

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL RÉGIMEN HÍDRICO DE UN RÍO TEMPORAL: CASO DEL RÍO AMADORIO EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR.

Intensificación: Análisis de Sistemas de recursos Hídricos.

Autor:

JOHNATHAN CELEITA MOLINA

Tutor:

FÉLIX FRANCÉS GARCÍA.

Cotutores:

SARA JIMÉNEZ ARGUDO.

TEODORO ESTRELA MONREAL

SEPTIEMBRE, 2018.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

DATOS DEL PROYECTO

Título del TFM en español: CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL RÉGIMEN HÍDRICO DE UN RÍO TEMPORAL: CASO DEL RÍO AMADORIO EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR.

Título del TFM en inglés: CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF THE HISTORICAL EVOLUTION OF THE WATER REGIME OF A TEMPORARY RIVER: CASE OF THE AMADORIO RIVER IN THE HYDROGRAPHIC DEMARCATION OF JÚCAR.

Título del TFM en valenciano: CARACTERITZACIÓ I ANÀLISI DE L'EVOLUCIÓ HISTÒRICA DEL RÈGIM HÍDRIC D'UN RIU TEMPORAL: CAS DEL RIU AMADORIO A LA DEMARCACIÓ HIDROGRÀFICA DEL XÚQUER.

Alumno: JOHNATHAN CELEITA MOLINA.

Director: FÉLIX FRANCÉS GARCÍA.

Codirector/es: TEODORO ESTRELA, SARA JIMENEZ ARGUDO.

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE 2018

RESUMEN

En español (máximo 2000 palabras)

La Directiva Marco del Agua (D. 2000/60/CE) establece que es necesario evaluar el estado de las masas de agua y recoge los indicadores a emplear en su evaluación; no obstante, en la vertiente mediterránea, debido a sus características climáticas, existen masas de agua que son ríos temporales en los que el caudal circulante es variable y en ocasiones prácticamente nulo para varios meses del año, en estas masas no siempre es posible utilizar los indicadores de estado que se aplican en las masas de agua de ríos permanentes.

Conocer el régimen hidrológico de estos ríos en condiciones naturales resulta indispensable para determinar su comportamiento y el grado de alteración hidrológica. En estos casos es necesario utilizar modelos que permitan simular el régimen hidrológico al menos a escala diaria; el modelo TETIS desarrollado por la UPV resulta una herramienta valiosa para evaluar dicha temporalidad y comportamiento en los cauces mediterráneos.

Se eligió como caso de estudio la cuenca hidrográfica del río Amadorio debido a los importantes cambios en el régimen hidrológico que allí se han evidenciado; la reducción en las aportaciones al embalse a partir de los años 80s y la desaparición del flujo base registrada por algunas estaciones de aforo en la zona plantea un interrogante, ¿Qué cambios en la cuenca pudieron influir de forma significativa en la reducción de las aportaciones al embalse y en el cambio de la relación río-acuífero?

Para dar respuesta a este cuestionamiento fue necesaria la calibración y validación de un modelo hidrológico de tipo distribuido para la cuenca del embalse Amadorio con la herramienta TETIS; a partir de este modelo se plantearon dos etapas de análisis:

- Para la primera etapa a mediano plazo, se eligió el periodo 1970-2016 debido a la información meteorológica disponible, en él se analizó la influencia de variables como la precipitación, evapotranspiración de referencia y cambios en la cubierta vegetal como posibles causantes de la reducción de las aportaciones al embalse. Como resultado se obtuvo a partir del modelo, que la disminución de cerca del 60% de los recursos registrada se debe principalmente a una tendencia a la baja de la precipitación (47.4%), seguida de los cambios en la cubierta vegetal (7.6%) y por último a una tendencia creciente de la evapotranspiración de referencia (5.1%). Todo lo anterior sin considerar afectaciones al flujo base ya que en las aportaciones observadas en las estaciones de aforo del periodo 1970-2016 no se evidencia una componente subterránea.
- En la segunda etapa de análisis a largo plazo, fue necesaria la interpolación de información meteorológica desde otras cuencas para ampliar el periodo de estudio hasta principios del siglo XX, tiempo en el cual se apreciaba en algunos aforos una clara componente base para el río Amadorio aguas arriba del embalse principalmente; de forma complementaria, para examinar la afectación de los bombeos a la relación río-acuífero fue necesario implementar junto con TETIS un modelo de tanque unicelular que permitiera simular las aportaciones al cauce y la disminución de los niveles del acuífero. A partir de los cambios en el modelo, se analizaron nuevamente los distintos factores que podrían ser los causantes de la reducción en las aportaciones y la desaparición del flujo base en los cauces en estudio, encontrando que un salto en la precipitación a partir de los años 80s y no una tendencia negativa, sería la causante de la desaparición del flujo base en cerca de un 72.31%; con menor influencia, a los bombeos se atribuiría cerca de un 12.42% del cambio en la relación río-acuífero, y solo un 7.2% para los cambios en los usos del suelo y 5.8% para el aumento de la evapotranspiración de referencia.

Por último, como aplicación a los resultados del modelo, se implementó la herramienta TREHS del proyecto Life TRivers de ríos Temporales, para caracterizar el hidrotipo de los cauces Amadorio y Sella por separado; gracias a este estudio se clasificó el río Amadorio aguas arriba del embalse como un río Ocasional con una permanencia de flujo cercana al 40%; en contraste, el Sella fue clasificado como un río Alternado fluyente con una permanencia de cerca del 70%. Con el fin de corroborar la información recopilada se realizó una visita de campo en la cual se confirmaron parcialmente los resultados del modelo y se amplió el conocimiento de la cuenca y el sistema en general.

En valenciano (máximo 2000 palabras)

La Directiva Marco de l'Aigua (D. 2000/60/CE) establíx que és necessari avaluar l'estat de les masses d'aigua i arreplega els indicadors a emprar en la seua avaluació; no obstant això, en el vessant mediterrani, a causa de les seues característiques climàtiques, hi ha masses d'aigua que són rius temporals en què el cabal circulant és variable i de vegades pràcticament nul per a uns quants mesos de l'any, en estes masses no sempre és possible utilitzar els indicadors d'estat que s'apliquen en les masses d'aigua de rius permanents.

Conèixer el règim hidrològic d'estos rius en condicions naturals resulta indispensable per a determinar el seu comportament i el grau d'alteració hidrològica. En estos casos és necessari utilitzar models que permeten simular el règim hidrològic almenys a escala diària; el model TETIS desenrotllat per la UPV resulta una ferramenta valuosa per a avaluar la dita temporalitat i comportament en els llits mediterranis.

Es va triar com a cas d'estudi la conca hidrogràfica del riu Amadorio a causa dels importants canvis en el règim hidrològic que allí s'han evidenciat. La reducció en les aportacions a l'embassament a partir dels anys 80s i la desaparició del flux base registrada per algunes estacions d'aforament en la zona planteja un interrogant, Quins canvis en la conca van poder influir de forma significativa en la reducció de les aportacions a l'embassament i en el canvi de la relació riu-aqüífer?

Per a donar resposta a este qüestionament va ser necessària la calibratge i validació d'un model hidrològic de tipus distribuït per a la conca de l'embassament Amadorio amb la ferramenta TETIS; a partir d'este model es van plantejar dos etapes d'anàlisi:

- Per a la primera etapa a mitjà termini, es va triar el període 1970-2016 a causa de la informació meteorològica disponible, en ell es va analitzar la influència de variables com la precipitació, evapotranspiració de referència i canvis en la coberta vegetal com a possibles causants de la reducció de les aportacions a l'embassament. Com resultat es va obtenir a partir del model, que la disminució de prop del 60% dels recursos registrada es deu principalment a una tendència a la baixa de la precipitació (47.4%) , seguida dels canvis en la coberta vegetal (7.6%) i per ultime a una tendència creixent de l'evapotranspiració de referència (5.1%) . Tot l'anterior sense considerar afectacions al flux base ja que en les aportacions observades en les estacions d'aforament del període 1970-2016 no s'evidencia una component subterrània.
- En la segona etapa d'anàlisi a llarg termini, va ser necessària la interpolació d'informació meteorològica des d'altres conques per a ampliar el període d'estudi fins a principis del segle XX, temps en el qual s'apreciava en alguns aforaments una clara component base per al riu Amadorio aigües dalt de l'embassament principalment; de forma complementària, per a examinar l'afectació dels bombaments a la relació riu- aqüífer va ser necessari implementar junt amb TETIS un model de tanc unicel·lular que permetera simular les aportacions al llit i la disminució dels nivells de l'aqüífer. A partir dels canvis en el model, es van analitzar novament els distints factors que podrien ser els causants de la reducció en les aportacions i la desaparició del flux base en els llits en estudi, trobant que un bot en la precipitació a partir dels anys 80s i no una tendència negativa, seria la causant de la desaparició del flux base en prop d'un 72.31%; amb menor influència, als bombaments s'atribuiria prop d'un 12.42% del canvi en la relació riu-aqüífer, i només un 7.2% per als canvis en els usos del sòl i 5.8% per a l'augment de l'evapotranspiració de referència.

Finalment, com a aplicació als resultats del model, es va implementar la ferramenta TREHS del projecte Life TRivers de rius Temporals, per a caracteritzar l'hidrotipo dels llits Amadorio i Sella per separat; gràcies a este estudi es classifique el riu Amadorio aigües dalt de l'embassament com un riu Ocasional amb una permanència de flux pròxima al 40%; en contrast, el Sella va ser

classificat com un riu Alternat fluent amb una permanència de prop del 70%. A fi de corroborar la informació recopilada es va realitzar una visita de camp en la qual es van confirmar parcialment els resultats del model i es va ampliar el coneixement de la conca i el sistema en general.

En inglés (máximo 2000 palabras)

The Water Framework Directive (D. 2000/60 / EC) establishes that it is necessary to assess the state of water bodies and collects the indicators to be used in their evaluation; however, on the Mediterranean side, due to its climatic characteristics, there are bodies of water denominated temporary rivers in which the flow is variable and sometimes practically zero for several months of the year, in these masses it is not always possible to use the state indicators that are applied in the water masses of permanent rivers.

Knowing the hydrological regime of these rivers in natural conditions is essential to determine their behavior and the degree of hydrological alteration. In these cases it is necessary to use models that simulate the hydrological regime at least on a daily scale; The TETIS model developed by the UPV is a valuable tool to assess such temporality and behavior in the Mediterranean rivers.

The Amadorio river basin was chosen as the case study due to the important changes in the hydrological regime that have been evidenced there. The reduction in the contributions to the reservoir since the 80s and the disappearance of the base flow recorded by some gauging stations in the area raises a question: What changes in the basin could have a significant influence on the reduction of contributions to the reservoir and in the change of the river-aquifer relationship?

To answer this questioning, it was necessary to calibrate and validate a hydrological model distributed for the Amadorio reservoir basin with the TETIS tool; from this model, two stages of analysis were considered:

- For the first medium-term stage, the period 1970-2016 was chosen due to the available meteorological information, in this period the influence of variables such as precipitation, reference evapotranspiration and changes in vegetation cover as possible causes of the reduction in the contributions to the reservoir were analyzed. As a result, it was obtained from the model that the decrease of about 60% of the resources recorded is mainly due to a downward trend in precipitation (47.4%), followed by changes in vegetation cover (7.6%). and finally to a growing trend of reference evapotranspiration (5.1%). All of the above, without considering the effects of the base flow, since there is no evidence of an underground component in the contributions observed in the gauging stations of the period 1970-2016.
- In the second stage of long-term analysis, it was necessary to interpolate meteorological information from other basins to extend the study period until the beginning of the 20th century, at which time a clear base component for the Amadorio River was appreciated in some surveys. upstream of the reservoir mainly; In a complementary way, to examine the effect of pumping on the river-aquifer relationship, it was necessary to implement, together with TETIS, a single-cell tank model that would simulate the contributions to the river and the decrease in aquifer levels. From the changes in the model, the different factors that could be the cause of the reduction in the contributions and the disappearance of the base flow in the study channels were analyzed again, finding that a jump in precipitation from the 80s and not a negative trend, it would be the cause of the disappearance of the base flow in about 72.31%; with less influence, pumping would be attributed to about 12.42%

of the change in the river-aquifer relationship, and only 7.2% for changes in land use and 5.8% for the increase in reference evapotranspiration.

Finally, as an application to the results of the model, the TREHS tool of the Life TRivers project of Temporal rivers was implemented to characterize the hydrotype of the Amadorio and Sella rivers separately; Thanks to this study, the Amadorio river was classified upstream of the reservoir as an Occasional river with a flow permanence close to 40%; in contrast, the river Sella was classified as a flowing river with a permanence of about 70%. In order to corroborate the information collected, a field visit was carried out in which the results of the model were partially confirmed and knowledge of the basin and the system in general was expanded.

Palabras clave español (máximo 5): Ríos temporales, régimen hidrológico, reducción de aportación, relación río-acuífero.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Rius temporals, règim hidrològic, reducció d'aportació, relació riu-aquífer.

Palabras clave inglés (máximo 5): Temporary rivers, hydrological regime, reduction of contribution, river-aquifer relation.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, el cual me ha sostenido a mí y a mis seres queridos en los momentos más difíciles; porque sus planes y tiempos son perfectos, y siempre debemos confiar en su amor y respaldo incondicional.

En lo académico agradezco a mis tutores, el profesor Félix Francés por su gran apoyo y asesoría, ya que a través de su tranquilidad y visión de conjunto logró guiarme en este proceso a buen puerto; a Sara, por enseñarme con tanta paciencia la problemática en el análisis de los ríos temporales en la Demarcación del Júcar, las visitas de campo, su actitud refrescante y positiva hicieron de este proyecto una experiencia enriquecedora; a Teodoro Estrella, director de la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) porque a través de su energía me contagié la importancia del análisis de una zona tan vulnerable como la Marina Baja. Mis más sinceros agradecimientos también a la Confederación Hidrográfica del Júcar por brindarme la oportunidad de participar en este apasionante proyecto.

Este proyecto no habría sido posible sin la ayuda de técnicos e investigadores que me guiaron y compartieron su conocimiento desde su especialidad; por ello quiero agradecer especialmente a dos grupos de trabajo; el primero es el Grupo de Investigación y Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), donde Cristina y Vicente fueron fundamentales en el aprendizaje de TETIS como herramienta de modelación hidrológica, gracias por su tiempo y aportación a este proyecto. El segundo grupo, son todos los técnicos de la OPH, a María José, Mikel, Antonio, Pascual, Rosa, Juan, Mamen, Manuel, Rafa, Laura y especialmente a Francés; compartir y sentirse parte de un grupo de trabajo tan especial facilita el aprendizaje y te motiva en la consecución de tus metas.

A todos mis amigos del MIHMA, su amistad y complicidad es el premio que más valoro en mi experiencia en Valencia.

Agradezco a mis padres y a mi padrastro por su esfuerzo y aliento a lo largo de mi vida académica y laboral; ellos han sido un ejemplo de coraje y valentía, por ellos me esmero cada día en ser un mejor profesional y una mejor persona.

Ultima en estos agradecimientos, pero la primera en mi vida, agradezco a Mayerli Patiño, por ser mi motor en los momentos de duda y por brindarme tanta felicidad con solo existir. Gracias mi chiki.



TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
MOTIVACIÓN.....	4
OBJETIVOS.....	6
1.1 Objetivo General.....	6
1.2 Objetivos específicos.....	6
METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
EL MODELO HIDROLÓGICO TETIS.....	9
MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL Y DISTRIBUIDO TETIS.....	10
2.1 Conceptualización de procesos físicos.....	10
2.2 Interpolación de Variables espaciales.....	12
2.3 Producción de escorrentía.....	12
2.4 Factores correctores.....	14
2.5 Calibración automática.....	15
2.6 Limitaciones del modelo.....	16
CAPÍTULO 3.....	17
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMADORIO.....	17
ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.1 Descripción Geográfica.....	18
3.2 Climatología.....	19
3.3 Topografía.....	20
3.4 Marco Geológico e Hidrogeológico.....	21
3.5 Usos del Suelo.....	22
3.6 Demanda agrícola y Comunidades de Regantes.....	23
3.7 Demanda Urbana.....	26
3.8 Análisis de la gestión en la cuenca hidrográfica del Amadorio e Infraestructura hidráulica existente.....	27
CAPÍTULO 4.....	31
RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA.....	31
INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	32



4.1 Datos Observacionales de Precipitación.....	32
4.2 Datos observacionales de temperatura.....	34
4.3 Evapotranspiración de Referencia (ETo)	35
INFORMACIÓN HIDRÓLOGICA	37
4.4 Estaciones de Aforo y Puntos de Observación de caudales.....	37
4.5 Restitución a Régimen Natural P.O. Embalse del Amadorio.....	41
4.6 Análisis de la información hidrológica.....	44
CAPÍTULO 5.....	46
ESTIMACIÓN DE PARAMETROS CON VARIABILIDAD ESPACIAL.....	46
ESTIMACIÓN DE PARAMETROS CON VARIABILIDAD ESPACIAL.....	47
5.1 Modelo de elevación digital.....	48
5.2 Mapa de Pendientes	48
5.3 Direcciones de Flujo.....	49
5.4 Celdas Drenantes Acumuladas.....	50
5.5 Velocidad de Ladera	50
5.6 Códigos de Cubierta del Suelo	51
5.6.1 Regresión de la cobertura del suelo a la década del 60s.....	52
5.7 Intercepción por vegetación	54
Factor de Cobertura Vegetal o Factor de Cultivo (Kc).....	56
5.8 Almacenamiento estático	58
a. Mapa de profundidad de raíces y b. Almacenamiento Superficial por Charcos.....	58
c. ROO Profundidad de Obstaculos y d. Available Water Content (AWCTOP).....	59
e. Almacenamiento en Pendiente (mm).....	61
5.9 Capacidad de infiltración (mm/hr)	61
5.10 Capacidad de percolación (mm/hr)	62
CAPÍTULO 6.....	64
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	64
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	65
6.1 Eventos de Calibración y Validación.....	65
6.2 Calibración del modelo.....	67
6.3 Validación Temporal del modelo.....	69
6.4 Validación Temporal y Espacial del modelo (Periodo Década 70s).....	72
CAPÍTULO 7.....	76
EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS INPUTS A MEDIANO PLAZO POR CONTRASTE ENTRE LA DECADA DEL 70 Y LA ACTUALIDAD	76



INFLUENCIA DE LOS INPUTS EN EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA E. AMADORIO POR CONTRASTE ENTRE LA DECADA DEL 70 Y EL PERIODO ACTUAL.....	77
7.1 Inputs entre el periodo 1970-2016 con influencia en el régimen hidrológico del cauce.	77
7.2 Planteamiento de escenarios Mediano Plazo.	82
7.2.1 Escenario 1 Efecto de la variación en la cubierta vegetal y usos del suelo.....	82
7.2.2 Escenario 2 Efecto variación en la evapotranspiración de referencia ETo:.....	83
7.2.3 Escenario 3 Efecto de la variación en la precipitación.	85
7.2.4 Resumen Escenarios contraste Década 70 y periodo actual.	85
CAPÍTULO 8.....	87
ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN EL RÍO AMADORIO Y EL CAMBIO EN LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO.....	87
EVOLUCIÓN HISTÓRICA RÍO AMADORIO.....	88
8.1 Reconstrucción de la información meteorológica.....	89
8.1.1 Precipitación histórica.	89
8.1.2 Temperatura y Evapotranspiración histórica.	95
8.2 Análisis de las masas subterráneas.....	97
8.3 Modelización de las recargas a los acuíferos con TETIS.....	100
8.4 Modelo de Tanque unicelular con dos coeficientes de descarga Alfa (α_1 y α_2) por el método de Diferencias Finitas de Euler.	102
8.5 Planteamiento de escenarios para el Largo Plazo.	106
8.5.1 Escenario 1 Efecto de la variación en la cubierta vegetal y usos del suelo.....	107
8.5.2 Escenario 2 Efecto del aumento de la evapotranspiración de referencia ETo.	107
8.5.3 Escenario 3 Efecto de la variación en la precipitación.	108
8.5.4 Escenario 4 Efecto de los bombeos a los acuíferos Local22 y Sella.	109
8.5.5 Resumen Escenarios contraste periodo 1940/81 – 1981/2016.....	110
CAPÍTULO 9.....	111
MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE RÍOS TEMPORALES.....	111
RIOS TEMPORALES:.....	112
Régimen hídrico y caracterización ecológica.	112
9.1 Patrones de flujo en ríos temporales: un enfoque metodológico aplicado al sur de Iberia (J. Delso, 2017).....	114
9.2 Project LIFE+TRivers: TREHS a tool to assess Temporary Rivers` Ecological and Hydrological Status (F.E.M., 2015).....	115
CAPÍTULO 10.....	118
APLICACIÓN AL MODELO TREHS.	118



CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA DE LAS MASAS EN LA CUENCA DEL EMBALSE AMADORIO CON TREHS.....	119
10.1 Río Amadorio aguas arriba del embalse.....	119
10.2 Río Sella.....	122
CAPÍTULO 11.....	124
CONCLUSIONES.....	124
CONCLUSIONES	125
CAPÍTULO 12.....	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	128

LISTA DE FIGURAS E ILUSTRACIONES

Figura 1 Esquema conceptual de tanques a nivel de celda TETIS.	12
Figura 2. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (simplificación 2D).	13
Figura 3. Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía (tomado de Montoya 2008).	13
Figura 4 Esquema conceptual de tanques TETIS modificado.	14
Figura 5 Descripción Geográfica C.H. Amadorio.	18
Figura 6 Distribución Mensual de la precipitación en la C.H. Amadorio.	19
Figura 7 Serie de Precipitaciones anuales en la C.H. Amadorio (mm/año) Periodo 2000/01 – 2016/17.	19
Figura 8 Temperatura Media, Max y Min (°C) Fuente SPAIN02V2.	20
Figura 9 Histograma y curva hipsométrica Amadorio.	20
Figura 10 Litología IGME Amadorio.	21
Figura 11 Permeabilidad Cualitativa IGME.	21
Figura 12. Mapa de Isopiezas y Líneas de Flujo Amadorio.	22
Figura 13. Mapa de Acuíferos en la DHJ.	22
Figura 14 Usos del Suelo Amadorio CORINE 2006 y Alteración Espacio Natural.	23
Figura 15. Demanda Neta y Bruta, Eficiencia de la red y origen de los recursos para uso agrícola UDA Pequeños regadíos de la Marina Baja.	24
Figura 16. Mapa de UDAs en la cuenca del Amadorio.	24
Figura 17 Esquema conceptual del sistema de explotación de la Marina Baja.	27
Figura 18. Esquema de aportaciones al E. Amadorio y Usos Agrícolas y Urbanos aguas abajo del embalse.	28
Figura 19 Embalse del Amadorio Sep./2015 – Fuente: Tomas Talavera Fotografía.	29
Figura 20 Fuente Fotoneutron. Cuerpo de presa Relleu (a) Desbordamiento por coronación Ene 2017 (b) Embalse vacío Oct 2017.	30
Figura 21 Curva Batimétrica Embalse Relleu.	30
Figura 22. Pluviómetros Amadorio registrados por la AEMET.	32
Figura 23. Precipitación (mm/año) Pluviómetros Amadorio.	33
Figura 24 Representación Precipitación media anual vs altitud del pluviómetro.	33
Figura 25 Malla Spain02 v.02 en el ámbito de la CHJ.	34
Figura 26 Distribución de la Precipitación (a) y Temperatura Máxima (b) Amadorio- Malla Spain02v.02.	35
Figura 27 Distribución Mensual de la Evapotranspiración de Referencia en la C.H. Amadorio.	37
Figura 28 Estaciones de Aforo y Embalses Amadorio y Relleu.	38
Figura 29 Serie Histórica Diaria Estación de Aforo Río Amadorio.	39
Figura 30 Serie Histórica Diaria Estación de Aforo Sella.	39
Figura 31 Serie Histórica Diaria Punto de Observación de caudales E. Amadorio.	39
Figura 32 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Río Amadorio, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio.	40
Figura 33 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Sella, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Sella.	40

Figura 34 Curva de Permanencia Q E. Amadorio, (b) Caudales Mínimos Observados Embalse Amadorio.	41
Figura 35. Curva Volumen Embalsado vs Superficie lámina de agua.	42
Figura 36. Aportaciones anuales en régimen natural al E. Amadorio 1958/59 – 2015/16.	44
Figura 37. Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio – Análisis desaparición de flujo base.	45
Figura 38. Modelo de Elevación Digital Cuenca Hidrográfica Amadorio	48
Figura 39 Mapa de Pendientes Amadorio.	49
Figura 40 (a) Mapa de Direcciones de Drenaje Amadorio (b) Direcciones de Flujo ArcGIS.	49
Figura 41 Celdas Drenantes Acumuladas Amadorio.	50
Figura 42 Mapa de Velocidad de Ladera Amadorio	51
Figura 43 Mapa Actual Códigos Usos del Suelo Amadorio.	51
Figura 44 Visor Fototeca ICV – Villajoyosa, Vuelo Americano 1956-1957.	52
Figura 45 Contraste en municipio de Relleu (a) Zonas norte y sur bosque de coníferas (b) Terrenos agrícolas con vegetación.	52
Figura 46 Comparación Usos del Suelo (a) Amadorio Década 60s vs (b) Periodo Actual.	53
Figura 47 Variación porcentual de la cobertura del suelo en la Cuenca del Amadorio.	53
Figura 48 (a) Curva del coeficiente de cultivo (b) Rangos típicos esperados del valor de Kc para las cuatro etapas del crecimiento.	56
Figura 49. Curvas de Factor de Cultivo FAO Kc considerados para la determinación de la categoría Mosaico de Cultivos.	57
Figura 50 Mapa Profundidad de Raíces Cuenca Amadorio	58
Figura 51 Mapa Almacenamiento Superficial por charcos Cuenca Amadorio	59
Figura 52. Profundidad de Obstáculos ROO Cuenca Amadorio	60
Figura 53 (a) Almacenamiento por Pendiente Amadorio y (b) Mapa Final de Almacenamiento Estático Hu Amadorio.	61
Figura 54. Mapa de capacidad de infiltración Ks y conductividad hidráulica del interflujo Kss en mm/hr.	62
Figura 55. Mapa de capacidad de percolación Kp, conductividad hidráulica del acuífero Ksa y capacidad de pérdidas al acuífero profundo Kpa en mm/hr.	63
Figura 56. Periodo de Calibración 01/01/2006-31/12/2008.	66
Figura 57. Periodo de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.	66
Figura 58. Periodo de Validación espacio-temporal 01/07/1970-30/06/1974.	66
Figura 59. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio - Evento de Calibración 01/01/2006-31/12/2008.	68
Figura 60. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio - Evento de Calibración 01/01/2006-31/12/2008 – Caudales inferiores a 0.5 m³/s.	68
Figura 61. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio - Evento de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.	69
Figura 62. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio-Evento de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016 – Caudales inferiores a 0.5 m³/s.	70
Figura 63. Curva de Permanencia de Caudal - Periodo de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.	71
Figura 64 Balance hídrico cuenca Amadorio Periodo de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.	71

Figura 65. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio – Validación Temporal 01/07/1970-30/06/1974.....	72
Figura 66. Hidrograma E.A. 8024 Sella – Validación Espacial y Temporal 01/07/1970-30/06/1974.	72
Figura 67. Hidrograma E.A. 8078 Río Amadorio – Validación Espacial y Temporal 01/07/1970-30/06/1974.....	73
Figura 68 (a) Curva de Permanencia P.O. E. Amadorio, (b) Caudales Mínimos Observados P.O. E. Amadorio.....	74
Figura 69 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Sella, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Sella.....	74
Figura 70 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Río Amadorio 8078, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio 8078.	75
Figura 71 Aportaciones anuales E. Amadorio Observado vs Simulado – Comparación medias 1970/80, 1980/2000 y 2000/16.	75
Figura 72. Precipitación media areal TETIS a escala anual – Periodo 1970-2016 - Tendencia, años secos y húmedos.	77
Figura 73 . Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media – Periodo 1970-2016.....	79
Figura 74 Comparación ETo media mensual para los periodos 1970/79 vs 2000/16.	80
Figura 75 Serie 1951 – 2016 Evapotranspiración media areal cuenca del embalse Amadorio.....	80
Figura 76 Contraste Caudales Simulados Usos 57 y Usos Actuales – Periodo de Validación 01/04/2000 – 31/12/2016.....	82
Figura 77 Contraste Caudales Simulados ETo (+10.33%)– Periodo de Validación 01/04/2000 – 31/12/2016.....	83
Figura 78 Contraste Escenario Precipitación +15%– Periodo de Validación 01/04/2000 – 31/12/2016.	85
Figura 79 Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio – Análisis desaparición de flujo base....	88
Figura 80 Traslado de pluviómetros Alicante a Amadorio.....	89
Figura 81 Precipitación media anual Alicante – Periodo 1921-2016 – Tendencia, años secos y húmedos.	91
Figura 82 Histograma de precipitación media areal histórica de Alicante – Periodo 1921-2016.....	92
Figura 83. Precipitación media areal TETIS a escala anual – Periodo 1921-2016 – Tendencia, años secos y húmedos.	93
Figura 84. Histograma de precipitación media areal histórica con TETIS de la cuenca del Amadorio – Periodo 1921-2016.....	94
Figura 85 Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media – Periodo 1950-2016.....	95
Figura 86 Serie 1951 – 2016 Evapotranspiración media areal cuenca del embalse Amadorio.....	96
Figura 87 Test de tendencia de Mann-Kendall ETo 1951-2016.....	96
Figura 88 Serie 1951 – 2016 Comparación de medias 1951/81 – 1981/2016.	97
Figura 89 Acuíferos en TETIS cuenca hidrográfica del Amadorio.....	98
Figura 90 Perfil del nivel freático y nivel del terreno para el cauce del río Amadorio desde su nacimiento hasta el embalse Amadorio.....	99
Figura 91.....	100
Figura 92 Piezómetro 08.48.018 El Vicar Galiana. (a) registros (b) ubicación en la cuenca.....	100
Figura 93. Recarga media anual en Hm ³ /año Acuífero Local No 22.	101
Figura 94. Esquema del modelo de tanque unicelular con dos descargas α_1 y α_2 , inputs y variables del modelo.	102



Figura 95 Comparación Q Observado - Q simulado con Flujo Base y Q simulado sin Flujo Base - Periodo 1921 – 1930.....	103
Figura 96 Niveles piezométricos Acuífero Local 22 Periodo 1921 – 1930.....	104
Figura 97 Contraste Niveles piezométricos Acuífero Local 22 y Piezómetro Vicar Galiana.....	104
Figura 98 Comparación Q Observado - Q simulado con Flujo Base – E.A. Río Amadorio - Periodo 1921 – 2016.....	105
Figura 99 Comparación Q Observado - Q simulado con Flujo Base – P.O. Embalse Amadorio - Periodo 1958-2016.....	106
Figura 100 Contraste caudales escenario base y escenario usos del suelo 2006.....	107
Figura 101 Contraste caudales escenario base y escenario ETo +2%.....	108
Figura 102 Contraste caudales escenario base y escenario Precipitación -12%.....	108
Figura 103 Contraste caudales escenario base y escenario con Bombeos a los acuíferos Local22 y Sella.....	109
Figura 104. Grafica de Frecuencia de los Estados Acuáticos – Celone at San Vicenzo.....	116
Figura 105. Esquema FDP Clasificación de los hidrotipos.....	117
Figura 106 Permanencia de caudal en el río Amadorio en el periodo 2000-2016.....	119
Figura 107 Grafica de Frecuencia de los estados acuáticos Río Amadorio (ASFG) Periodo 2000-2016.....	119
Figura 108 Permanencia de flujo TREHS Río Amadorio Periodo 2000-2016.....	120
Figura 109 Visita técnica 27/02/2018 Río Amadorio antes de la entrada al embalse.....	120
Figura 110 Grafica de Frecuencia de los estados acuáticos Río Amadorio (ASFG) Periodo 1921-1980.....	121
Figura 111 Permanencia de flujo TREHS Río Amadorio Periodo 1921-1980.....	121
Figura 112 Permanencia de caudal en el río Sella en el periodo 2000-2016.....	122
Figura 113 Grafica de Frecuencia de los estados acuáticos Río Sella (ASFG).....	122
Figura 114 Permanencia de flujo TREHS Río Sella Periodo 2000-2016.....	123
Figura 115 Visita técnica 27/02/2018 Río Sella antes de la entrada al embalse.....	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores correctores en TETIS.	15
Tabla 2. Índices de eficiencia en calibración automática.	15
Tabla 3 Clasificación Usos del Suelo Amadorio.....	22
Tabla 4 Cultivos con regadío cuenca río Amadorio aguas arriba del embalse (Superficie y demanda). 25	
Tabla 5. Cultivos con regadío Cuenca Río Sella aguas arriba del embalse Amadorio (Superficie y demanda).....	26
Tabla 6 Demanda Urbana por municipio cuenca embalse Amadorio.	26
Tabla 7. Información de los pluviómetros Amadorio.	32
Tabla 8 Radiación Solar Extraterrestre Allen et. al (1998)	36
Tabla 9 Constantes Obtenidas para el cálculo de la ETo por Hargraves-Samani (1982)	36
Tabla 10 Estaciones de Aforo y puntos de observación cuenca Amadorio.....	37
Tabla 11. Valores medios de evaporación en el embalse.	43
Tabla 12. Nomenclatura periodos de caudal base E.A. Río Amadorio.	45
Tabla 13 Resumen Mapas de Variables TETIS v8 y Base de Datos de Origen.....	47
Tabla 14. Tabla del fichero FactorETMES (Codigos Usos del Suelo, Valores 12 Meses de Factor de Vegetación FAO56 e Intercepción)	55
Tabla 15 Duración Etapas de crecimiento Cultivos y Valores de Kc inicial, medio y final.....	57
Tabla 16. Promedio por categoría del CORINE a partir de los Kc de distintos cultivos.	57
Tabla 17. Valores de referencia Alm. Superficial y Profundidad de Raíces.	59
Tabla 18. Valores originales AWCTOP y ROO del ESDAC y Reclasificación según GIMHA.	60
Tabla 19. Categorías y valores de permeabilidad asignados por Ronny Rios 2017.	62
Tabla 20. Periodos de calentamiento para la calibración y validación del modelo.....	65
Tabla 21. Factores Correctores Evento de Calibración Amadorio	67
Tabla 22. Características generales Evento de Calibración Amadorio.	69
Tabla 23 Características generales Evento de Validación Temporal Amadorio.....	70
Tabla 24 Resumen de Índices de Nash por eventos de calibración, Validación Temporal y Validación espacial y temporal Amadorio.....	73
Tabla 25. Test de tendencia de Mann-Kendall Precipitación 1970-2016.	78
Tabla 26 Test de tendencia de Mann-Kendall Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media 1970-2016.	79
Tabla 27 Test de tendencia de Mann-Kendall Evapotranspiración 1951-2016.	81
Tabla 28 Variaciones más importantes en el cambio de usos del suelo 1957 vs 2006.....	83
Tabla 29. Variaciones más importantes en los escenarios ETo 70/79 vs ETo Actual.....	84
Tabla 30 Variaciones más importantes en los escenarios ETo 70/89 vs ETo Actual.....	84
Tabla 31 Variaciones más importantes en los escenarios Precipitación Actual + 15% vs Actual neta. .	85
Tabla 32. Balance de influencia de las variables en la reducción de las aportaciones y la percolación. 86	
Tabla 33. Criterios para el traslado de pluviómetros.....	90
Tabla 34 Test de tendencia de Mann-Kendall Precipitación Alicante 1921-2016.....	91
Tabla 35 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney Precipitación Alicante 1921/40-1940/81- 1981/2016	92

