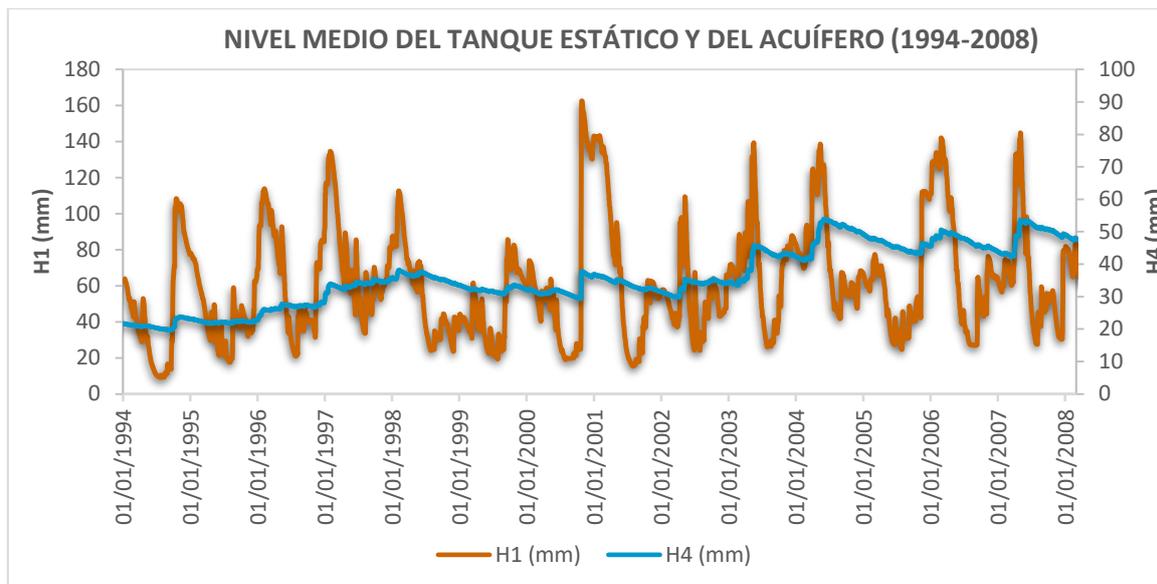


Figura 5.22. Comportamiento del tanque de almacenamiento estático y del acuífero en el periodo (1994-2008)

En la Tabla 5.10 se observa el balance hídrico medio de la cuenca, donde la mayor aportación a la escorrentía total es por flujo base con 85.68%, seguido de interflujo 10.25% y escorrentía directa con solo el 4.08%. Asimismo, se observa que la mayor pérdida de agua es producto de la evapotranspiración con 47.30%, seguida por la evaporación desde la cobertura vegetal con 32.96%, y solo el 19.75% es el excedente de la precipitación que formara parte de la escorrentía superficial y subterránea.

Tabla 5.10. Balance hídrico medio anual de la cuenca para el periodo de validación espacio-temporal (1994-2008)

Flujos y almacenamientos medios	Valor (mm/año)
Precipitación	461.61
Evaporación desde intercepción	152.13
Lluvia directa	309.48
Evapotranspiración	218.33
Excedente	91.15
Escorrentía directa	3.54
Interflujo	8.91
Flujo base	74.49
Caudal simulado	86.94
Flujo subterráneo profundo	0.00

En el siguiente apartado se analiza el comportamiento del régimen de caudales simulados y observados mediante la curva de duraciones de caudales.

5.7. CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES OBSERVADOS Y SIMULADOS

Partiendo de los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas en la cuenca del Alto Mijares, aplicando el modelo TETIS, se realizaron diferentes análisis y comparaciones con el fin de identificar el mejor comportamiento y las diferencias presentadas tanto en la calibración y validación del modelo.

Para representar el comportamiento hidrológico del río se ha utilizado como herramienta de análisis las curvas de duración de caudales (CDC). Estas curvas de frecuencia acumulada muestran la probabilidad de que un caudal específico sea igualado o superado durante cierto periodo de tiempo (Searcy, 1959).

Las curvas de duración de caudales simulados y observados para el periodo (2000-2004) se representa en la Figura 5.23, con escala logarítmica en el eje vertical. Construidas a partir de resultados obtenidos en la estación Terde, a escala diaria. Lo cual nos permite corroborar que el modelo Tetis simula de manera satisfactoria tanto los valores máximos, medios y mínimos.

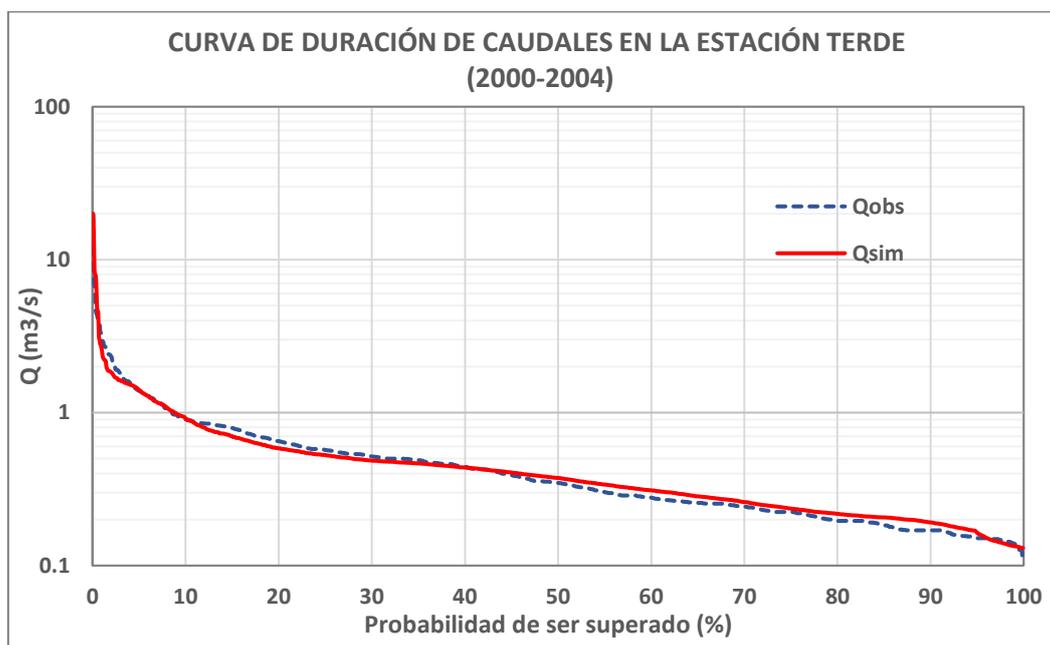


Figura 5.23. Curva de duración de caudales para el periodo (2000-2004), correspondiente a la estación Terde (ROEA 8030)

Por otra parte, la CDC en la estación de Arenós, representado en la Figura 5.24, muestra diferencias entre caudal simulado y observado, con probabilidades de ser superado menores a 30%, sin embargo representa de manera satisfactoria el flujo base del río con caudales que están

por debajo de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, con una probabilidad de ocurrencia mayor a 40%, evidenciando una ligera infraestimación de caudales pico.