Tabla 36. Factores ponderadores de media anual entre los pluviómetros 8025 y 8033-E.....	93
Tabla 37 Test de tendencia de Mann-Kendall Precipitación reconstruida Amadorio 1921-2016.	93
Tabla 38 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney Precipitación Amadorio1921/40-1940/81- 1981/2016	94
Tabla 39 Test de tendencia de Mann-Kendall Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media 1950-2016.	95
Tabla 40 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney ETo Amadorio1951/81- 1981/2016.....	97
Tabla 41 Acuíferos en TETIS cuenca hidrográfica del Amadorio.....	98
Tabla 42 Piezómetros disponibles en los acuíferos subyacentes al río Amadorio.....	98
Tabla 43 Test de tendencia de Mann-Kendall Recarga Acuífero Local 22 1921-2016.	101
Tabla 44 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney Precipitación Alicante 1921/40-1940/81- 1981/2016	101
Tabla 45 Variables calibradas en el modelo de tanque unicelular y estados iniciales.	103
Tabla 46. Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario usos del suelo 2006....	107
Tabla 47 Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario ETo +2%.....	108
Tabla 48 Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario Precipitación -12%.....	108
Tabla 49 Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario con Bombeos a los acuíferos Local22 y Sella.....	109
Tabla 50 Balance de influencia de las variables en la reducción de las aportaciones y el flujo base. .	110

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Determinación de la ETo Hargraves-Samani (1982).....	36
Ecuación 2. Restitución a régimen natural en el P.O. Embalse Amadorio Cod. 8004.	42
Ecuación 3 Velocidad de ladera variable según la pendiente del terreno	50
Ecuación 4. Fórmula para determinar el Mapa de Almacenamiento estático.	58
Ecuación 5. Almacenamiento en pendiente para valores menores a 7.5%.	61
Ecuación 6. Coeficiente de correlación de Pearson.....	90
Ecuación 7. Balance de materia en el acuífero Local 22.	102
Ecuación 8. Balance en el acuífero para cada Δt – Método de Euler.	103
Ecuación 9. Predictibilidad semestral de periodos secos.....	116



CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

"El agua no es un bien comercial como los demás, sino un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal" (DMA, 2000)



INTRODUCCIÓN.

Desde la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua (DMA) 2000/06/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, con fecha del 23 de octubre de 2000, se estableció un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas; en este se especifica que los Estados miembros, entre ellos España; a través de sus confederaciones hidrográficas se comprometen a proteger, mejorar y regenerar todas las masas de agua superficial y subterránea, por lo que respecta a las masas de agua artificiales y muy modificadas; con objeto de alcanzar un buen estado de las aguas a más tardar quince años después de la entrada en vigor de la presente Directiva (DMA, 2000).

Desde entonces, el principal interés de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) desde el punto de vista de la planificación hidrológica, ha sido la elaboración de un Plan Hidrológico de Cuenca que recoja la designación de las masas, inventario de recursos, usos, demandas, zonas especiales protegidas, caudales ecológicos, sistemas de explotación, evaluación de presiones, objetivos medioambientales, recuperación de costes, programa de medidas y participación pública. No obstante, por las características del clima mediterráneo, existen ciertas masas como los ríos temporales y efímeros, en los cuales debido a la ausencia de caudal en ciertos periodos del año no es posible aplicar los parámetros de caracterización biológica, hidromorfológica y físico-química que permiten definir su estado ecológico; tal y como lo establece el artículo 5. de la Instrucción de Planificación Hidrológica del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Adicionalmente, se estima que en la Demarcación Hidrográfica del Júcar cerca del 20% de las masas identificadas responden a una temporalidad donde se evidencian meses con ausencia de caudal; sin embargo, las causas de este comportamiento en el régimen hidrológico no están claras. Dentro de las alternativas a evaluar, la CHJ analiza cambios en las variables climáticas más importantes; en primera medida y como input principal del ciclo hidrológico se busca analizar la variación de la precipitación, que a pesar de contar con registros históricos presenta múltiples periodos con vacíos de datos y en otros casos ausencia de instrumentos de medición en puntos altos donde se estima que su valor aumenta. La otra variable climática de fundamental importancia es la temperatura, ya que esta afecta de manera directa al proceso de evapotranspiración, el cual es el responsable de la mayor cantidad de agua consumida a escala de cuenca.

Por otra parte, desde la CHJ se busca valorar el grado de afectación en la evolución de las demandas y aprovechamientos del recurso; puesto que como se ha evidenciado en otras cuencas, debido a las extracciones de agua de origen subterráneo con fines de abastecimiento urbano o suministro agrícola se



han ocasionado importantes cambios en la relación río-acuífero, se han reducido de manera significativa las aportaciones naturales; además, la implementación de barreras longitudinales y derivaciones afecta de manera directa la disponibilidad de recursos superficiales en los cauces y la calidad de los mismos.

Por último, pero no menos importante, los cambios en los usos del suelo en el periodo histórico incrementan la incertidumbre en la comparación de las variables; ya sean cambios de origen antropogénico como el incremento en la superficie agrícola o ganadera, o cambios de tipo natural como la reforestación. Estas variaciones intervienen notablemente en procesos como la infiltración, intercepción de lluvia y evapotranspiración, por ello deben ser estudiadas con detenimiento.

Por las razones anteriormente enunciadas, resulta clara la necesidad de aplicar modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que permitan integrar todos los cambios en la superficie de la cuenca y evaluar a partir de distintos escenarios su grado de alteración y su régimen natural. Es en este punto donde un modelo hidrológico conceptual de tipo distribuido como TETIS resulta una herramienta importante en el análisis del régimen hidrológico en ríos temporales. Todo lo anterior integrado a una nueva metodología de evaluación de calidad ambiental y ecológica en ausencia de caudal, cuyos parámetros e índices se adapten al régimen hídrico natural de los ríos temporales a partir de aforos, modelos de simulación hidrológica y otras fuentes de información de tipo cualitativa.

MOTIVACIÓN.

El análisis de los ríos temporales en la Demarcación Hidrográfica del Júcar se extiende a todas las provincias que la componen, la necesidad de su evaluación ecológica es fundamental y por ello su caracterización hidrológica se convierte en un asunto primordial; pero ¿Cómo priorizar las masas a analizar y el nivel de detalle de dichos análisis? Para responder a este cuestionamiento se deben valorar distintos factores tales como: Información disponible, cambios en la cuenca y nivel de estrés hídrico de la región.

De hecho, es en este último punto donde el sistema de explotación de la Marina Baja y especialmente la cuenca hidrográfica del embalse Amadorio, resulta un área de estudio de gran interés para la gestión de recursos hídricos, debido al déficit en su balance de oferta y demanda. La Marina Baja está compuesta por una importante infraestructura hidráulica con los embalses de Amadorio, Guadalest y diversos azudes, que le permiten aprovechar gran parte de los recursos superficiales disponibles, también ejecuta múltiples traslados de recursos para satisfacer a los diversos usuarios; además, requiere de aprovechamientos subterráneos en los acuíferos como Beniardá, Serella, Algar, entre otros. Adicionalmente, un gran porcentaje del agua implementada por el sector agrícola proviene de la reutilización desde las depuradoras de Altea y Benidorm; otra fuente de abastecimiento en aumento es la desalinización, aunque su coste y características limitan a los usuarios beneficiados. A pesar de la diversificación en la oferta, en la actualidad se evidencia una fuerte escasez de recursos en la cuenca que hace que los usuarios vean con cierta desconfianza la implantación de caudales mínimos en los cauces. Lo anterior, sumado a largos periodos de sequía, ocasionan una opinión pública desfavorable a la gestión ambiental de los cauces e incluso manifestaciones en medios de comunicación oponiéndose a las medidas; a continuación, se enumeran algunas de ellas:

- Diario EL MUNDO 18/04/2016: **Piden que “cese el desembalse de caudales” del Amadorio y Guadalest:** *“Ambos embalses (Amadorio y Guadalest) están realizando aportes a dos cauces de ríos que <históricamente están secos>”. (Meulen, 2016)*
- Diario Información – Alicante 27/02/2018: **El Amadorio vuelve a verter agua al mar y provoca las quejas de Consorcio y regantes:** *“Saltan las alarmas en el Consorcio de Aguas de la Marina Baixa y en la comunidad de Regantes La Vila al estar vertiéndose todo ese caudal al mar” - “El Embalse del Amadorio, como el de Guadalest, son pantanos que no se alimentan de la cuenca, sino que las aguas que les llegan de forma <artificial>, por lo que <no tiene sentido que abran>*

las compuertas". (Vicente, El Amadorio vuelve a verter agua al mar y provoca las quejas de Consorcio y regantes., 2018)

- Diario Información – Alicante 01/03/2018: **Los hoteleros se suman al consorcio y regantes contra el desembalse del Amadorio en la Vila Joiosa:** “<Ninguna norma jurídica debería contemplar la pérdida innecesaria del agua tan necesaria>”. (Vicente, Los hoteleros se suman al consorcio y regantes contra el desembalse del Amadorio en la Vila Joiosa, 2018)
- Diario Información – Alicante 12/03/2018: **Ecologistas y regantes de Altea y Benidorm, en contra del desembalse del Amadorio:** “Ángel Uribe (Gerente de la comunidad del Bajo Algar): el año pasado impulsamos 7 millones de metros cúbicos de agua al Amadorio que tuvieron un elevado coste de elevación o electricidad, entre otros, para que ahora se vierta todo al mar” / “Grupo Ambientalista Xorigues: se tira el agua al mar, sin pensar que se acerca Semana Santa y verano y la demanda hídrica para abastecimiento de residentes y veraneantes aumenta” (Vicente, Ecologistas y regantes de Altea y Benidorm, en contra del desembalse del Amadorio, 2018).
- Diario Información – Alicante 13/03/2018: **La Confederación del Júcar cede a la presión y deja de desembalsar agua en Amadorio y Guadalest.** (Vicente, La Confederación del Júcar cede a la presión y deja de desembalsar agua en Amadorio y Guadalest, 2018)

Las manifestaciones de inconformidad con las medidas son producto del alto nivel de estrés hídrico que padece la región y de los usos en competencia que el sistema evidencia (Urbano, Hotelería, Agrícola, Recreativo y Ambiental); por ello, examinando el comportamiento hidrológico de la cuenca aguas arriba del embalse del Amadorio, este análisis busca responder a dos interrogantes principales: 1) ¿Que ha causado la reducción de aportaciones al embalse Amadorio observada a partir de los años 80s ? 2) ¿Qué factores han afectado el régimen hídrico natural de los ríos Amadorio y Sella en el periodo histórico y como tales cambios han influido en la conexión río-acuífero de los principales cauces?

OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Analizar el régimen hidrológico natural para la cuenca del río Amadorio y Sella en el E. Amadorio a partir de un modelo hidrológico distribuido, estudiando su temporalidad, las posibles causas de la reducción en las aportaciones de la cuenca y los cambios en la relación río-acuífero.

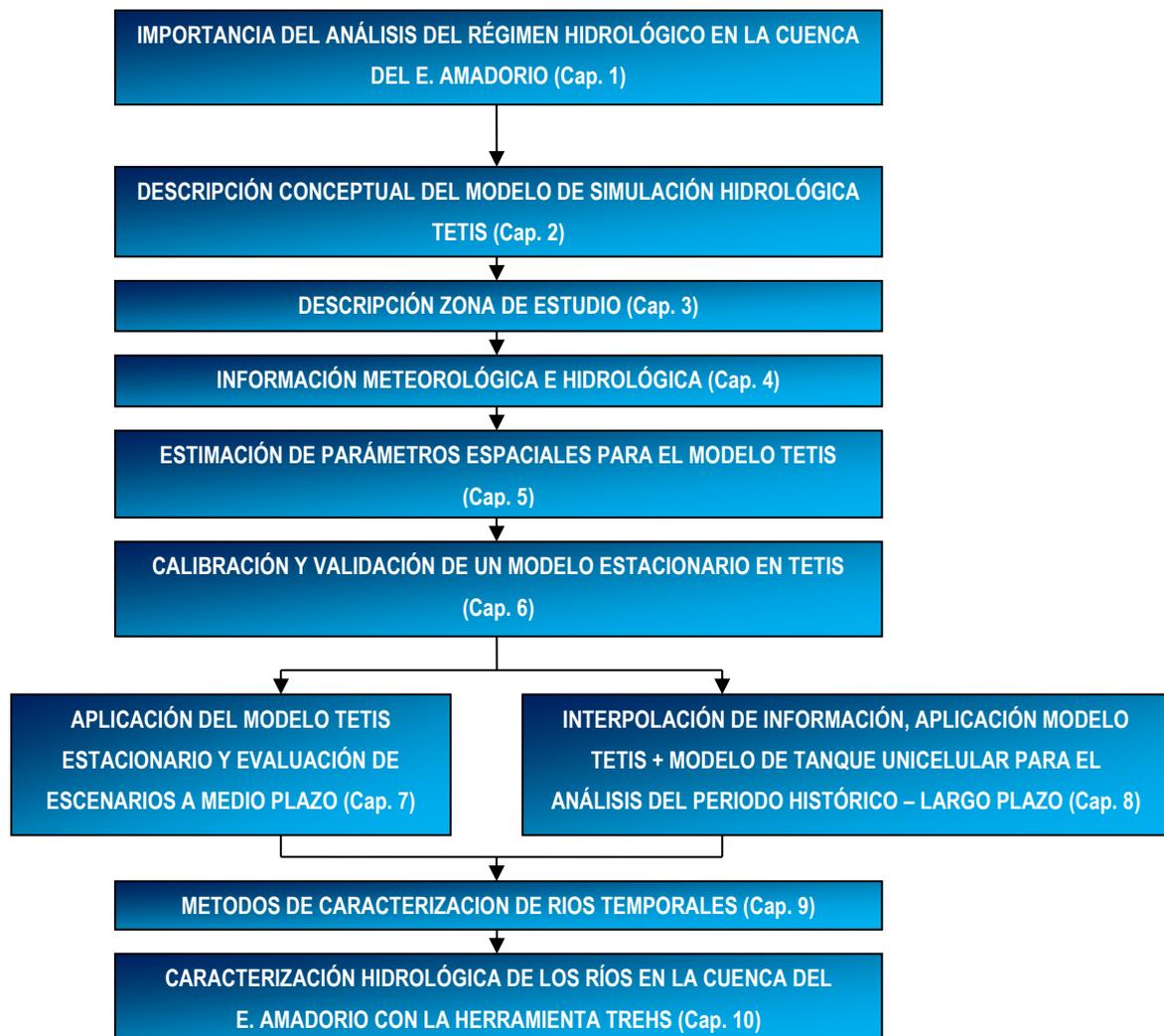
1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos del proyecto se presentan:

- Recopilar información hidrológica distribuida espacialmente para toda la demarcación del Júcar, que aporte a futuras investigaciones.
- Desarrollar un modelo hidrológico distribuido a partir de la herramienta TETIS, calibrado y validado; que permita reproducir el régimen hidrológico actual e histórico en la cuenca del embalse Amadorio.
- Plantear distintos escenarios que permitan evaluar los factores más influyentes en el régimen hidrológico a mediano y largo plazo.
- Reproducir las series temporales de caudales simulados en régimen natural, de manera independiente para las distintas masas dentro de la cuenca del Embalse Amadorio (Río Amadorio y Sella).
- Aplicar para cada masa la metodología diseñada en el proyecto TRivers con la herramienta TREHS, caracterizando hidrológicamente los cauces en estudio para su posterior evaluación ecológica.

METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El proyecto busca abordar el análisis del régimen hidrológico de la cuenca del Embalse Amadorio en dos etapas; la primera a mediano plazo, busca la implementación de un modelo hidrológico de tipo distribuido estacionario que permita reproducir la hidrología de la zona a partir del año 1970, desde el cual se tiene información meteorológica completa y fiable; con el fin de entender la reducción en las aportaciones de la cuenca. La segunda etapa de largo plazo, pretende reproducir el régimen hidrológico de la cuenca del E. Amadorio en el periodo histórico y superar el déficit de información a partir de la interpolación de datos de cuencas cercanas; en este apartado se requiere del acoplamiento del modelo hidrológico estacionario y un modelo de tanque unicelular que permita integrar las extracciones por bombeos como una de las variables que ocasiona la desconexión del río y el acuífero observada en los aforos históricos. El mapa conceptual ilustra la estructura del documento y el procedimiento en el desarrollo del proyecto.