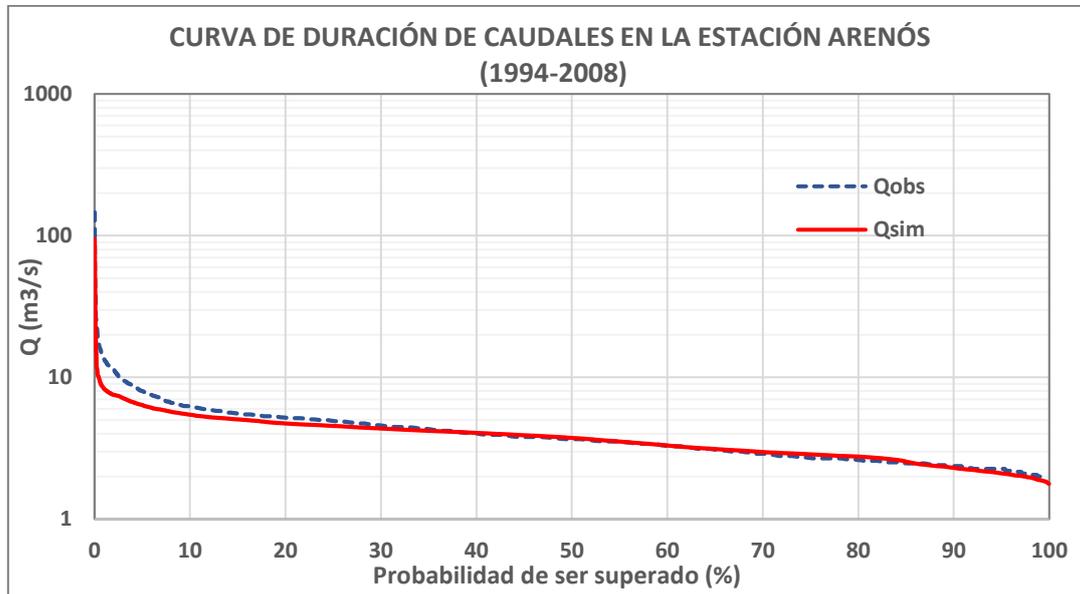


Figura 5.24. Curva de duración de caudales para el periodo (1994-2008), correspondiente a la estación del embalse Arenós (ROEA 8134)

Después haber realizados la validación y el análisis de consistencia final de los parámetros mediante la observación de las curvas de duración de caudales, se concluye que el modelo simula de manera satisfactoria los diferentes procesos hidrológicos en la cuenca de estudio, por lo tanto, el modelo puede ser utilizado para realizar las predicciones en las subcuencas no aforadas con características hidrológicas similares.

5.8. PREDICCIÓN DE LA DESCARGA DEL MANANTIAL TERMAL MONTANEJOS

En la Figura 5.25 se muestra el hidrograma simulado de la cuenca intermedia entre el embalse Arenós y el punto de control Alquería (subcuencas Maimona y Montán), la cual es la zona de recarga del manantial termal Montanejos. Esta simulación está comprendida entre 01/10/1986 al 31/09/2006, periodo en el cual fue establecido el régimen de caudal ecológico por PHJ para el tramo de estudio.

Este hidrograma representa la suma de la escorrentía superficial y descarga subterránea del manantial termal (flujo base).

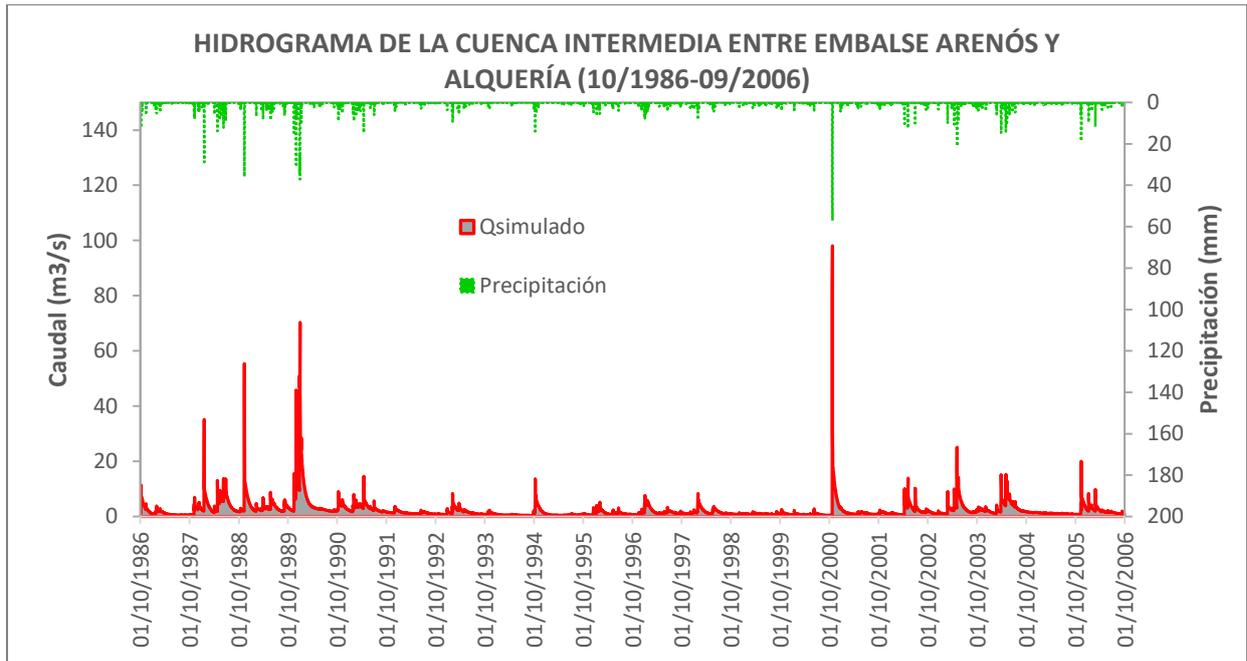


Figura 5.25. Hidrograma resultante de la cuenca intermedia entre el embalse Arenós y Alquería para el periodo (10/1986-09/2006)

Por lo tanto, para obtener propiamente la descarga del manantial termal se tuvo que desagregar mediante la aplicación del modelo unicelular, tal como se muestra en la Figura 5.26. En donde se aprecia que las descargas incrementan, cuando se registran precipitaciones de mayor duración, tal como ocurre a los inicios del periodo de simulación.

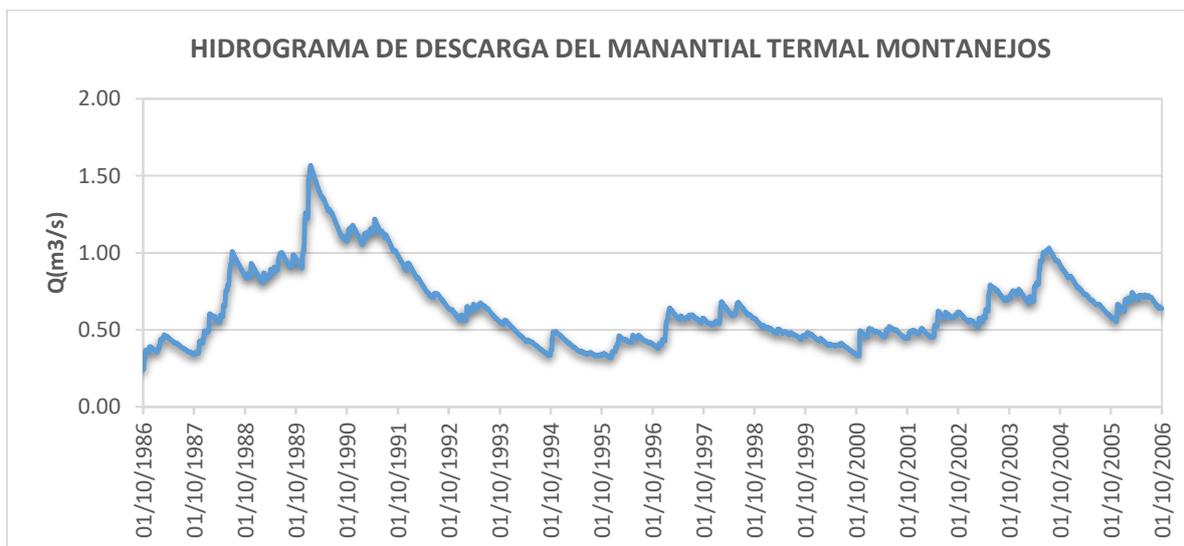


Figura 5.26. Hidrograma de descarga del manantial termal Montanejos para el periodo (10/1986-09/2006)

Por otro lado, el aporte medio del manantial termal Montanejos para este periodo es de 0.644 m³/s, que comparando con el caudal obtenido en el aforo de 0.5m³/s, solo difiere en un 22%,

lo cual nos indica que está por encima de caudal ecológico establecido para el tramo de estudio, por lo que en principio no sería necesario realizar sueltas de agua fría desde el embalse Cirat; que ocasiona impactos negativos en las fuentes termales. Sin embargo, en caso de presentarse sequias prolongadas en la cuenca de estudio, queda la posibilidad de plantear distintos escenarios, lo cual se analiza más adelante en el modelo térmico.

Asimismo, se representa la descarga media diaria mensual en la Figura 5.27, donde el valor máximo de 0.68 m³/s se alcanza en el mes de junio, y el valor mínimo de 0.61 m³/s en el mes octubre. Estos valores mensuales son dato de entrada para el modelo térmico.

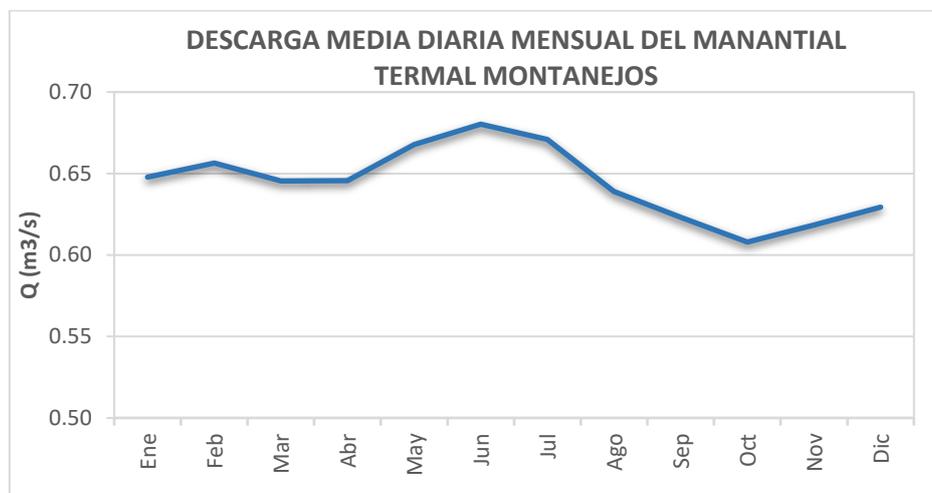


Figura 5.27. Hidrograma de descarga media diaria mensual del manantial termal Montanejos

En la Figura 5.28 se muestra la clasificación de caudales de la descarga del manantial termal Montanejos, donde la probabilidad de superar en caudal ecológico de 0.4 m³/s es de 88%, por lo tanto, solo existe una probabilidad de 12% de que no se pueda cumplir con las restricciones ambientales del cauce. Para ello, se plantea un escenario para la probabilidad de ocurrencia de 100%, que corresponde a una descarga de 0.24 m³/s.

Por lo tanto, en este escenario se plantea realizar una suelta desde el embalse Cirat para suplir la diferencia entre el caudal ecológico requerido y la descarga mínima del manantial termal. Este hecho se analiza con mayor profundidad en el modelo térmico.

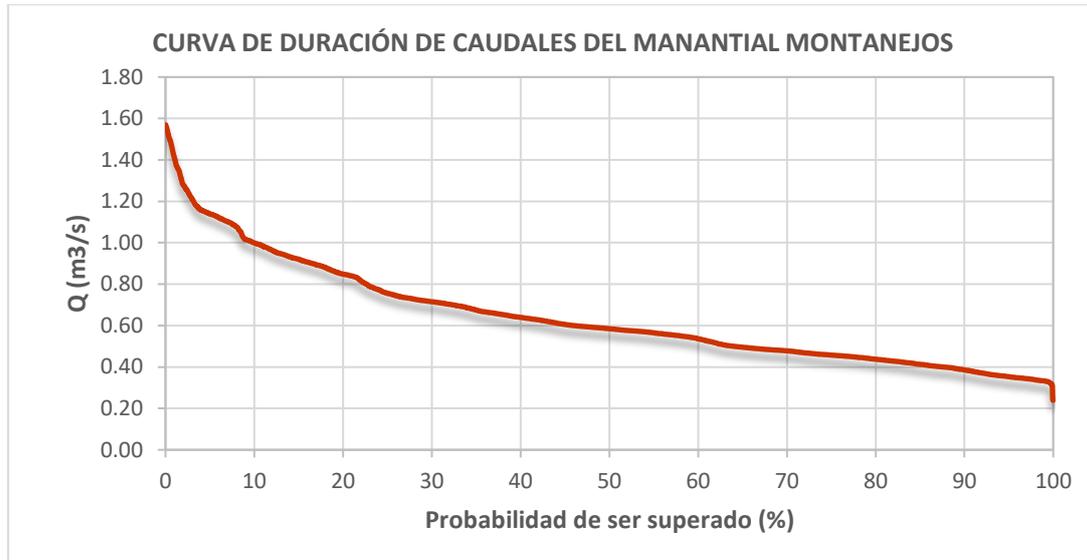


Figura 5.28. Curva de duración de caudales de la descarga del manantial termal Montanejos

5.9. MODELO TÉRMICO DEL RÍO MIJARES EN EL TRAMO MONTANEJOS

5.9.1. Características morfométricas e hidráulicas del cauce

En la Figura 5.29 se muestra la ubicación de los perfiles transversales a lo largo del tramo de estudio. Para la modelación de la temperatura de agua se ha dividido el tramo en siete segmentos en función al cambio de orientación del cauce. Por tanto, las características geométricas representativas para el modelo SSTEMP, será el promedio de la sección aguas arriba y abajo de cada segmento.

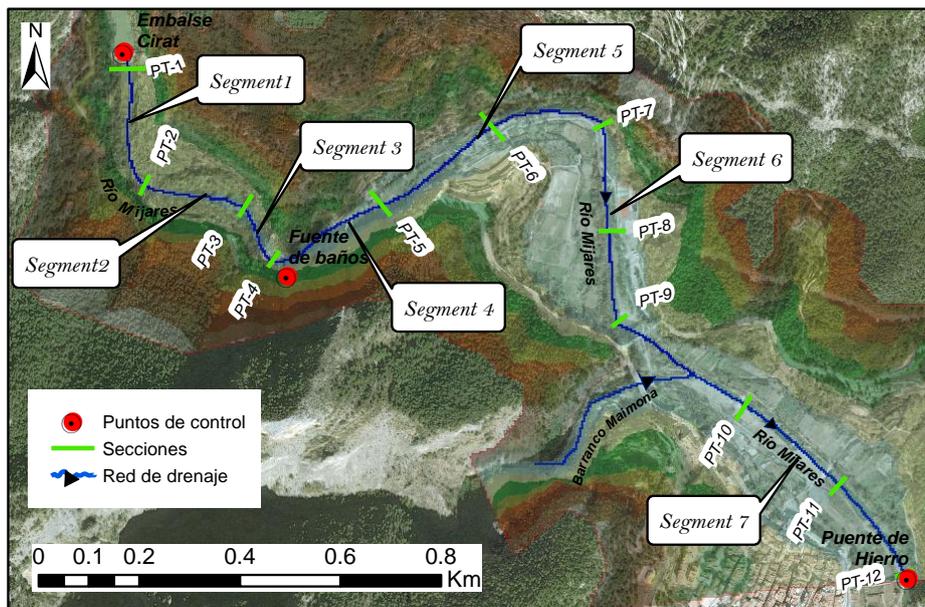
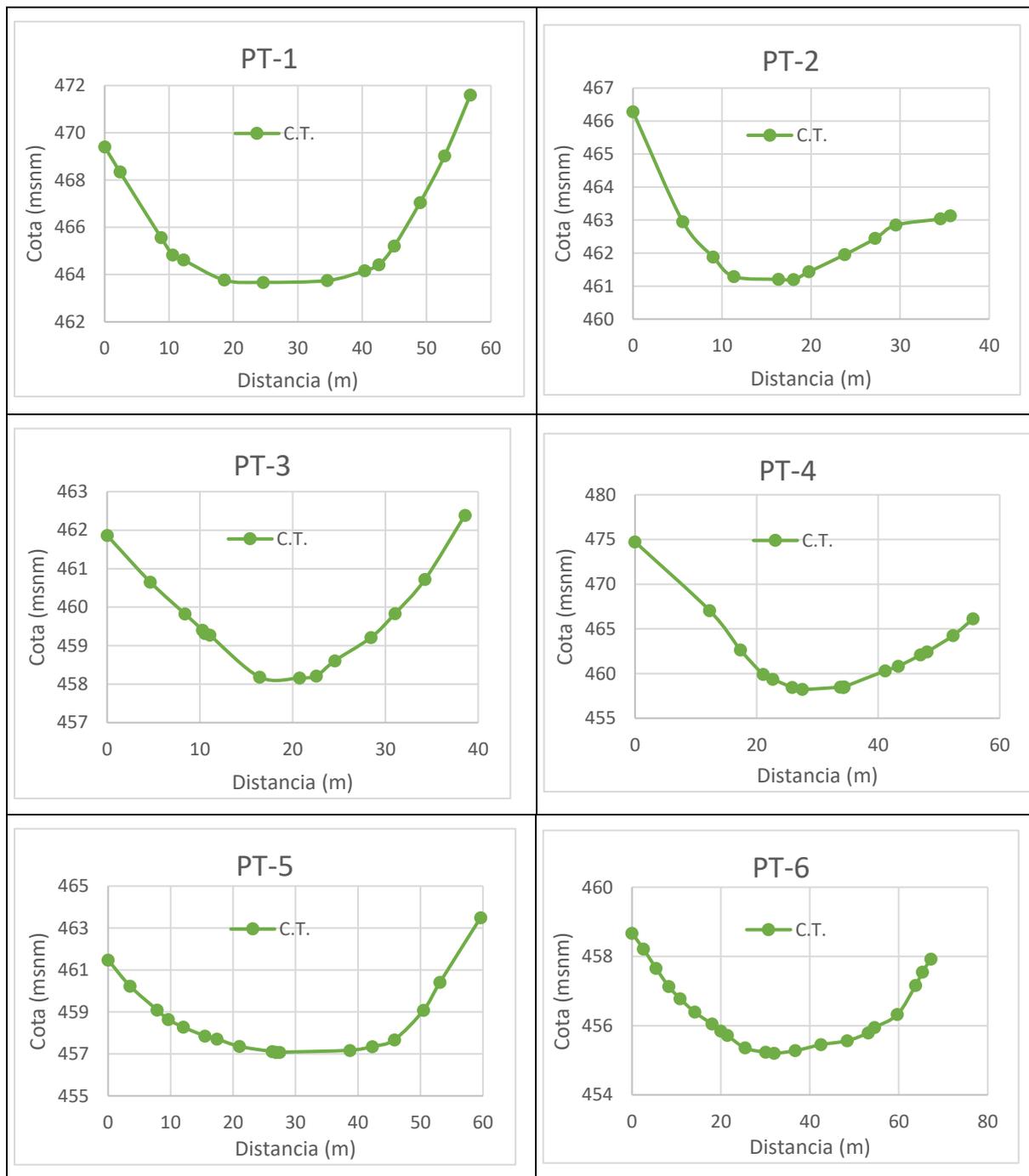