En el capítulo 1 se enuncia la importancia del análisis de los ríos temporales, así como la necesidad de la aplicación de modelos hidrológicos distribuidos en su estudio; en el capítulo 2, se describe el modelo TETIS como herramienta de simulación hidrológica distribuida, todas sus componentes y limitaciones.

En este capítulo 3, se describe detalladamente la zona de estudio y sus aspectos claves: climatología, topografía, hidrogeología, demandas existentes y gestión del sistema; no obstante, para la construcción de un modelo de simulación hidrológica se requiere previamente la recopilación y análisis de la información disponible; en el capítulo 4 se describe la precipitación, evapotranspiración e hidrometría como inputs principales en este proceso, además de analizar en términos cuantitativos las variaciones en la disponibilidad de recursos en el periodo reciente a partir del año 1970.

Adicionalmente, el modelo TETIS requiere información distribuida espacialmente de diversas variables que son claves para la representación conceptual de los distintos fenómenos a escala de cuenca; en el capítulo 5 se explica la generación y tratamiento de toda la información espacial a escala de demarcación, necesaria para el buen funcionamiento del modelo.

Una vez recopilada y generada toda la información necesaria para el modelo, en el capítulo 6 se procede calibrar los factores correctores del mismo, validarlos e implementarlos en distintos periodos de inspección para corroborar su fiabilidad y bondad. No obstante, es hasta la implementación y comparación del modelo, a partir del planteamiento de distintos escenarios en el capítulo 7, que se puede dar respuesta a las posibles causas de algunas de las variaciones observadas en las aportaciones en el embalse de Amadorio.

En el capítulo 8, usando el modelo estacionario de TETIS, calibrado y validado; en combinación con un modelo de tanque unicelular se evalúa la disponibilidad de recursos desde principios del siglo XX y a partir de esta información, se da una hipótesis a las posibles causas de los cambios observados en la conexión río-acuífero a los largo del periodo histórico.

Por otra parte, el capítulo 9 busca dar una visión general de la importancia de los ríos temporales y sus métodos de caracterización en la actualidad, además de resaltar el valor de la implementación de modelos hidrológicos distribuidos que reproduzcan las series de caudales circulantes en los ríos y que generen información input para la aplicación de estas metodologías. De forma complementaria, en el capítulo 10, se aplican los caudales simulados obtenidos con TETIS a la herramienta TREHS para la caracterización ecológica e hidrológica de las masas presentes en la cuenca del Embalse Amadorio.

Por último, en el capítulo 11 se resumen las principales conclusiones del proyecto.



CAPÍTULO 2.

EL MODELO HIDROLÓGICO TETIS

“Un modelo hidrológico distribuido permite obtener mejores resultados en la estimación de la cuenta física del agua al interior de la cuenca, pues por un lado permite considerar la distribución espacial de la lluvia y por otro, considerar aspectos que afectan la distribución espacial de la producción de escorrentía y su propagación” (Vélez, 2004).

MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL Y DISTRIBUIDO TETIS.

TETIS es un modelo de simulación hidrológica, de tipo distribuido en el espacio mediante una subdivisión de la cuenca en celdas regulares, con parámetros físicamente basados. Es un modelo global, es decir, con un mismo modelo se pueden resolver problemas tanto de Crecidas y Erosión (discretización temporal de minutos u horas) como de Recursos Hídricos (discretización temporal diaria) (GIMHA, 2018). Este modelo lluvia-escorrentía ha sido desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia a través del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), y ha sido ampliamente utilizado en España, Colombia, Perú y otros países del mundo como China, Francia o Indonesia (RETEMA, 2018)

Las ventajas que presenta la modelación distribuida con respecto a la tradicional modelación agregada y semidistribuida consisten fundamentalmente en: i) una mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro del Ciclo Hidrológico, a través de sus inputs y parámetros; ii) la obtención de resultados en cualquier punto de la cuenca, sin prefijarlos a priori y sin necesidad de metodologías de interpolación; iii) la explotación de la información espacial cada día más abundante gracias al desarrollo que en los últimos años han tenido la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y las mediciones con sensores remotos (GIMHA, 2018).

2.1 Conceptualización de procesos físicos.

Uno de los factores claves para la correcta aplicación del modelo es establecer la conceptualización de los procesos físicos, de forma sencilla y clara, con el fin de entender correctamente el funcionamiento de los procesos expuestos. De un modo general, en los modelos implementados se consideran los siguientes procesos hidrológicos (Singh, 1989):

- **Intercepción:** Es la porción de la precipitación que es interceptada por objetos superficiales como la cubierta vegetal o los tejados. En general, parte de esta agua interceptada nunca alcanza el suelo porque se adhiere y humedece estos objetos, para posteriormente evaporarse. La intercepción puede despreciarse cuando se estudian los eventos de crecida. Sin embargo, cuando se desea conservar el balance hídrico este proceso puede llegar a ser importante y debe ser tenido en cuenta.

- **Detención:** También denominado almacenamiento en depresión, depende de la forma del terreno y de los usos del suelo, el agua retenida no es capaz de salir como escorrentía superficial, por lo tanto, se debe evaporar o infiltrar en el suelo. El almacenamiento en depresión puede ser significativo y, en esos casos, puede modificar la respuesta de una cuenca.

- **Infiltración:** Es el proceso de entrada de agua al suelo a través de la superficie del suelo. Este fenómeno es el más importante en un evento de crecida, ya que el agua no infiltrada es la escorrentía directa, que habitualmente supone el mayor porcentaje de la escorrentía superficial.
- **Evapotranspiración:** Proceso mediante el cual el agua pasa de un estado líquido o sólido a un estado gaseoso a través de la transferencia de energía calorífica. Para el planeamiento de recursos hídricos este proceso debe ser considerado detalladamente, sin embargo, para el estudio de los eventos de crecida puede despreciarse debido al corto lapso de tiempo en el cual se desarrollan éstos.
- **Fusión de nieve:** Es el proceso por el cual se obtiene la cantidad de agua líquida producida por el derretimiento de la nieve que está acumulada en la superficie.
- **Percolación:** Es el movimiento del agua infiltrada a través del perfil del suelo.
- **Recarga del acuífero:** Proceso mediante el cual el agua ingresa al almacenamiento subterráneo del acuífero. El área de recarga es una zona que permite suministro de agua al acuífero.
- **Escorrentía directa:** Es la porción de lluvia que no es interceptada, detenida, evaporada o percolada y que fluye sobre las laderas. En realidad, la escorrentía directa, la infiltración y la humedad del suelo son interactivas entre sí, por tal motivo se debe tener cuidado en seleccionar el modelo adecuado para cada caso. A efectos del modelo TETIS, se distinguirá como escorrentía directa
- **Interflujo:** También denominado flujo subsuperficial. Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo o acuífero, por lo tanto, debe ser considerada en la escorrentía superficial.
- **Flujo base:** Es la porción de agua derivada del almacenamiento subterráneo o de otras aguas que se han retrasado en el tiempo y finalmente alcanzan el cauce.

La representación de cada uno de estos procesos se puede realizar desde un punto de vista físico, en donde se obtienen ecuaciones diferenciales no lineales cuya solución analítica puede ser muy compleja o simplemente no existir. Sin embargo, mediante la discretización en el tiempo y el espacio, la linealización de las ecuaciones fundamentales con sus respectivas ecuaciones de estado y condiciones de borde, hacen posible encontrar un resultado aceptable, teniendo en cuenta que este tipo de simplificaciones inducen a errores de escala. Una representación conceptual de estos fenómenos es aceptada siempre y cuando se trabaje a la escala adecuada (Grayson & McMahon., 1992).

2.2 Interpolación de Variables espaciales.

La metodología de interpolación del modelo TETIS se centra especialmente en el método de inverso de la distancia al cuadrado (IDW por sus siglas en inglés de Inverse Distance Weighting) con algunas excepciones como es el caso de la altura de agua equivalente en el caso de la existencia de nieve, o la temperatura de punto de fusión. No obstante, las otras variables espaciales principales como son la evapotranspiración de referencia y la precipitación se centran en aplicar el IDW; añadiendo a esta última una importante innovación en el modelo TETIS, como lo es el factor β , un parámetro que incluye de manera lineal la variación de la precipitación con la altitud.

2.3 Producción de escorrentía.

En TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí (más un séptimo de cauces cuando lo haya en la celda), como puede observarse en la Figura 1 (GIMHA, 2018).

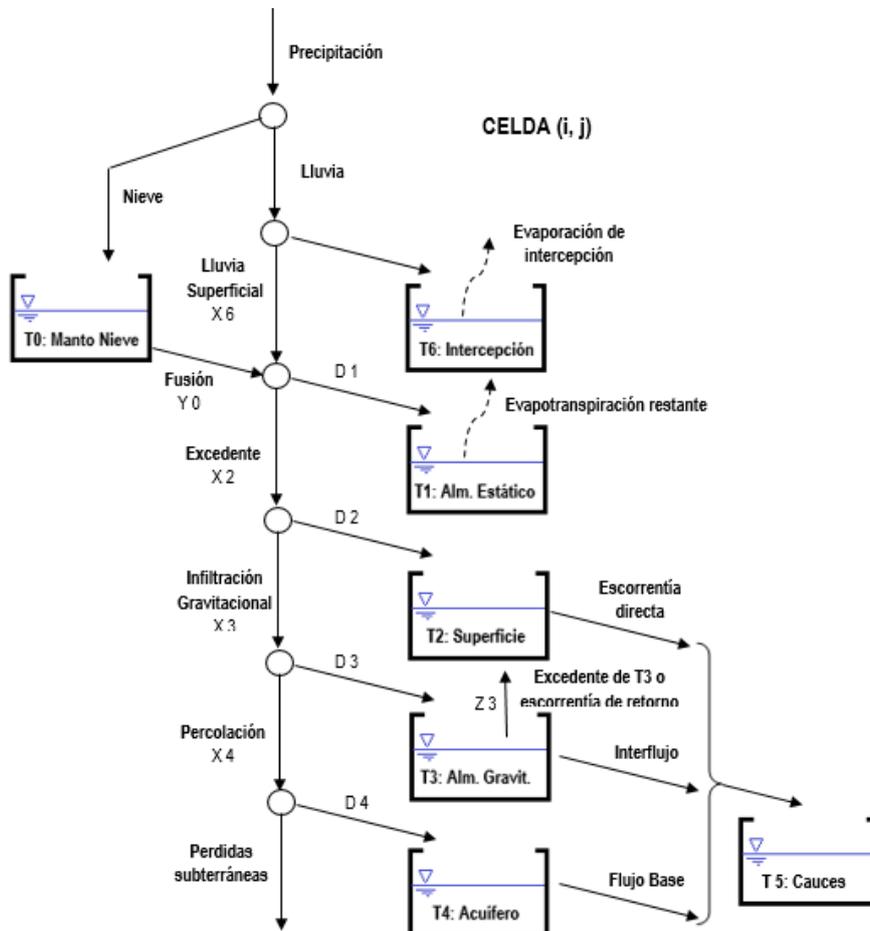


Figura 1 Esquema conceptual de tanques a nivel de celda TETIS.

En realidad, la conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones como se puede observar en la Figura 2. 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.

El sistema presenta tres elementos diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie. En la Figura 3 se observa un esquema de la relación entre las áreas umbrales para las diferentes componentes de la escorrentía y el área de captación.

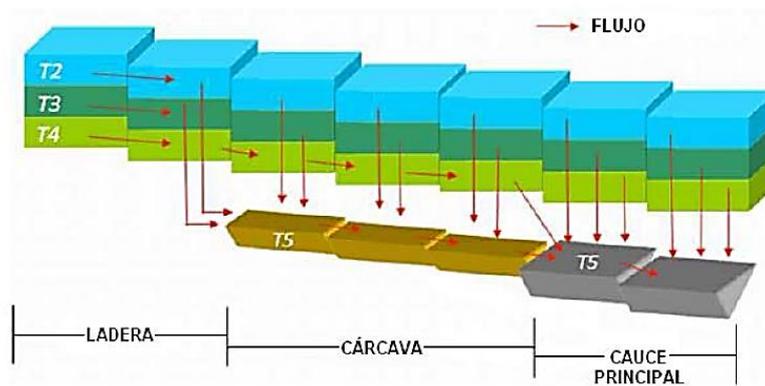


Figura 2. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (simplificación 2D).

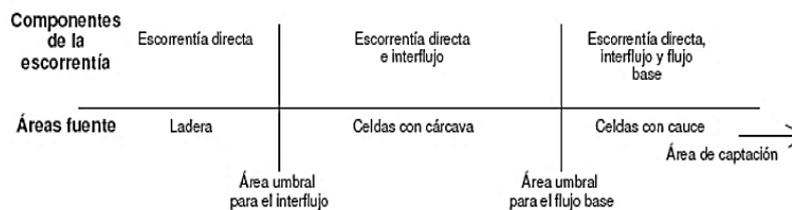


Figura 3. Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía (tomado de Montoya 2008).

El modelo TETIS se destaca frente a otros modelos de simulación debido a que su conceptualización se basa en los procesos físicos que en la cuenca tienen lugar, cada uno de ellos se representa en los tanques y flujos que se observan en la figura del apartado producción de escorrentía; sin embargo, con el objetivo de clarificar los procesos que condicionan el transporte y almacenamiento del agua se presenta a continuación una modificación al esquema inicial en el cual se remarcan de manera general los balances en cada nodo. Como se puede apreciar en la Figura 4, el flujo aguas arriba del nodo se ve condicionado por la capacidad del proceso aguas abajo en color rojo en el caso de la producción; el restante del balance sigue la ruta del flujo color verde. En los casos de propagación del flujo los procesos involucrados se ilustran en color azul; adicionalmente, se mencionan los factores correctores correspondientes y cuya importancia se explicará en el siguiente apartado.

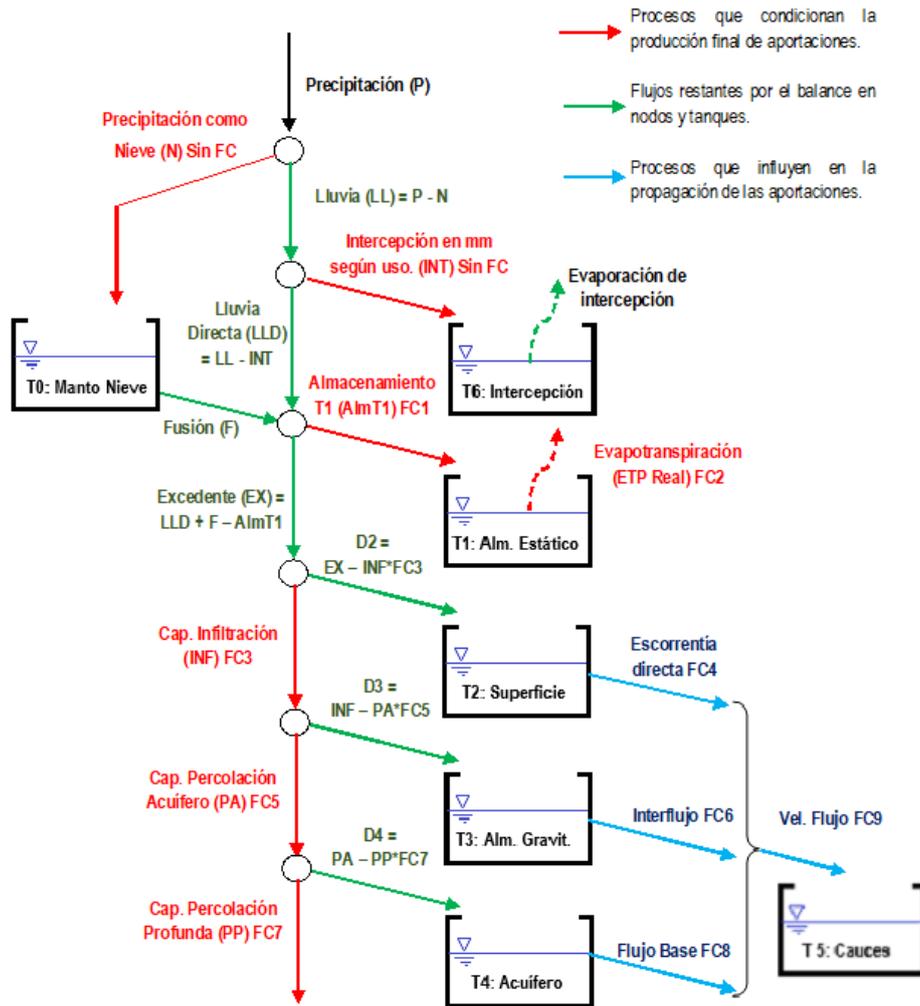


Figura 4 Esquema conceptual de tanques TETIS modificado.

2.4 Factores correctores.

El modelo de producción y el modelo de traslación presentados en TETIS incluyen unos factores correctores que corrigen de forma global los diferentes parámetros, permitiendo una calibración (manual o automática) rápida de los diferentes procesos representados, aprovechando la información utilizada en su estimación previa (GIMHA, 2018).