Figura 5.29. Ubicación de los perfiles transversales en el tramo de estudio

A partir del MED se han obtenido las secciones transversales más representativos de cada segmento, representados en la Figura 5.30. Estas fueron trazadas de derecha a izquierda, en sentido del río, tal como se puede ver en la figura. A partir de estas secciones transversales se han obtenido datos de altitud aguas arriba y abajo de cada segmento, para que el modelo térmico en base a esta información pueda estimar el pendiente longitudinal de cada segmento.



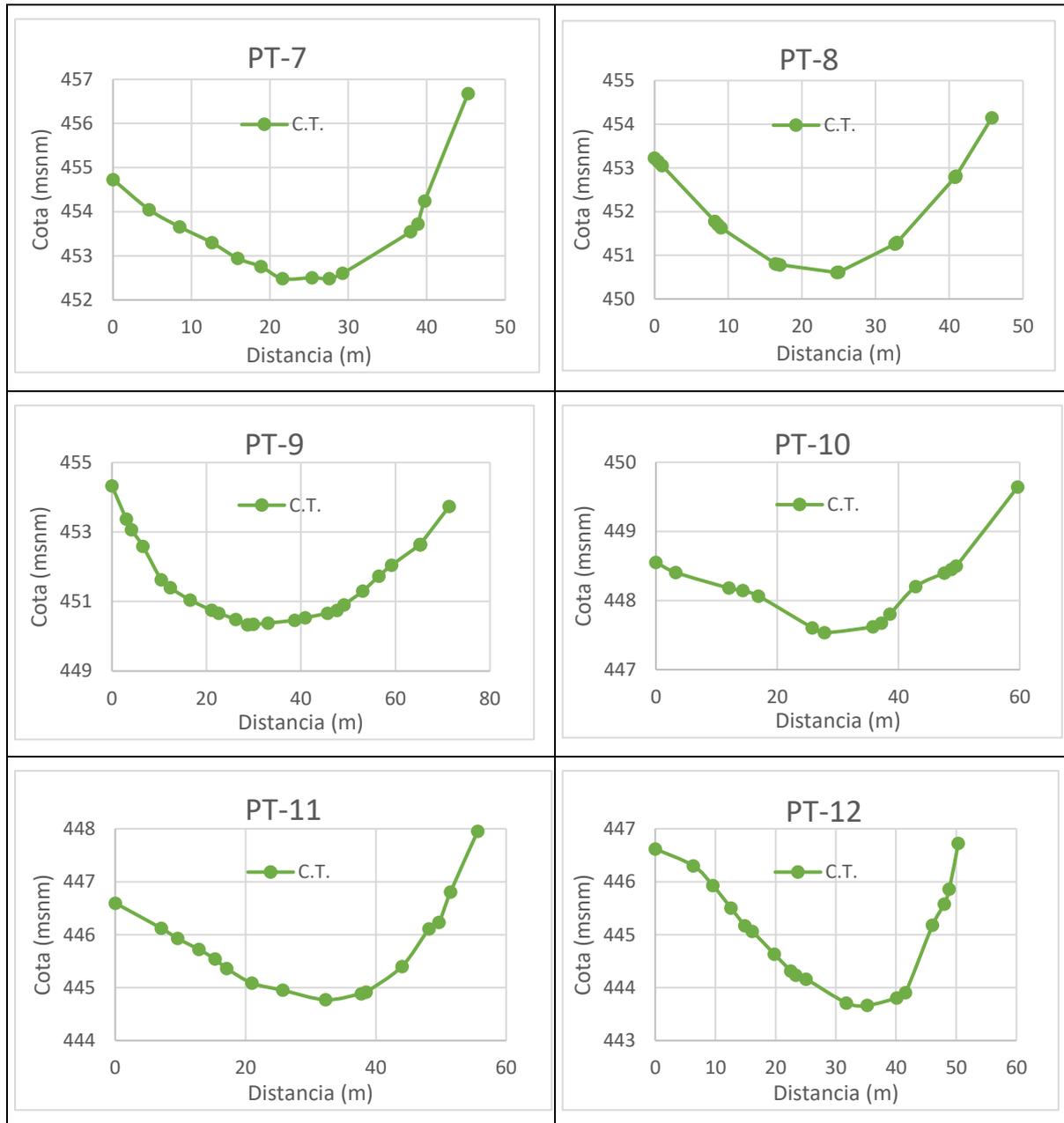


Figura 5.30. Secciones transversales del cauce en el tramo de estudio

De la misma manera, las secciones transversales se utilizaron para estimar la pendiente transversal desde el centro del cauce hacia las dos márgenes. Los cuales son dato de entrada para el modelo a sombra.

Por otro lado, en la Figura 5.31 se muestra la relación de ancho mojado promedio y el caudal, para cada uno de los segmentos, con un coeficiente de estimación R^2 por encima de 0.84, lo que nos indica la buena correlación entre las dos variables. En base a esta información, se obtuvo los términos A y B de la ecuación $W=AQ^B$ para cada uno de los segmentos. Estos parámetros son importantes para representar la geometría del cauce.

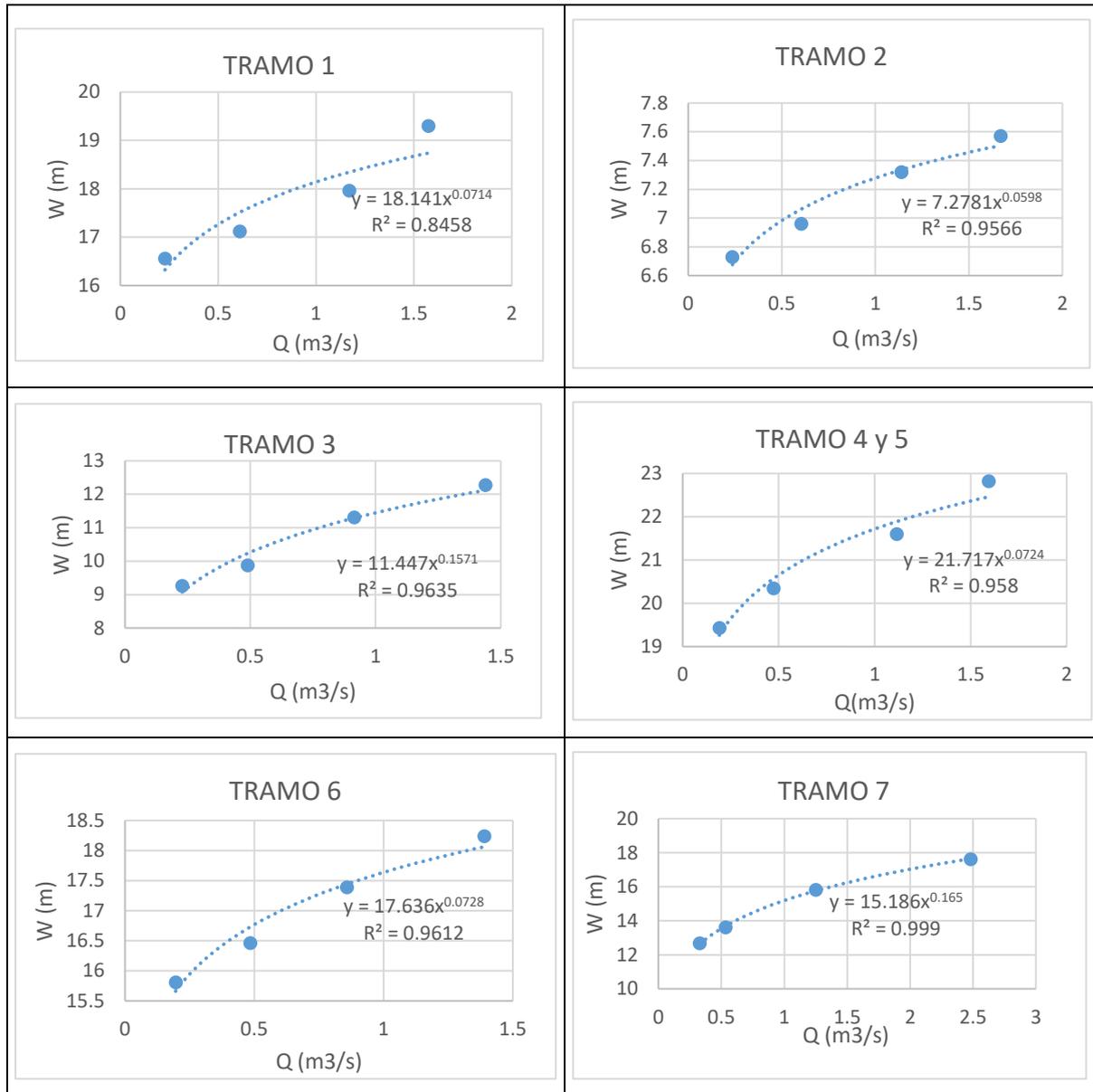


Figura 5.31. Relación de caudal y ancho mojado promedio, obtenido de la modelación hidráulica para cada segmento del tramo de estudio.

En la Tabla 5.11 se presenta el resumen de las características hidráulicas y geométricas de cada uno de los segmentos de estudio, los cuales fueron utilizados en la modelación junto con las demás variables ya mencionadas.

Tabla 5.11. Resumen de características geométricas e hidráulicas del río Mijares en el tramo Montanejos

Tramo	Latitud (°)	Longitud (Km)	Elevación aguas arriba (msnm)	Elevación aguas abajo (msnm)	Termino A (s/m ²)	Termino B	Número de Manning
1	40.076	0.229	464.000	461.970	18.141	0.071	0.035
2	40.075	0.219	461.270	458.280	7.278	0.060	0.035
3	40.074	0.145	457.680	457.280	11.447	0.157	0.035
4	40.075	0.243	456.930	456.320	21.717	0.072	0.030
5	40.075	0.470	456.320	452.640	21.717	0.072	0.030
6	40.075	0.395	452.284	450.555	17.636	0.073	0.035
7	40.070	0.786	450.400	443.740	15.186	0.165	0.035

5.9.2. Calibración del modelo térmico

En este caso se ha realizado la calibración de los parámetros de sombra de vegetación mediante la comparación de temperaturas medias observadas y simuladas al final de cada segmento, correspondiente al mes de mayo del 2018 (Figura 5.32). Esto se realizó con la finalidad de eliminar cierta incertidumbre en la estimación de estos parámetros que inicialmente fueron asignados de acuerdo a la observación in situ. En la figura se puede observar que los valores simulados por el modelo SSTEMP, representan de forma adecuada las temperaturas observadas. Además, podemos notar que la temperatura media del río tiene un comportamiento en forma exponencial, empezando con un valor de 10°C a salida del embalse Cirat para luego alcanzar una temperatura media máxima de 23.5°C aguas abajo de fuente de baños de Montanejos, ubicado en la progresiva 0.836 km.

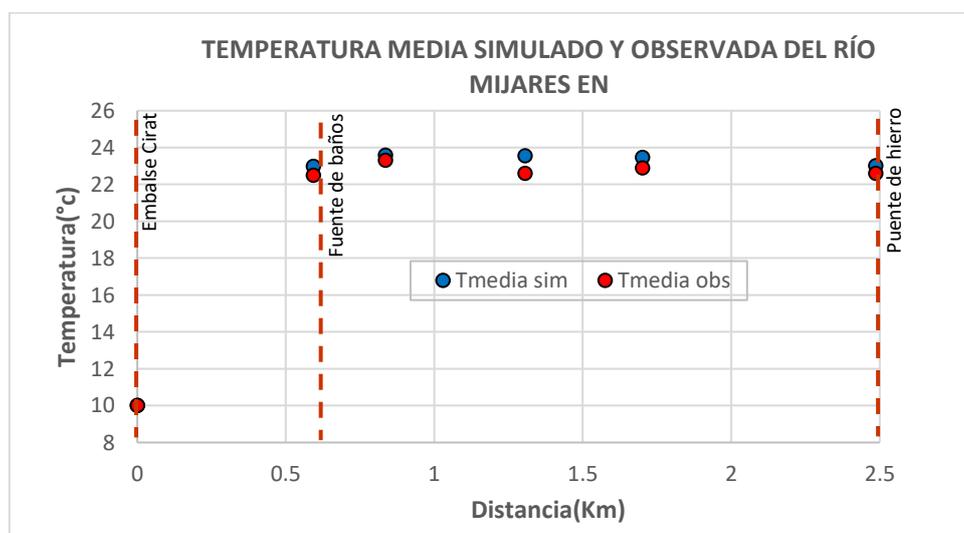


Figura 5.32. Temperatura media observada y simulada del río Mijares al final de cada segmento del tramo de estudio, correspondiente al mes de mayo del 2018

Por otro lado, en la Figura 5.33 se muestra la correlación entre la temperatura media simulada y observada, donde el coeficiente R^2 de 0.9862, representado una buena correlación. A pesar de que el factor sombra es solo uno de los parámetros más influyentes, pero con esta calibración podemos tener la fiabilidad de los resultados, ya que las demás variables dependen más de la precisión de los equipos de medición.

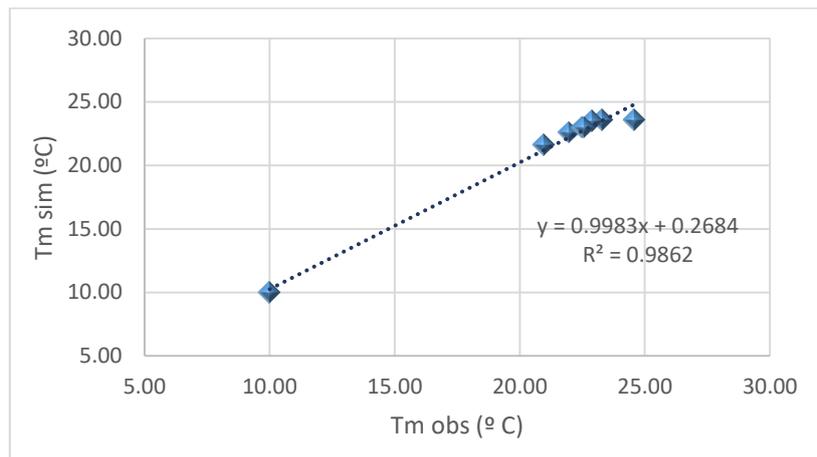


Figura 5.33. Correlación entre la temperatura media observada y simulada

De esta manera se ajustaron los parámetros medios de sombra de vegetación, para que posteriormente en base a estos parámetros calibrados se puedan realizar las predicciones para diferentes escenarios.