Estos factores correctores tratan de corregir los errores siguientes:

- De estimación inicial de los parámetros
- En la información hidrometeorológica de entrada al modelo
- En el propio modelo
- Efectos de escala espacio-temporal

Los factores correctores que afectan directamente la producción de escorrentía son:

FC1 : Almacenamiento estático	FC_s : Interflujo
FC2 : Evapotranspiración	FC_r : Pérdidas subterráneas
FC3 : Infiltración	FC_b : Flujo base
FC4 : Escorrentía directa	Para la traslación de la onda cinemática geomorfológica se emplea un factor corrector para la velocidad de la onda, FC_v .
FC5 : Percolación	
Factor de corrección de la lluvia con la altitud β (Opcional).	

Tabla 1. Factores correctores en TETIS.

2.5 Calibración automática.

Los elementos que pueden ser calibrados manual o automáticamente en TETIS son:

- Los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía.
- Los valores iniciales para las variables de estado de almacenamiento.
- Los coeficientes de correlación con la altura para la interpolación espacial.
- Los parámetros agregados del submodelo de nieve

El modelo TETIS ha seleccionado al método del SCE-UA para realizar la calibración automática. Este método fue desarrollado en la Universidad de Arizona, el cual se caracteriza por su robustez y eficiencia para la calibración de modelos lluvia-escorrentía, (Eckhardt, 2001). Una descripción general del método se observa en Duan et al. (Duan, 1994).

La calibración automática se basa en la generación de distintas combinaciones de parámetros y factores correctores; los resultados de estas simulaciones son comparados con los datos observados, que en la mayoría de casos se refieren a los caudales medidos en una estación de aforo. La elección de la mejor alternativa está condicionada por el mejor índice de eficiencia; a continuación, en la Tabla 2 se presentan los más importantes:

<p>Error en el volumen.</p> $\%errVol = \frac{V_o - \hat{V}_p}{V_o} \times 100\%$ <p>Vo: Volumen total observado.</p> <p>Vp: Volumen total simulado.</p>	<p>El coeficiente de eficiencia, NSE.</p> $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$ <p>Ôi: Caudal simulado.</p> <p>Qi: Caudal observado.</p> <p>Ôi: Valor medio caudales observados.</p>	<p>Error cuadrático medio, RMSE.</p> $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Q_i - \hat{Q}_i)^2)}{n}}$ <p>Ôi: Caudal simulado.</p> <p>Qi: Caudal observado.</p> <p>n: número de observaciones.</p>
---	---	--

Tabla 2. Índices de eficiencia en calibración automática.

2.6 Limitaciones del modelo.

El modelo TETIS como se ha mencionado anteriormente, es un modelo hidrológico que permite analizar situaciones en el ámbito de crecidas, así como la gestión de recursos en periodo continuo a escala de cuenca. No obstante, en la cuantificación y transporte de recursos subterráneos, no implementa gradientes piezométricos, ni las ecuaciones del flujo subterráneo, como lo hacen otros modelos especializados en el tema como MODFLOW; en su lugar supone, un flujo de los recursos por gradiente topográfico generalizado a escala de cuenca, que además de reducir la estimación de parámetros del modelo, acelera el tiempo de cálculo del mismo y simplifica las condiciones de contorno.

Lo anterior es aplicable a cuencas con una hidrogeología concreta y cuyos flujos subterráneos no hayan sido fuertemente alterados por extracciones a lo largo de su historia; aquellos casos en donde se requiera analizar la influencia de dichos bombeos necesitaran el acoplamiento de otro modelo que permita evaluar los niveles piezométricos del acuífero, así como la relación río-acuífero donde se estime aportaciones o pérdidas por la variación de los niveles en las masas subterráneas.



CAPÍTULO 3.

CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMADORIO

"El agua es fundamental para el desarrollo de nuestro territorio, tanto para la agricultura, como para la industria y el turismo" Cesar Sánchez – Presidente de la diputación de Alicante (2017).

ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Descripción Geográfica

La Cuenca Hidrográfica del Amadorio se encuentra ubicada al sur de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, en la provincia de Alicante; cuenta con una superficie total de 217.75 Km² y hace parte del sistema de explotación de la Marina Baja. Está compuesta por tres subcuencas, dos correspondientes al río Amadorio y otra que pertenece a su afluente del río Sella; se encuentra principalmente entre los municipios de Relleu y Sella en la zona de cabecera, Orxeta en la zona media y Villajoyosa como área baja costera (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2017).

En cuanto a sus masas de agua superficiales, el Sella identificado con código de la CHJ No. 29.02.01 tiene una longitud de 6,5 Km aproximadamente, según los indicadores físicos hidrológicos y biológicos su estado se clasifica como "Muy Bueno" con un estado natural; por otra parte, el río Amadorio en sus tramos 29.03 y 29.04 aguas abajo del Embalse de Amadorio presenta incidencias que lo clasifican como "Peor que Bueno" y con un grado de alteración debido a los vertidos de la población de Villajoyosa y la gestión del embalse Amadorio (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2017). En cuanto al tramo del Amadorio 29.01 en cabecera se encuentra catalogada como una SAM (Sin Agua en los Muestreos) y por ello no se cuentan con indicadores que permitan una adecuada caracterización.

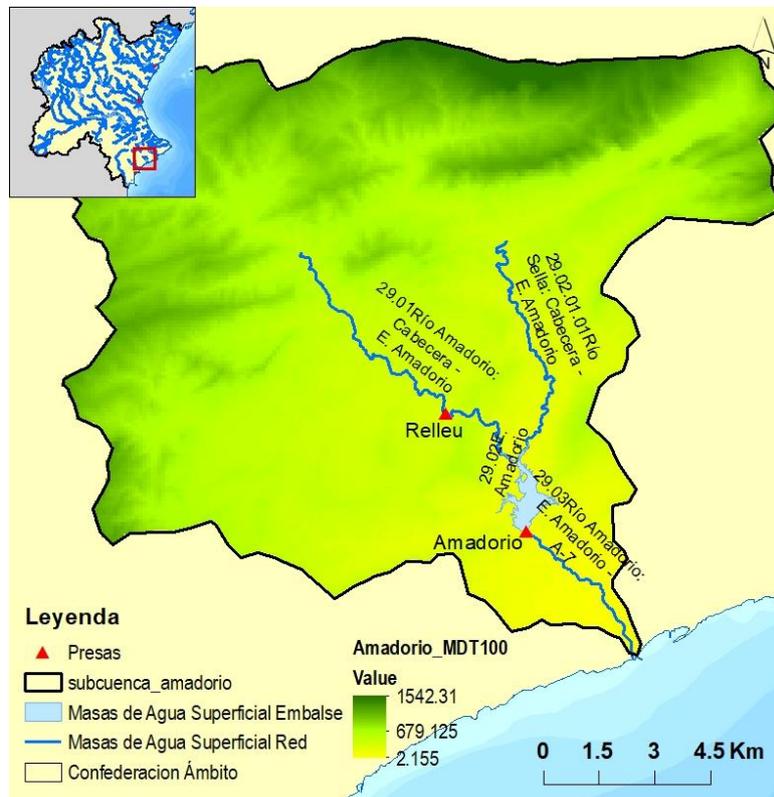


Figura 5 Descripción Geográfica C.H. Amadorio.

3.2 Climatología

Para caracterizar la climatología de la zona y en congruencia con la información input que en el modelo se empleará, se analizó la información meteorológica disponible de los pluviómetros con código 8032E (Penaguila la roqueta), 8033E (Embalse de Amadorio) y 8034 (Sella) de la AEMET; debido a la variación de periodos analizados se promediaron los valores mensuales del periodo Oct/2000 a Sept/2017 de las tres estaciones pluviométricas y en ellas se encontró un comportamiento del área de estudio típico del clima mediterráneo, con veranos calurosos y con poca precipitación, donde los mayores periodos de lluvias se concentra principalmente en otoño y en menor medida en primavera. Para la Cuenca Hidrográfica del Amadorio los meses que presentan una precipitación más baja son los de junio, julio y agosto mientras que en octubre y noviembre se presentan los periodos más húmedos.

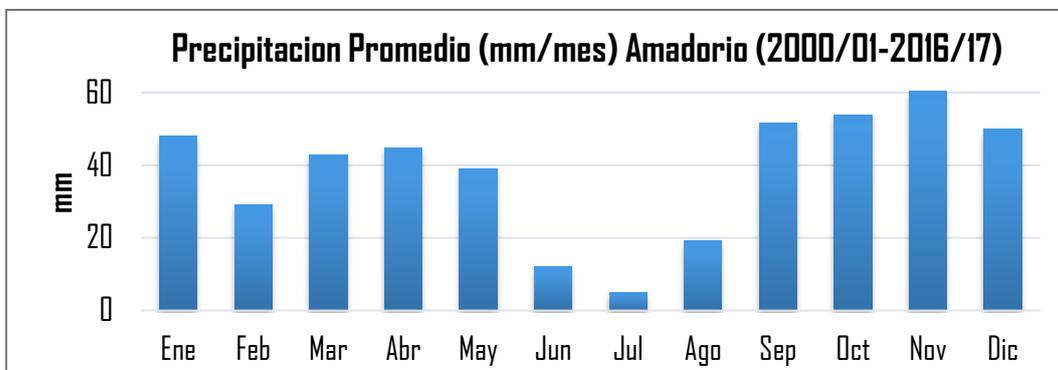


Figura 6 Distribución Mensual de la precipitación en la C.H. Amadorio.

En cuanto a la precipitación anual se tiene un promedio de 456 mm/año para el periodo 2000/01 – 2016/17; sin embargo, la influencia de la altitud con la precipitación se hace evidente al evaluar la variación de la media entre los tres pluviómetros analizados como se observa en la gráfica;

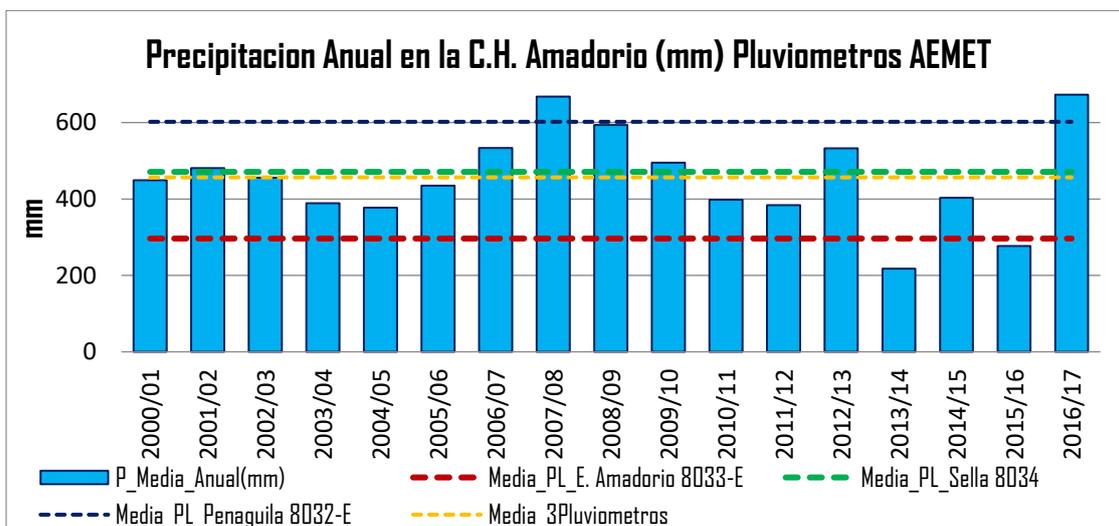


Figura 7 Serie de Precipitaciones anuales en la C.H. Amadorio (mm/año) Periodo 2000/01 – 2016/17.

En la Figura 8, para la temperatura se evidencian valores cercanos a los 25°C para los meses de verano y 10°C para los meses de invierno; también se presenta el rango de la medio de las temperaturas mínimas y máximas que oscila en torno a los 9-10°C en la mayor parte del año.

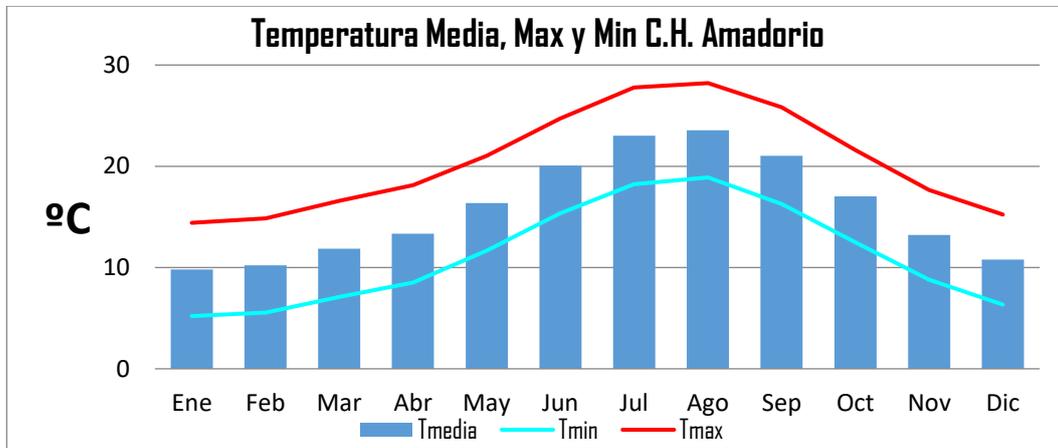


Figura 8 Temperatura Media, Max y Min (°C) Fuente SPAIN02V2

3.3 Topografía

A partir del Modelo de Elevación Digital (MED) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con resolución 25x25 metros se obtuvo una representación de la zona de estudio; en este se observó un cambio de altitud desde 2.16 m.s.n.m en la desembocadura al mar, hasta 1542.31 m.s.n.m en la sierra Aitana en la zona de cabecera. Con el objetivo de caracterizar mejor la cuenca, en la Figura 9 se muestra el histograma de altitud donde se ve mayor concentración en las altitudes 300-500 y 700-900 m.s.n.m. acumulando entre estos 4 intervalos el 48% total de los 16 intervalos de altitudes. Por su parte, la curva hipsométrica nos muestra un comportamiento característico de una cuenca en fase de madurez y por ende un aparente equilibrio en cuanto a los procesos de sedimentación y erosión.

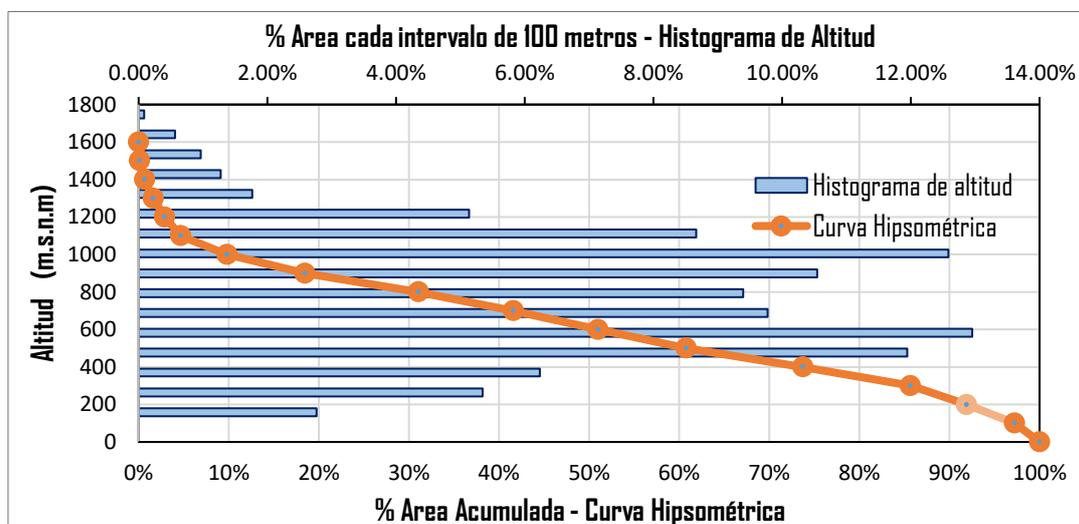


Figura 9 Histograma y curva hipsométrica Amadorio.

3.4 Marco Geológico e Hidrogeológico.

Para el análisis de la Litología e hidrogeología de la zona se ha implementado el mapa de permeabilidades cualitativas del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) del año 2009 a escala 1:200.000; este mapa contribuyó a la delimitación de las masas de agua subterráneas (m.a.s.) del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (PHJ 2015-2021); en el mapa se asigna a la permeabilidad un rango de 5 valores posibles (muy alta-**MA**, alta-**A**, media-**M**, baja-**B** y muy baja-**MB**) y de distintas litologías asociadas en 7 grandes grupos (carbonatadas-**C**, detríticas del cuaternario-**Q**, detríticas-**D**, volcánicas-**V**, metadetríticas-**M**, ígneas-**I** y evaporíticas-**E**). En la Figura 10 en el mapa litológico del Amadorio se puede observar la presencia de formaciones detríticas y carbonatadas en su mayoría.