5.9.3. Temperatura media sin la suelta de Embalse Cirat

En la Figura 5.34 se muestra los resultados de la simulación de la temperatura media del río Mijares a lo largo del tramo de estudio, para un escenario en que no se realiza sueltas desde el embalse Cirat, sino solamente considerando la descarga propia del manantial termal Montanejos en tiempo seco. En esta figura se aprecia, que en la estación invierno la temperatura llega a descender más que en las demás estaciones a lo largo de todo el tramo de estudio. Mientras que en la estación verano, tiende a incrementar en los primeros tramos, llegando a medir incluso 24°C adyacente a las fuentes de baños, a partir del cual tiende a descender ligeramente, llegando con una temperatura de 23.24°C al puente de hierro.

Como se puede ver en la Figura 5.34, la temperatura más propicia para los visitantes es en las estaciones verano y primavera.

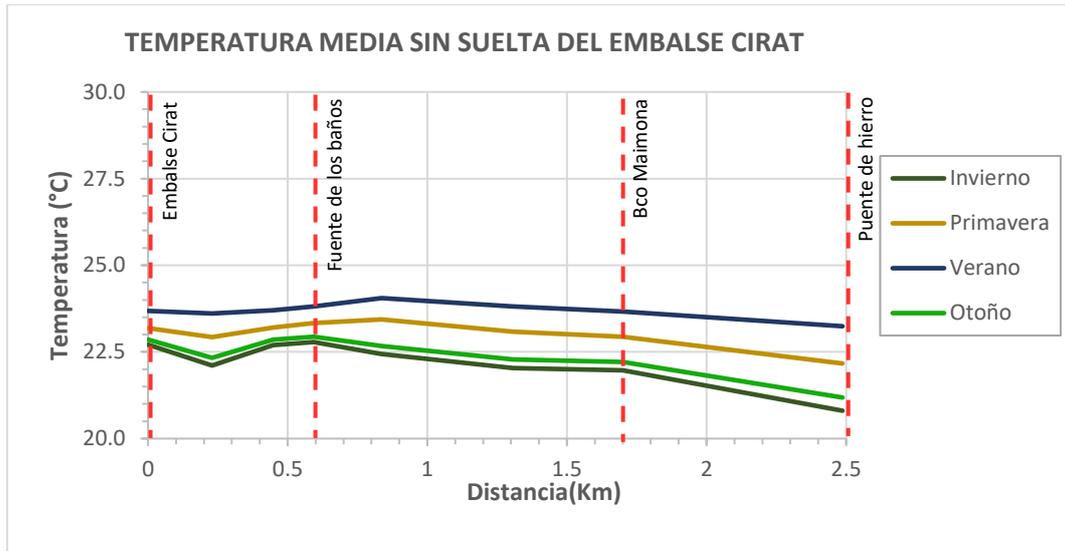


Figura 5.34. Evolución de la temperatura media del río Mijares en el tramo Montanejos, sin suelta del embalse Cirat

5.9.4. Temperatura media con descarga de Embalse Cirat

La simulación de este escenario es considerando el caudal ecológico establecido por el PHJ, que viene a hacer de 0.4 m³/s, así como la descarga del manantial termal Montanejos. Este resultado se representa en la Figura 5.35, donde se puede percibir que la afección en el descenso de las temperaturas medias del río es muy marcado en las cuatro estaciones del año. Siendo el más perjudicial, en el caso de la estación invierno, que registra temperaturas que varía entre 7 - 16°C entre el embalse Cirat y el puente de Hierro.

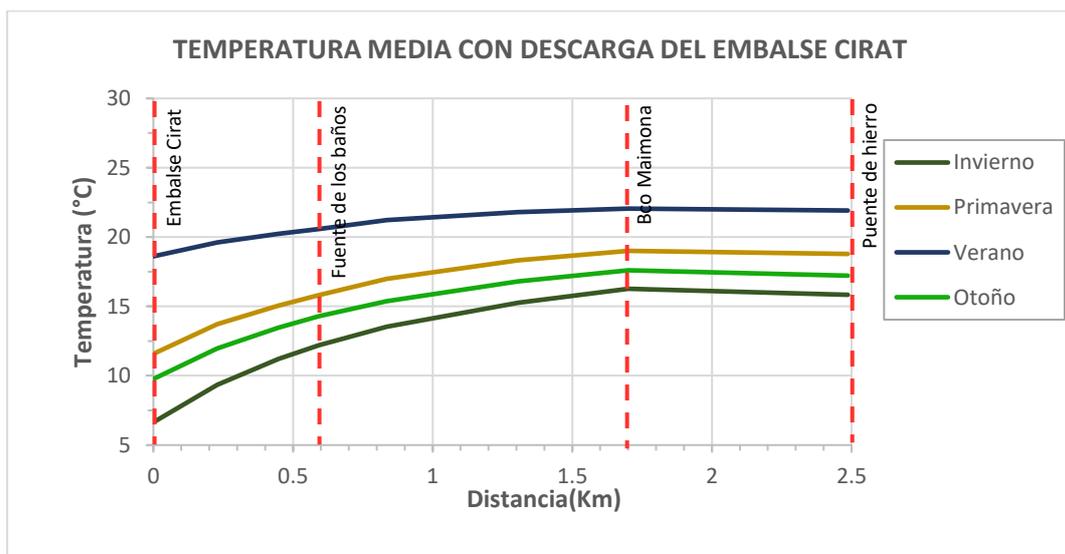


Figura 5.35. Evolución de la temperatura media del río Mijares en el tramo Montanejos con descarga de caudal ecológico desde el embalse Cirat

Mientras el caso más favorable es en la estación de verano, donde la temperatura varía entre 20-22°C en el tramo que tiene mayor potencial turístico, que está delimitado a partir de la ubicación de fuente de baños hasta llegar al barranco la Maimona, es donde se ubica la mayor parte de las pequeñas pozas artificiales hechos por los pobladores de la zona.

Por lo tanto, queda demostrado que la aportación innecesaria del caudal ambiental, tiene repercusiones negativas no solo para el turismo sino también para las especies acuáticas, adaptados a temperaturas más cálidas.

5.9.5. Temperatura media con suelta de E. Cirat para una situación crítica

En este escenario es para un caso hipotético en que las descargas del manantial sufran una reducción importante producto de las sequias prolongadas o el efecto del cambio climático, para esto analizaremos para una probabilidad de ocurrencia de 100%, que corresponde a un caudal de descarga 0.24 m³/s. Por lo tanto, para cumplir con el caudal ecológico se tiene que descargar 0.16m³/s desde el embalse Cirat.

La simulación para este escenario se muestra en la Figura 5.36 , donde se puede ver que las temperaturas medias son similares que en el caso anterior de la Figura 5.35, con la diferencia de que la repercusión menor en verano.