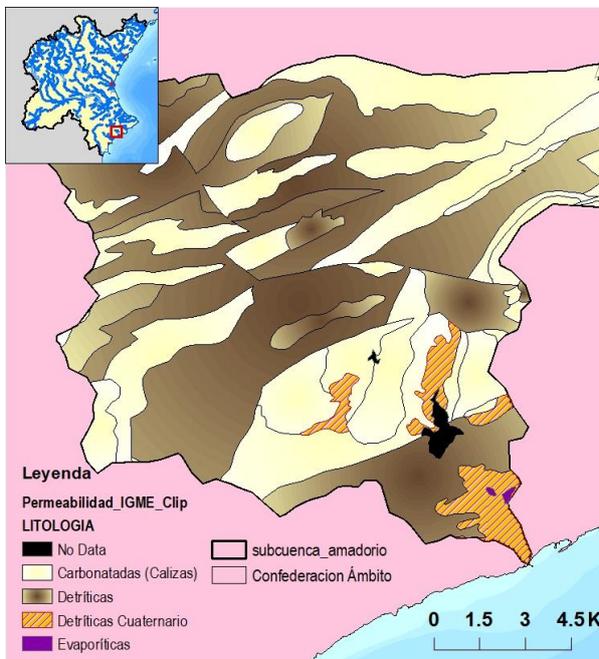


Figura 10 Litología IGME Amadorio

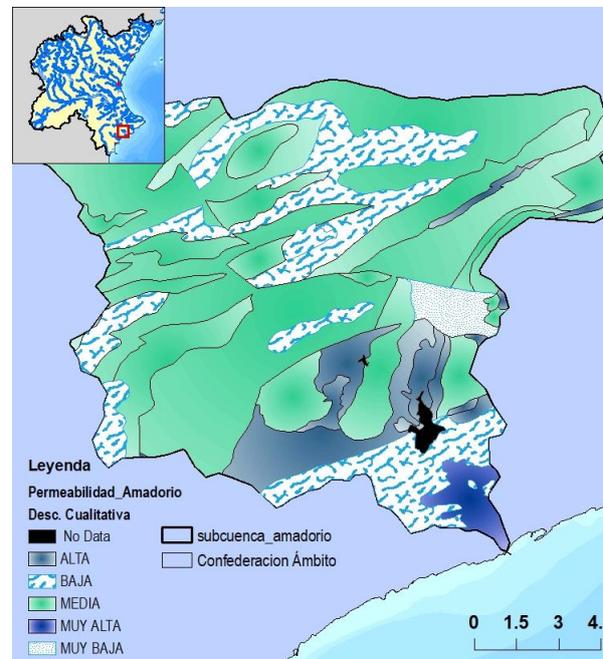


Figura 11 Permeabilidad Cualitativa IGME

Adicionalmente, para comprender mejor la componente subterránea del área de estudio, se combinó el MED y el mapa piezométrico realizado por el IGME que contiene las isopiezas y las direcciones de flujo subterráneo. En este se evidencia un comportamiento de la cuenca hidrológica similar a la cuenca hidrográfica; lo que sugiere menor influencia de las cuencas colindantes y para efectos de este estudio se supone que no hay transferencias con los acuíferos subyacentes. Por otra parte, en la Figura 13 se muestran los acuíferos delimitados en el PHJ 2015-2021 para el área de estudio.

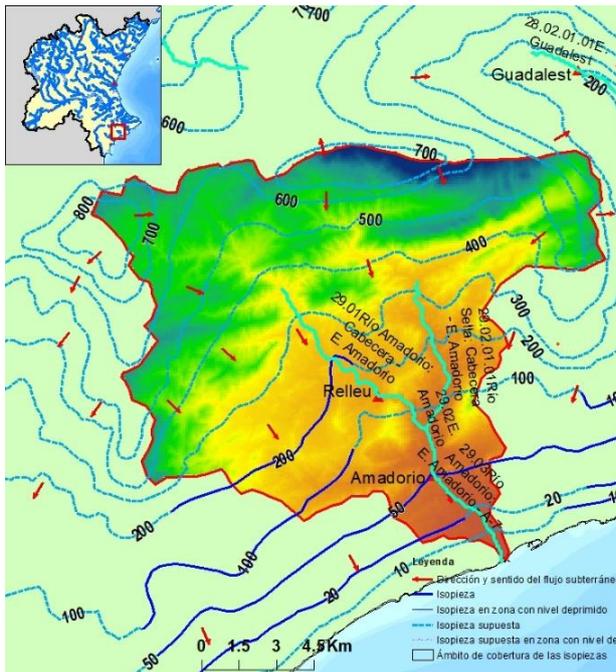


Figura 12. Mapa de Isopiezas y Líneas de Flujo Amadorio



Figura 13. Mapa de Acuíferos en la DHJ.

3.5 Usos del Suelo

En lo que respecta a la identificación de la cubierta del suelo se ha implementado la base de datos georeferenciada CORINE LAND COVER 2006, desarrollada por la European Commission que a partir de imágenes satelitales y registros cartográficos permite conocer de acuerdo al nivel de detalle los distintos usos: **Nivel 1** – 5 Categorías, **Nivel 2** – 15 Categorías y **Nivel 3** – 44 Categorías. En la cuenca Amadorio en particular para el nivel 3 se observa un porcentaje de Bosque de coníferas promedio de la región (14%); también se observa una mayor proporción de terreno natural (59%) respecto a los terrenos agrícolas (41%), que principalmente se componen de olivares, almendros y cítricos.

CLASIFICACIÓN CORINE 2006 AMADORIO - ÁREA Km ²			
Bosque de coníferas	29.6	Pastizales naturales	16.85
Espacios con veget. Escasa.	2.2	Roquedo	0.8
Frutales	44.1	Tejido urbano continuo	0.57
Láminas de agua	0.54	Tierras en labor en secano	0.84
Mares y océanos	0	Vegetación esclerófila	39.87
Matorral Boscoso	38.9	Terrenos principalmente. Agrícolas con espacios naturales	11.4
Mosaico de cultivos	32		
Total Cuenca Amadorio			217.8

Tabla 3 Clasificación Usos del Suelo Amadorio

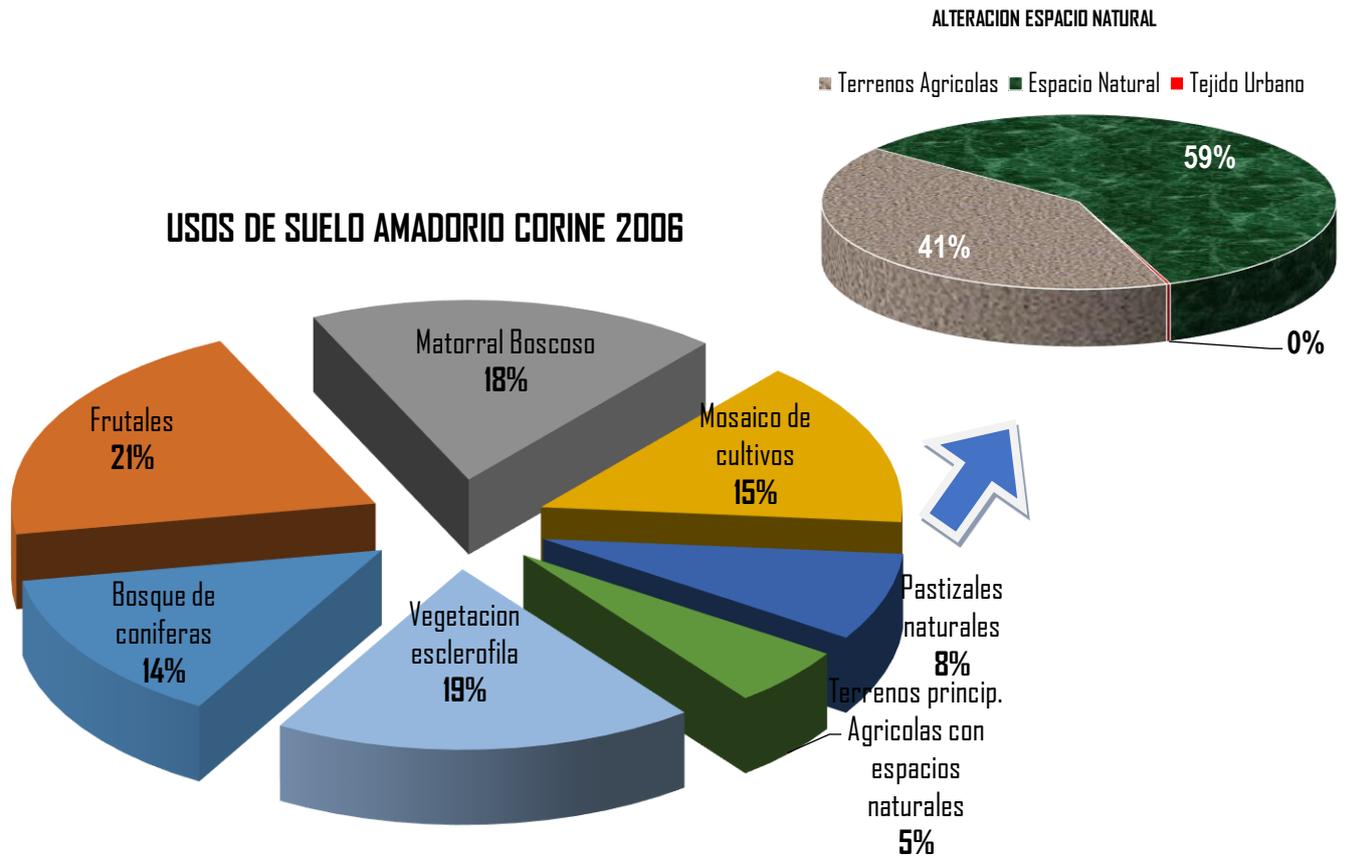


Figura 14 Usos del Suelo Amadorio CORINE 2006 y Alteración Espacio Natural

3.6 Demanda agrícola y Comunidades de Regantes.

La demanda agrícola en la cuenca del Amadorio se concentra principalmente en dos UDA (Unidades de Demanda Agrícola), la denominada "Riegos del Amadorio" ubicada en el municipio de Villajoyosa, se ha abastecido históricamente del embalse del Amadorio, pero en la actualidad implementa en gran proporción las aguas reutilizadas producto de las depuradoras de aguas residuales. Por otra parte, la UDA ubicada aguas arriba del embalse, conocida como "Pequeños regadíos de la Marina Baja" con código 82066A está constituida principalmente por cuatro comunidades de Regantes: Hoyas del Rio, Riego Mayor de la Huerta de Orxeta, Riego Mayor de Relleu y La Font de Benialet.

Según el PHJ2015-2021 la UDA 82066A tiene un abastecimiento mixto predominando el origen subterráneo con un 77%, seguido del origen superficial con un 19% y una reutilización de solo el 4%.

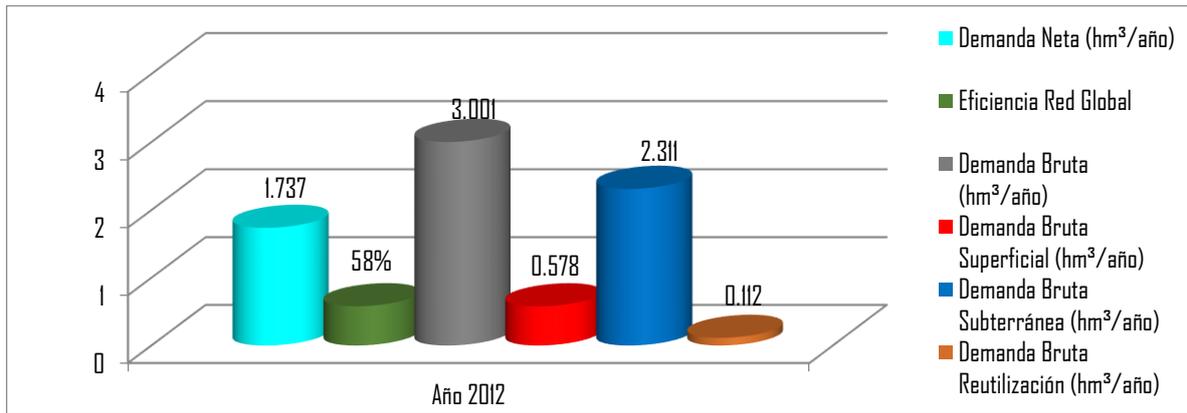


Figura 15. Demanda Neta y Bruta, Eficiencia de la red y origen de los recursos para uso agrícola UDA Pequeños regadíos de la Marina Baja.

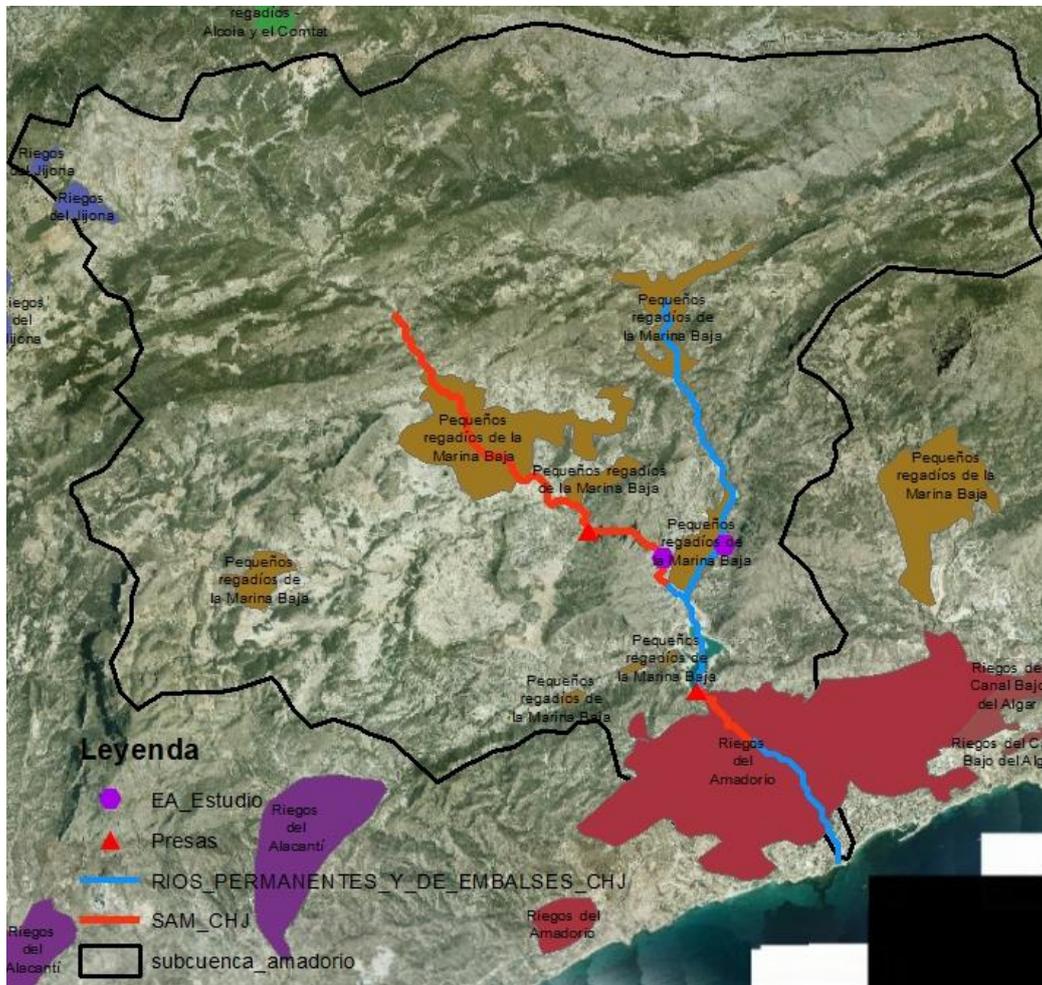


Figura 16. Mapa de UDAs en la cuenca del Amadorio.

No obstante, en cuanto a lo que la cuenca del embalse Amadorio se refiere, se delimitaron a partir del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) todas las superficies agrarias con riego aguas arriba del embalse Amadorio; adicionalmente, estos datos se compararon con lo registrado en el censo agrario de Instituto Nacional de Estadística (INE) del año 2009 y se tomó el mayor valor de superficie obteniendo los siguientes datos:

Estimación de Cultivos agrícolas con regadío cuenca embalse Amadorio.				
Cultivo	Municipio	Sup. Cultivada (ha)	Dotación Cultivo (m³/ha año)	Demanda Neta (hm³/año)
Cereales para grano	Relleu	1.991	2075	0.00413
Cítricos	Relleu	18.089	4328	0.07829
Frutales de fruto carnoso no cítrico	Relleu	0.822	4880	0.00401
Frutales de fruto seco	Relleu	102.599	2216	0.22736
Hortalizas al aire libre	Relleu	0.37	3513	0.0013
Hortícolas protegidos	Relleu	0.306	3450	0.00106
Leguminosas grano	Relleu	0.33	2600	0.00086
Olivar	Relleu	78.931	1847	0.14579
Patata	Relleu	0.522	3050	0.00159
Viveros	Relleu	0.1	5072	0.00051
Otros cultivos leñosos	Relleu	1.645	3318	0.00546
Vid: uva de mesa	Relleu	0.137	2375	0.00032
Vid: uva de vinificación	Relleu	0.7	2375	0.00166
Total Superficie Regada (ha) y Demanda (hm³/año)		206.542		0.47234

Tabla 4 Cultivos con regadío cuenca río Amadorio aguas arriba del embalse (Superficie y demanda)

Como se puede observar en la Tabla 4, cerca del 50% de la superficie regada corresponde a frutales de fruto seco como los almendros, este cultivo ha sido tradicionalmente seco; sin embargo, su productividad se puede aumentar a partir de un riego eficiente, ya que en la actualidad presenta una alternativa importante en términos de rentabilidad para los agricultores (Agroptima, 2018). Ponderando las necesidades hídricas con la superficie regada se obtiene una dotación de cultivo media para la cuenca del río Amadorio de 2287 m³/ha-año, lo que corresponde a cultivos con una demanda baja en relación a la superficie cultivada. Por otra parte, en la Tabla 5 observamos que, aunque en la cuenca del río Sella se tiene una dotación media de 4073 m³/ha-año, su área de 87.17 ha y demanda de 0.35 Hm³/año son menores comparadas con la superficie de 206.54 ha y demanda de 0.48 Hm³/año de la cuenca del río Amadorio aguas arriba del embalse Amadorio.

3.7 Demanda Urbana.

Estimación de Cultivos agrícolas con regadío Cuenca Río Sella Aguas arriba Embalse.				
Cultivo	Municipio	Sup. Cultivada (ha)	Dotación Cultivo (m ³ /ha año)	Demanda Neta (hm ³ /año)
Cítricos	Orxeta	24.465	4328	0.10589
Frutales de fruto carnoso no cítrico	Orxeta	0.811	4880	0.00396
Frutales de fruto seco	Orxeta	2.755	2216	0.0061
Olivar	Orxeta	4.862	1847	0.00898
Vid: uva de vinificación	Orxeta	0.426	2375	0.00101
Cítricos	Sella	19.708	4328	0.08529
Frutales de fruto carnoso no cítrico	Sella	25.49	4880	0.12439
Frutales de fruto seco	Sella	5.701	2216	0.01263
Hortalizas al aire libre	Sella	0.74	3513	0.0026
Olivar	Sella	2.142	1847	0.00396
Patata	Sella	0.052	3050	0.00016
Otros cultivos leñosos	Sella	0.025	3318	0.00008
Total Superficie Regada (ha) y Demanda (hm³/año)		87.177		0.35505

Tabla 5. Cultivos con regadío Cuenca Río Sella aguas arriba del embalse Amadorio (Superficie y demanda)

En la cuenca del embalse Amadorio se tienen tres municipios que representan la mayor parte de la demanda urbana; estas demandas están englobadas en el PHJ 2015-2021 en las UDUs Subterráneos de Orcheta y Superficiales de Marina Baja junto con otros municipios cercanos; a continuación, se presentan las demandas, población, habitantes equivalentes y dotación para cada municipio en particular:

Estimación Demanda Urbana cuenca hidrográfica Río Amadorio Aguas Arriba E. Amadorio						
Municipio	UDU	Origen	Población Permanente	Hab. Equivalentes	Dotación (l/hab-día)	Demanda (Hm ³ /año)
Relleu	Subterráneos de Orcheta	Subterráneo	1258	1359	339	0.168
Orcheta	Subterráneos de Orcheta	Subterráneo	778	840	339	0.104
Sella	Superficiales de Marina Baja	Superficial	584	636	339	0.079

Tabla 6 Demanda Urbana por municipio cuenca embalse Amadorio.

3.8 Análisis de la gestión en la cuenca hidrográfica del Amadorio e Infraestructura hidráulica existente.

La cuenca hidrográfica del Amadorio hace parte del Sistema de Explotación de la Marina Baja (S.E. Marina Baja), un sistema que se caracteriza por un delicado balance oferta-demanda y una compleja gestión. El S.E. Marina Baja cuenta con una infraestructura hidráulica que le permite mitigar en cierta medida la variabilidad de los recursos, almacenarlos y trasladarlos para los diversos aprovechamientos que en la cuenca tienen lugar. El siguiente esquema conceptual obtenido del PHJ 2015-2021 con el modelo de gestión SIMGES-AQUATOOL nos muestra la interconexión en la gestión del sistema:

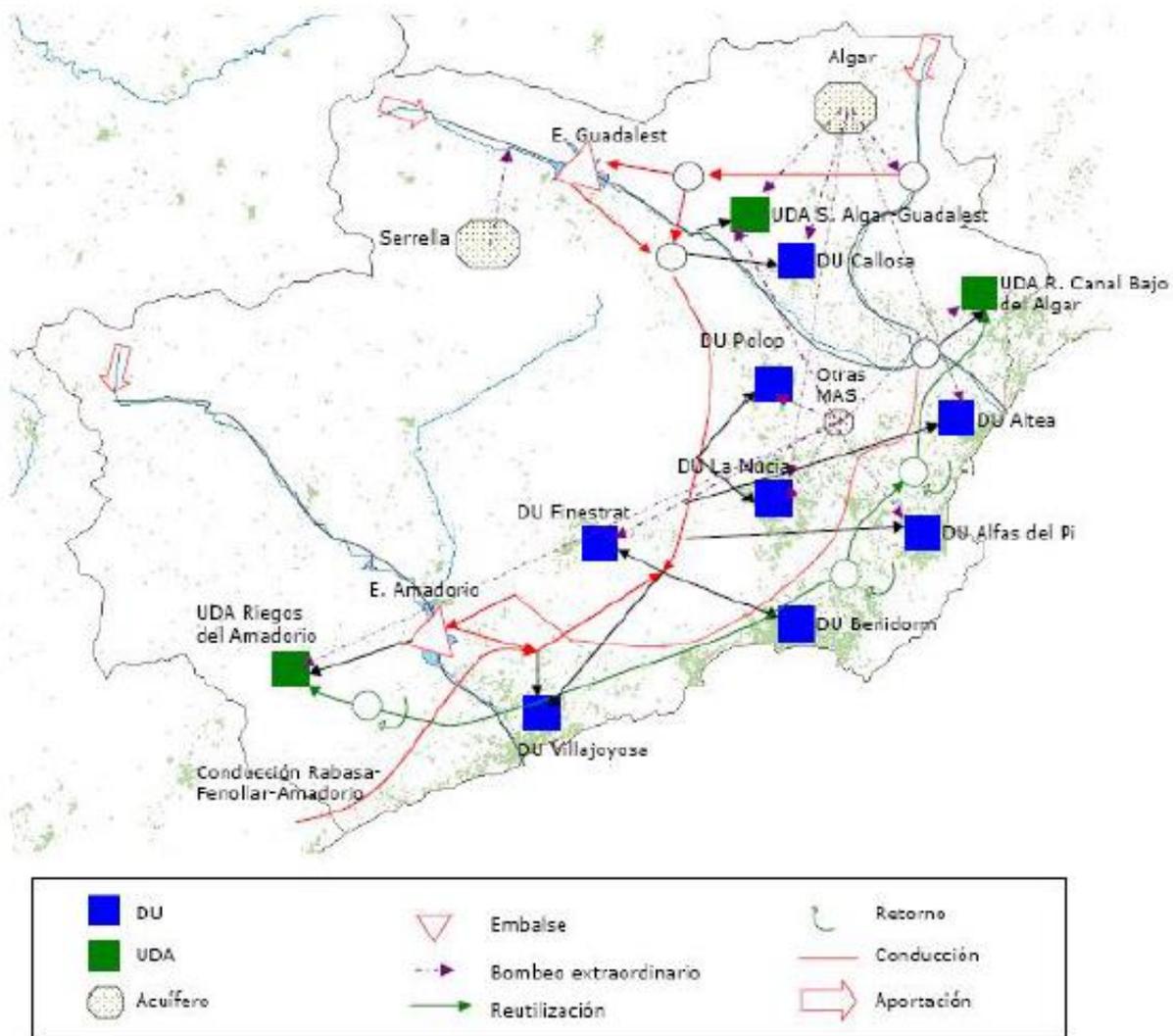


Figura 17 Esquema conceptual del sistema de explotación de la Marina Baja

La Figura 17 muestra como infraestructuras más importantes de almacenamiento el embalse de Guadalest con un volumen útil de 13 Hm³ y el embalse del Amadorio con 16 Hm³ respectivamente; además de las distintas demandas urbanas, agrícolas, aprovechamientos de origen subterráneo y reutilización de aguas depuradas. Para el análisis de la temporalidad y régimen hidrológico del río

Amadorio y Sella aguas arriba del embalse se requiere conocer todas las aportaciones netas al embalse, y en este punto es clave resaltar los traslados de recursos desde el azud de Torres cuyos recursos provienen en su mayoría de la cuenca del río Guadalest y Algar.

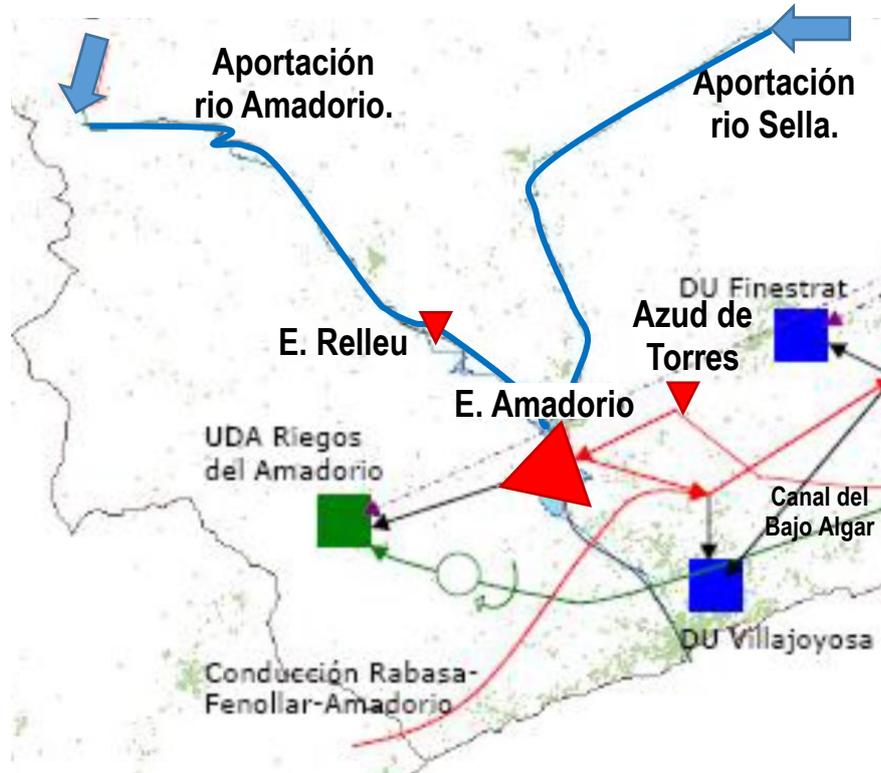


Figura 18. Esquema de aportaciones al E. Amadorio y Usos Agrícolas y Urbanos aguas abajo del embalse.

La gestión de recursos para la atención de demandas está a cargo en su mayoría por el Consorcio de Aguas de la Marina Baja; uno de sus stakeholders más conocidos es Jaime Berenguer, Jefe de Explotación de la entidad, quien recalca los esfuerzos de la entidad para obtener y distribuir de la forma más eficiente posible los recursos disponibles entre los distintos usuarios del S.E. de la Marina Baja. Pieza clave en esta gestión, es la interconexión entre ambos sistemas, que se hace posible a través del Canal Bajo del Algar; este toma agua de la presa de la Rompuda y del azud de Mandem; la presa de la Rompuda se encuentra en el río Guadalest, aguas arriba de su confluencia con el río Algar. Por otra parte, el azud de Mandem, ubicado en la confluencia de ambos ríos, dispone de una estación de bombeo para la impulsión del recurso hasta el Canal Bajo del Algar.

El Canal Bajo del Algar termina en el azud de Torres, desde donde se bombea el agua hasta otro canal que conduce el agua por gravedad al embalse de Amadorio; este tipo de gestión se inició aproximadamente desde marzo de 1989, como parte del plan de gestión de la Marina Baja que en conjunto con los aprovechamientos subterráneos de los acuíferos de Beniardá, Algar y Serella buscaban

aumentar la garantía de suministro de recursos a las demandas urbanas y agrícolas existentes y proyectadas.

Embalse del Amadorio: Se construyó en el año 1957 a lo largo del cauce del río Amadorio sobre una superficie de 103 hectáreas y con una capacidad máxima de 16 hm³; tiene una presa de gravedad de 63 m de altura y 318 m de longitud de coronación, con aliviadero de compuertas de 400 m³/s de capacidad (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2017). Desde el embalse de Amadorio parte una conducción hacia los municipios de Villajoyosa, Finestrat y Benidorm; desde él se abastece una parte de la demanda de la comunidad de regantes "Riegos del Amadorio" y las demandas urbanas de los municipios anteriormente mencionados. Este embalse toma primordial importancia debido a que se tienen registros continuos de los volúmenes embalsados y salidas desde el inicio de su explotación; esta valiosa información permite a partir de un balance en el embalse conocer las entradas al mismo. Cabe aclarar, que este balance ha sido obtenido sin contabilizar las pérdidas por evaporación o transferencias externas a la cuenca y por ello se debe realizar una restitución de estos caudales para su posterior aplicación a un modelo hidrológico.



Figura 19 Embalse del Amadorio Sep./2015 – Fuente: Tomas Talavera Fotografía.

Embalse de Relleu: El embalse de Relleu, es una construcción arquitectónica levantada en el siglo XVII gestada por el Rey Felipe III y ordenado por Felipe IV. Caracterizada como una presa de arco de base tipo bóveda, fue construida como infraestructura de gestión de recursos para los regantes de Villajoyosa; se mantuvo en operación hasta finales de siglo XIX cuando por el alto nivel de aterramiento y la reducción de su capacidad de almacenamiento fue abandonada y de manera natural convertida en lo que hoy se conoce como el Pantano de Relleu (Climent Brotons, Salgot de Marçay, & Soler, 2017). Para el presente estudio lo más llamativo de este pantano es su capacidad de laminación de avenidas, dado su volumen de almacenamiento calculado en 0.137 Hm³; esta estimación se obtuvo a partir de una curva batimétrica

del MDT Lidar resolución 5 metros que concuerda con lo planteado por Climent et al. En su estudio "Evaluación del Estado de la Antigua Presa de Relleu, Perspectivas Futuras" donde se estimó en 129.462,25 m³. Este aspecto introduce un alto grado de incertidumbre ya que no se cuentan con registros históricos de evolución de caudales o sedimentos en el vaso del embalse; no obstante, se considerarán condiciones constantes desde el periodo histórico hasta el actual.

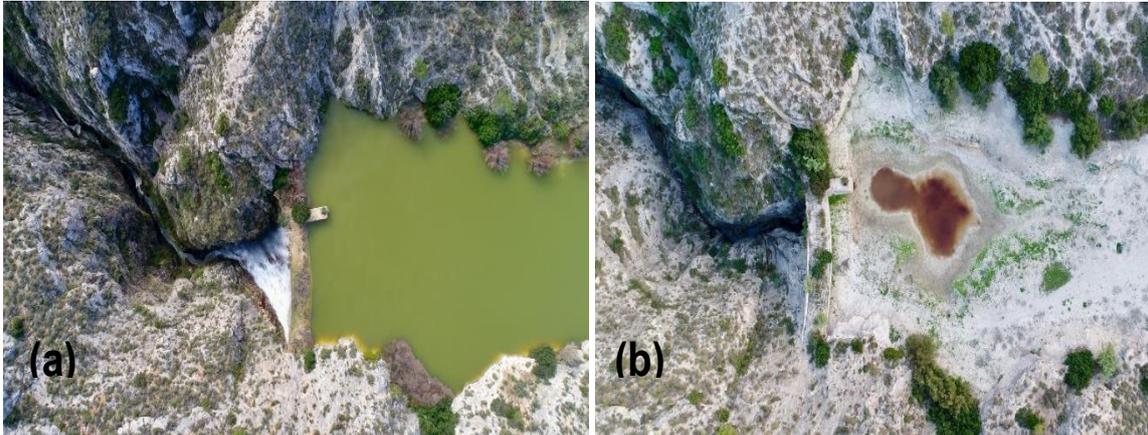


Figura 20 Fuente Fotoneutron. Cuerpo de presa Relleu (a) Desbordamiento por coronación Ene 2017 (b) Embalse vacío Oct 2017

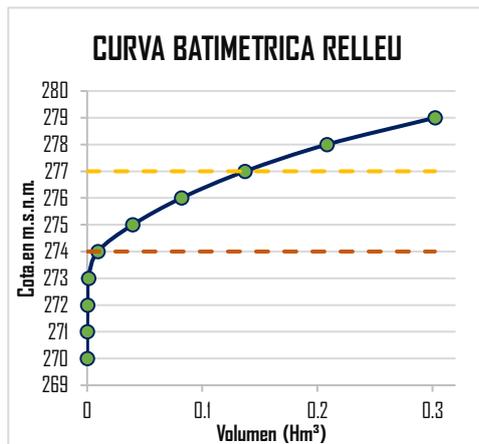


Figura 21 Curva Batimétrica Embalse Relleu

Como se observa en la Figura 21 por debajo de la cota 274 el volumen y superficie son prácticamente despreciables; por otra parte, se tiene el nivel 277 como cota máxima sobre el cuerpo de presa y altura de coronación, para niveles superiores a este se produciría un vertimiento por coronación y caudal de salida igual al de entrada en el embalse; no obstante para simular los caudales desaguados en los distintos eventos la curva batimétrica se prolongó hasta la cota 285 sin restricción del caudal de salida y por ello el

régimen permite la evacuación de los caudales por encima de la cota de coronación en el mismo intervalo de discretización temporal que el del modelo, que en nuestro caso sería la escala diaria.

Azud de Torres: Es una estructura hidráulica de transición con poca capacidad de almacenamiento; a pesar de recibir esporádicamente aportación del mismo río Torres, su principal utilidad es la recepción de las aguas provenientes del Canal del Bajo Algar e impulsarlas posteriormente hasta el embalse del Amadorio. Esta gestión es clave para satisfacer las demandas dependientes del sistema ya que las aportaciones propias de la cuenca no son suficientes para todos los usos existentes.