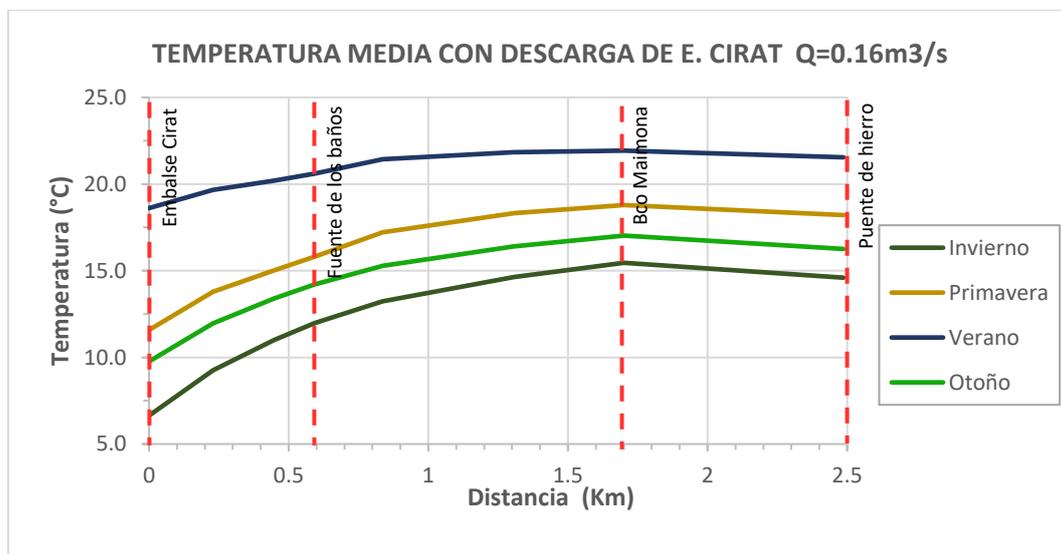


Figura 5.36. Evolución de la temperatura media del río Mijares en el tramo Montanejos para una descarga desde embalse Cirat de $Q=0.16\text{m}^3/\text{s}$

Además, se puede observar claramente que la temperatura media tiende a estabilizarse aguas abajo de fuente de baños en las estaciones verano y primavera. Pero a pesar del descenso de



aproximadamente de 4°C en comparación con el escenario y estación más óptima, sigue siendo propicia las temperaturas medias a lo largo del tramo en la época de verano.

Estos resultados de la modelación de la temperatura media del río, se podrían mejorar si se tuviera registros de temperatura a la salida del embalse Cirat y a lo largo del tramo de estudio, sobre todo en el segundo y tercer escenario, ya que en este caso solo se trabajó en base a temperaturas medias atmosféricas, lo cual genera cierta incertidumbre en el modelo. Así mismo otra de las limitaciones que se presenta en el modelo es la carencia de datos meteorológicos en la zona de estudio, lo cual hace que se recurra a estaciones más cercanas. Sin embargo, a la fecha ya se viene realizando campañas de aforo y registro de temperaturas en los puntos importantes, para luego mejorar la implementación del modelo de temperatura en los posteriores trabajos de investigación.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En lo que se refiere a la modelación hidrológica, se puede concluir que tras inclusión de los fenómenos kársticos, que tienen descargas importantes en los manantiales, se ha conseguido representar de manera satisfactoria el comportamiento de los diferentes procesos hidrológicos tanto en la calibración y validación del modelo, así como en términos de curva de duración de caudales observados y simulados; y que finalmente este modelo implementado ha sido imprescindible para realizar la predicción de la descarga subterráneo del manantial termal Montanejos; utilizando un modelo unicelular para determinar las descargas subterráneas.

Sin embargo, es necesario detallar algunos aspectos importantes obtenidos en la modelación hidrológica distribuida. En lo que respecta a la calibración del modelo en la estación Terde, ha sido necesario corregir la precipitación por el factor orográfico e incluir los fenómenos kársticos, con lo cual se ha podido representar de manera satisfactoria los caudales observados a lo largo de todo el periodo, tanto en volumen y caudal pico, dando mayor ponderación al flujo base. Pero, es en la fase de validación espacial donde se aprecia mejor el efecto de considerar los flujos kársticos a través de la descarga en los manantiales de Babor, Escaleruela y Mar de Royo; reintegrando los flujos subterráneos al río Mijares, tal es así, que el caudal medio a la entrada del embalse Arenós es casi siete veces mayor que en la estación Terde, con apenas el doble de la cuenca aportante. Asimismo, la curva de duración de caudales simulados frente a los observados en la estación Terde, representa de manera adecuada los caudales máximos y mínimos; mientras que en la estación Arenós hay una ligera infraestimación de caudales picos, no obstante, representa muy bien los flujos bases, que son la fuente principal del régimen de caudales ecológicos.

Una vez corroborado la bondad del modelo para reproducir los procesos hidrológicos en la cuenca del Alto Mijares, esto fue usado para realizar la predicción de la descarga subterránea del manantial termal Montanejos, mediante la adaptación de los factores correctores y coeficiente de descarga del acuífero. De donde se obtuvo que la descarga media diaria del manantial es de $0.644 \text{ m}^3/\text{s}$; lo cual nos indica que esta incluso por encima de caudal ecológico establecido por la DHJ, que es de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ para el tramo comprendido entre el embalse Arenós y el Azud Huertacha, por tanto, no será necesario realizar sueltas desde embalse Cirat a menos que se presente situaciones de emergencia o sequías prolongadas, ya que genera ciertas repercusiones negativas en el tramo con potencial turístico, como se ve en el modelo de temperatura del agua.

En la simulación de temperatura del río Mijares en el tramo Montanejos, se consideraron tres escenarios, para ver de qué manera es afectado la temperatura media del río para diferentes descargas subterráneas y superficiales durante las cuatro estaciones del año. Para ello, primero se calibro el modelo por el método prueba y error, ajustando los parámetros en comparación de las temperaturas medias simulados y observadas, obteniéndose resultados muy satisfactorios a lo largo del tramo de estudio, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.99; lo cual nos indica que el modelo representa de manera adecuada los datos observados a pesar de algunas limitaciones en la información disponible para la zona de estudio. En el primer escenario solo se consideró el aporte del manantial termal Montanejos, con una hipótesis de que el flujo subterráneo descarga en forma lineal a lo largo del tramo comprendido entre el embalse Cirat y el barranco la Maimona, lo cual además fue corroborado mediante aforos y una caracterización geológica del acuífero in situ; es así que en la estación invierno la temperatura media llega a descender más que en las demás estaciones a lo largo de todo el tramo de estudio. Mientras que en la estación verano, tiende a incrementar en los primeros tramos, llegando a medir incluso 24°C adyacente a las fuentes de baños, a partir del cual tiende a descender ligeramente, llegando con una temperatura de 23.24°C al puente de hierro.

Por otro lado, en el segundo escenario se realiza una modelación considerando el caudal ecológico establecido por DHJ, donde se ve claramente que tiene una repercusión directa en la temperatura del río, obteniéndose una reducción más de 3°C en el caso más favorables (estación verano) y cerca de 6°C en el mes de invierno. El tercer escenario es similar al segundo, con la diferencia de que la repercusión es menos desfavorable, debido a que la descarga desde el embalse Cirat solo representa el 40% del caudal ecológico, que es un caso hipotético en donde las descargas de manantiales termales sufran una reducción importante, con una probabilidad de ser superado al 100%. Por tanto, podemos concluir que las sueltas desde el embalse Cirat, para un caudal ecológico o mayor a ello, tendrá impactos negativos a nivel turístico y para las especies acuáticas adaptados a las condiciones actuales.

De esta manera se puede dar por cumplido los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, dejando para futuros estudios profundizar la modelación de la temperatura del agua ya sea con un modelo unidimensional o bidimensional, para ello será fundamental la implementación de estaciones meteorológicas e hidrométricas en los puntos más importantes del tramo de estudio para realizar la calibración y validación del modelo, y así obtener un modelo más robusto que sea capaz de reflejar la realidad.



CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. *Evapotranspiración Del Cultivo. Guías Para La Determinación de Los Requerimientos de Agua de Los Cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Alonso, Francisco, and José Antonio Palazón. 2008. Universidad de Murcia *Modelización de Sistemas Ambientales*. Contenido docentes abiertos. <http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales/material-de-clase-1/msa-cap-04.pdf>.
- Bartholow. 2010. “Stream Network and Stream Segment Temperature Models Software.” : 276. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/96233>.
- Bartholow, J. 2002. “SSTEMP for Windows: The Stream Segment Temperature Model (Version 2.0).” : 1–24. <http://www.fort.usgs.gov/%0A>.
- Beven, K. J., and M. J. Kirkby. 1979. “A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology.” *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1): 43–69.
- Beven, Keith, and Jim Freer. 2001. “Equifinality, Data Assimilation, and Uncertainty Estimation in Mechanistic Modelling of Complex Environmental Systems Using the GLUE Methodology.” *Journal of Hydrology* 249(1–4): 11–29.
- Bladé, E. et al. 2014. “Iber: Herramienta de Simulación Numérica Del Flujo En Ríos.” *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria* 30(1): 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Bussi, Gianbattista. 2013. “Implementation of a Distributed Sediment Model in Different Data Availability Scenarios.” Universitat Politècnica de València.
- CHJ. 2015. “Estudio General Sobre La Demarcación Hidrográfica Del Júcar.” <http://www.chj.es/es-es/Organismo/Paginas/Organismo.aspx>.
- Chow, Ven Te. 1994. *Hidráulica de Canales Abiertos*. ed. Martha Edna Suárez R. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Chow, Ven Te, David R. Maidment, and Larry W. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia.
- DIHMA. 2001. “Un Modelo de Predicción de Crecidas Para El SAIH de La Confederación Hidrográfica Del Tajo.” In *Informe Final Para UTE SAIH TAJO*, Valencia, España, 290.
- Duan, Q., V. Gupta, and S. Sorooshian. 1992. “Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-runoff Models.” *Water resources research* 28(4): 1015–31.
- Duan, Q., S. Sorooshian, and V.K. Gupta. 1994. “Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models.” *Journal of Hydrology* 158(3–4): 265–84.
- Edinger, John E., John C. Geyer, and David W. Duttweiler. 1968. “The Response of Water Temperature to Meteorological Conditions.” *Water Resources Research* 4(7): 1137–43.
- Frances, F. et al. 2017. Universidad Politècnica de Valencia Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) *Manual Del Usuario Programa TETIS V.8.3.1*. Valencia, España.
- Francés, Félix et al. 2014. “Descripción Del Modelo Conceptual Distribuido de Simulación

- Hidrológica TETIS v. 8.” In *Universidad Politécnica de Valencia Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA)*, Valencia, España, 86.
- Francés, Félix, Jaime Vélez, and Jorge Vélez. 2007. “Split-Parameter Structure for the Automatic Calibration of Distributed Hydrological Models.” *Journal of Hydrology* 332(1–2): 226–40.
- Gaona, Jaime. 2015. “Análisis de La Implementación Del Modelo Hidrológico Distribuido TETIS Con Información Estándar e Incluyendo Los Procesos Kársticos En La Cuenca Alta Del Río Mijares.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Grayson, R., and G. Blöschl. 2001. *Spatial Modelling of Catchment Dynamics*. In *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. ed. Cambridge University Press. Cambridge.
- Hargreaves, G H, and R G Allen. 2003. “History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce* 129(1): 53–63.
- Hermosilla, Jorge, and Javier Ferrer. 2011. “Los Regadíos Tradicionales Del Alto Mijares” eds. Confederacion Hidrográfica del Júcar (CHJ) and MMARM. *Confederación hidrográfica del Júcar Ministerio de Medio Ambiente y del Medio Rural y Marino*. [http://www.chj.es/ES-ES/CIUDADANO/LIBROS/Paginas/Indice.aspx?Libro=Los regadíos tradicionales del Alto Mijares](http://www.chj.es/ES-ES/CIUDADANO/LIBROS/Paginas/Indice.aspx?Libro=Los%20regad%C3%ADos%20tradicionales%20del%20Alto%20Mijares).
- IIAMA. 2013. Plan Director de Defensa contra las Avenidas Comarca de la Marina Alta. Alicante “Informe de Modelación Hidrológica de Las Cuencas Vertientes a La Comarca de La Marina Alta (Alicante).” Confederación Hidrográfica del Júcar.
- Kirkby, M. J., and R. J. Chorley. 1967. “Throughflow, Overland Flow and Erosion.” *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin* 12(3): 5–21.
- Legates, David R, and Gregory J McCabe Jr. 2005. “Evaluating the Use of ‘Goodness of Fit’ Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation.” *Water Resources Research* 35(1): 233–41. http://www.brr.cr.usgs.gov/projects/SW_precip_runoff/McCabe/pap...
- Leopold, L.B., and T. Maddock. 1953. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. US Government Printing Office.
- Llamas, José. 1993. *Hidrología General*. Québec, Canada.
- Malagò, Anna et al. 2016. “Regional Scale Hydrologic Modeling of a Karst-Dominant Geomorphology: The Case Study of the Island of Crete.” *Journal of Hydrology* 540: 64–81.
- Moraetis, Daniel et al. 2010. “High-Frequency Monitoring for the Identification of Hydrological and Bio-Geochemical Processes in a Mediterranean River Basin.” *Journal of Hydrology* 389(1–2): 127–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.037>.
- Moriasi, D.N. et al. 2007. “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.” *Transactions of the ASABE* 50(3): 885–900. <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=23153&CID=t2007&v=50&i=3&T>

=1.

- Nikolaidis, N. P., F. Bouraoui, and G. Bidoglio. 2013. 477 *Journal of Hydrology* “Hydrologic and Geochemical Modeling of a Karstic Mediterranean Watershed.” Elsevier B.V. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.018>.
- Nikolaidis, Nikolaos P. 2011. “Human Impacts on Soils: Tipping Points and Knowledge Gaps.” *Applied Geochemistry* 26(SUPPL.): S230–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.111>.
- Ocampo, O., and J. J. Vélez. 2014. “Análisis Comparativo de Modelos Hidrológicos de Simulación Continua En Cuencas de Alta Montaña : Caso Del Río Chinchiná.” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 13(24): 43–58.
- Olaya F., Víctor. 2004. *Hidrología Computacional y Modelos Digitales Del Terreno*. <http://heart.sf.net/textos>.
- Pérez Cueva, A. J. 1994. *Atlas Climático de La Comunidad Valenciana (1961-1990)*. Valencia, España.
- Puricelli, D. Marino M. 2003. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia “Estimación y Distribución de Parámetros Del Suelo Para La Modelación Hidrológica.” <http://dspace.cc.upv.es/handle/10251/2904>.
- Ramírez, Lina Margarita. 2012. “Análisis de La Implementación de Un Modelo Hidrológico Distribuido Con Información Estándar En España.” Universitat Politècnica de València.
- Ramos, Lia. 2013. “Estudio de La Utilidad de La Lluvia Estimada de Satelite En La Modelación Hidrológica Distribuida.” Universitat Politècnica de València. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27548/Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida 5598_5599.pdf?sequence=11](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27548/Estudio%20de%20la%20utilidad%20de%20la%20lluvia%20estimada%20de%20sat%C3%A9lite%20en%20la%20modelaci%C3%B3n%20hidrol%C3%B3gica%20distribuida%205598_5599.pdf?sequence=11).
- Rios, R. 2017. “Análisis de La Implementación Del Modelo Hidrológico Distribuido TETIS En El Ámbito Regional de La Demarcación Hidrográfica Del Júcar Utilizando Información Estandar.” Universitat Politècnica de València.
- Sahuquillo, Á., E. Cassiraga, A. Solera, and J.M. Murillo. 2010. *Modelos de Uso Conjunto de Aguas Superficiales y Subterráneas*. ed. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España.
- Saxton, K. E., and W. J. Rawls. 2006. “Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions.” *Soil Science Society of America Journal* 70(5): 1569. <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/70/5/1569>.
- Schaap, Marcel G., and Martinus Th. Van Genuchten. 2006. “A Modified Mualem–van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation.” *Vadose Zone Journal* 5(1): 27. <https://www.soils.org/publications/vzj/abstracts/5/1/27>.
- Searcy, James K. 1959. “Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Techniques - Flow-Duration Curves.” *Geological Survey Water-Supply Paper* 1542-A: 33. <http://pubs.usgs.gov/wsp/1542a/report.pdf>.
- Sinokrot, Bashar A., and Heinz G. Stefan. 1993. “Stream Temperature Dynamics:



Measurements and Modeling.” *Water Resources Research* 29(7): 2299–2312.

Stella, J.M. 2013. “Stream Water Temperature Simulation Models : A Review.” *Revista Sociedad Uruguaya de Geología* 18: 10–19.

Theurer, F.D., K.A. Voos, and W.J. Miller. 1984. “Instream Water Temperature Model.” *Instream Flow and Aquatic System Group, U.S. Fish & Wildlife Service*: 344.

Vélez, Jorge Julián. 2003. “Desarrollo de Un Modelo Distribuido de Predicción En Tiempo Real Para Eventos de Crecidas.” Universidad Politécnica de Valencia.