CAPÍTULO 4.

RECOPILOCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA

“Tratar de ayudar de una manera eficaz a solventar un problema histórico como es la falta de agua en nuestra provincia (Alicante)” - Antonio Gil Olcina - Catedrático emérito de la Universidad de Alicante.

INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

4.1 Datos Observacionales de Precipitación.

Como paso inicial para el análisis de la meteorología de la zona de estudio se ejecutó una revisión de los pluviómetros existentes y se encontró una densidad significativa de 8 pluviómetros, como se observa en la Figura 22.

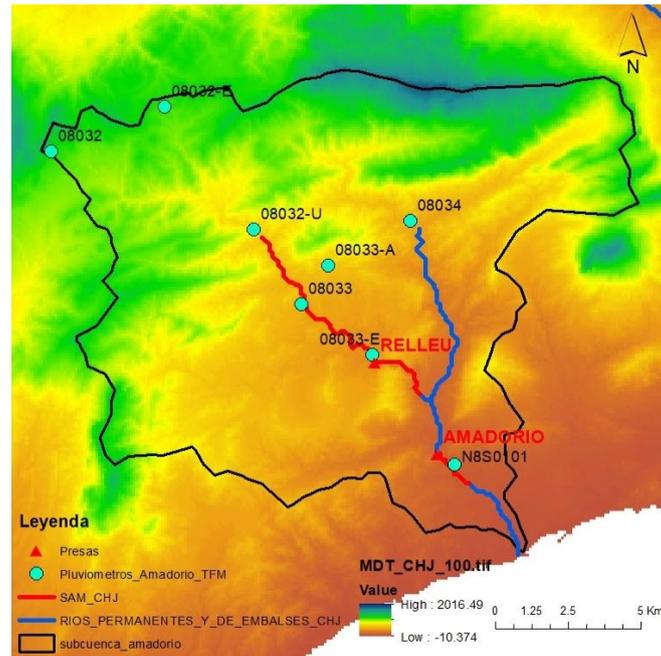


Figura 22. Pluviómetros Amadorio registrados por la AEMET.

Pluviómetros Puntuales Amadorio						
Cod. Pluviómetro	Nombre E. Meteorológica	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud (m.s.n.m.)	Fecha Inicio	Fecha Final
08032-E	PENAGUILA LA ROQUETA	728977	4280690	946.24	1/10/2002	1/08/2016
08032-U	RELLEU LES PALANQUETES	732078	4276400	557.25	1/06/2009	1/08/2016
8033	RELLEU C.H.J.	733700	4273820	386.66	1/10/1913	1/09/1995
08033-A	RELLEU	734633	4275140	519.70	1/10/1942	1/12/2008
08033-E	EMBALSE DE AMADORIO	736178	4272040	293.32	1/10/1971	1/08/2016
8034	SELLA	737493	4276710	407.05	1/10/1952	1/08/2016
8032	TORREMANZANAS SANATORIO	725075	4279130	1023.70	1/10/1942	1/09/1951
N8S0101	Pluviómetro de Amadorio	739000	4268210	92.17	1/03/1989	1/04/2017

Tabla 7. Información de los pluviómetros Amadorio.

En la no Tabla 7 se observa que para los distintos pluviómetros varían los periodos de mediciones y la mayoría presentan una gran cantidad de vacíos para los periodos por debajo de los años 70, los registros significativos de lluvia van desde 1970 hasta 2016 con una mayor concentración de datos en el periodo actual; sin embargo, con el objetivo de elegir los pluviómetros más significativos y con mayor presencia de datos se seleccionaron los pluviómetros 8032-E (Penaguila), 8033-E (Embalse Amadorio) y 8034 (Sella).

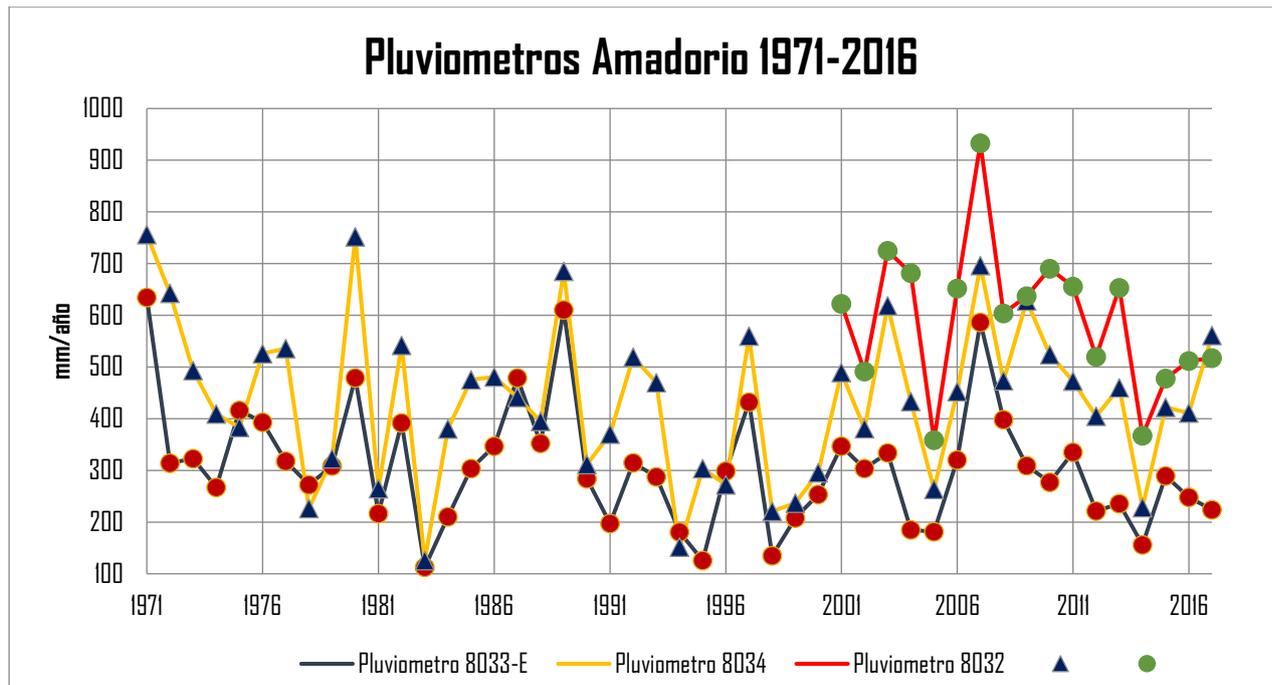


Figura 23. Precipitación (mm/año) Pluviómetros Amadorio.

Otro de los factores claves a considerar, que se hace evidente en la Figura 24, es la fuerte relación de la precipitación y la altitud de los pluviómetros; este aspecto es de vital importancia si se quiere representar espacialmente de una manera acertada el input más importante del ciclo hidrológico. El modelo de simulación hidrológica elegido para el proyecto cuenta con un factor de interpolación lineal de la lluvia con la altitud (β), pero para manejar un orden aproximado de cuantía y para representar mejor esta variable se presenta la Figura 24.

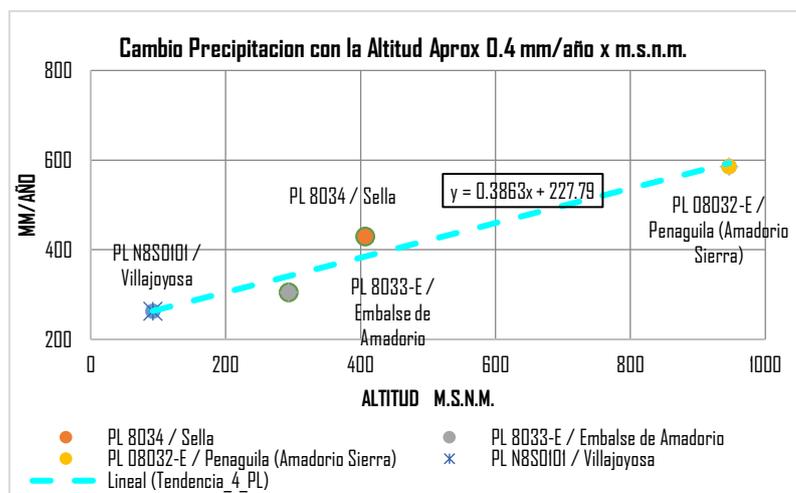


Figura 24 Representación Precipitación media anual vs altitud del pluviómetro.

4.2 Datos observacionales de temperatura.

La temperatura resulta un input clave en los modelos hidrológicos para determinar en primera medida la evapotranspiración de referencia de la vegetación (ET_o) y en segundo nivel la fusión de nieve (que en este estudio no aplica); sin embargo, la información de libre acceso de la AEMET solo registran la temperatura media diaria y no la temperatura máxima y mínima clave para el cálculo de la ET_o; por estos motivos se optó por implementar en el proceso de calibración y validación del modelo TETIS las series de temperatura del proyecto Spain02 v.02.

El proyecto Spain02 v.02. fue desarrollado por el grupo de investigación *Santander Metereology Group* que está integrado por investigadores de la Universidad de Cantabria en convenio con la AEMET, este proyecto presenta como resultado una base de datos proveniente de una malla interpolada de resolución 20Kmx20Km que abarcan las series desde el 01/01/1950 de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima a escala diaria para España Peninsular y las Islas Baleares (Santander Metereology Group, 2017).

En la Figura 25 se muestra la distribución de la malla de información meteorológica en el ámbito de la confederación hidrográfica del Júcar y su respectivo Modelo de Elevación Digital.

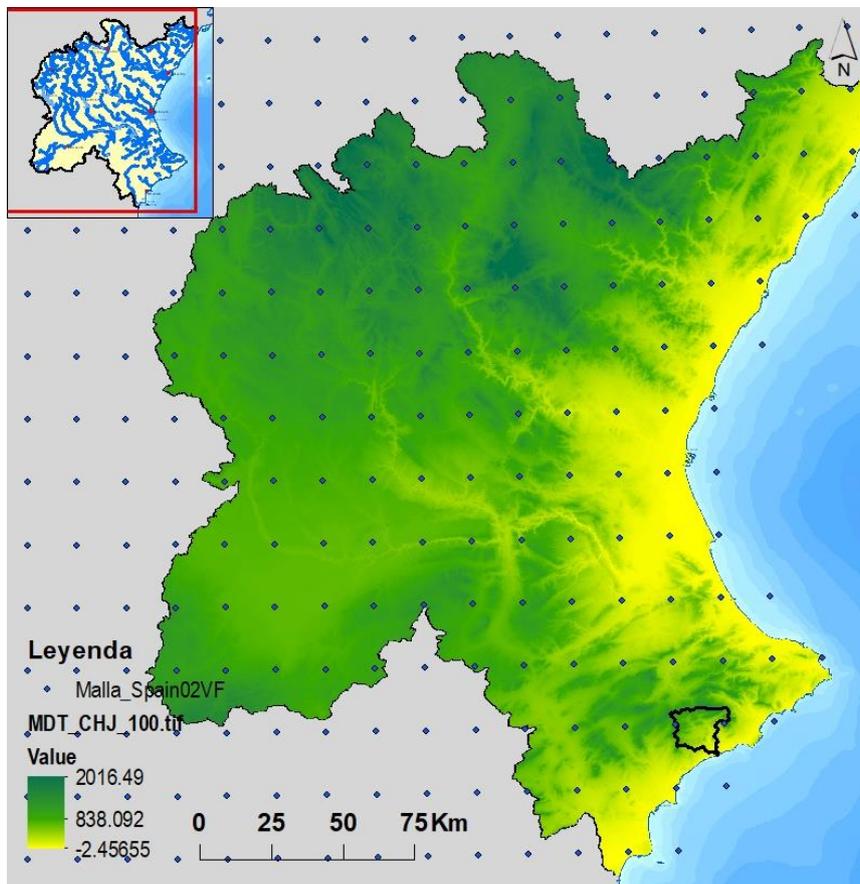


Figura 25 Malla Spain02 v.02 en el ámbito de la CHJ.

A partir de los datos pluviométricos y la malla con las series de temperatura de Spain02 v02, TETIS implementa el método del Inverso de la Distancia al Cuadrado como metodología de interpolación de la precipitación y la evapotranspiración. Adicionalmente a modo ilustrativo, a partir de un SIG se presentan los mapas de la distribución espacial de la Precipitación y la Temperatura Máxima media anual en mm/año y °C respectivamente, para el periodo (1950-2016) en la cuenca del Amadorio. Se puede apreciar una mayor precipitación en la zona del río Sella respecto al Amadorio en su cabecera, así como una mayor temperatura máxima en la zona baja de la cuenca.

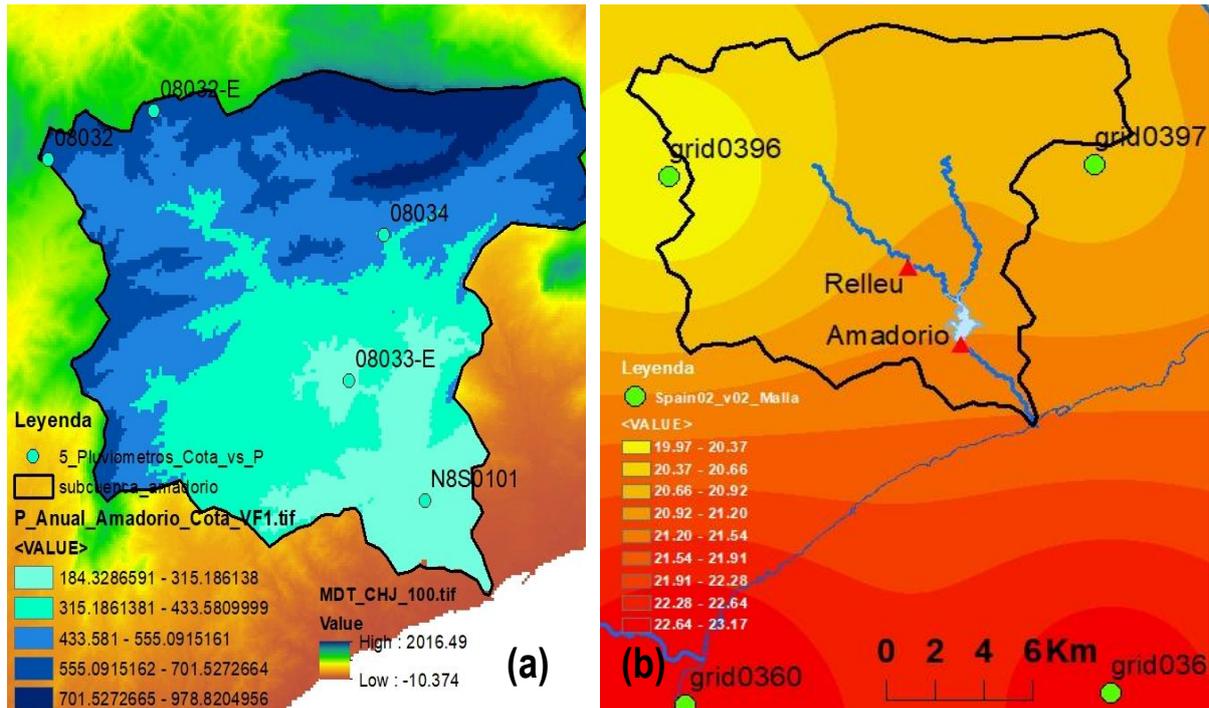


Figura 26 Distribución de la Precipitación (a) y Temperatura Máxima (b) Amadorio- Malla Spain02v.02

4.3 Evapotranspiración de Referencia (ET₀)

Para determinar la ET₀, la FAO recomienda implementar la ecuación de Penman-Monteith (1990) como lo indica su Instructivo No 56 "Guía para la determinación de los requerimientos de los cultivos: Evapotranspiración del Cultivo", para su cálculo se requiere conocer variables climáticas tales como:

- | | |
|--|--|
| R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹) | R_a : Radiación extraterrestre (mm día ⁻¹) |
| G : Flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹) | E_a : Presión real de vapor (kPa) |
| T : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C) | γ : Constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹) |
| u₂ : Velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹) | e_s - e_a : Déficit de presión de vapor (kPa) |
| Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹) | E_s : Presión de vapor de saturación (kPa) |

No obstante, la mayoría de variables que solicita el método requieren para su medición de estaciones meteorológicas relativamente modernas y por ello no se cuentan con registros históricos de dichas variables. Como alternativa se ha propuesto la aplicación de la ecuación de Hargraves y Samani (Samani, 1998):

$$ET_o = 0.0023(T_{\text{mean}} + 17.8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a$$

Ecuación 1 Determinación de la ETo Hargraves-Samani (1982)

La Ecuación 1 implementa como variables principales la Temperatura media, máxima, mínima en °C y la Radiación solar extraterrestre (Ra) en mm/día; esta última puede ser obtenida de la **Tabla 8** relacionando la latitud y hemisferio (Allen et. al 1998), los valores vienen dados en MJ m² día⁻¹ y para transformarlo a mm/día se requiere multiplicarlo por un factor corrector de 0.408.

Hemisferio Norte - Ra (MJ m ² día ⁻¹)												Latitud
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Grados
15	20	27	35	40	42	41	37	30	23	16	14	40
16	22	28	35	40	42	41	37	31	24	18	15	38
18	23	29	36	40	42	41	37	32	25	19	16	36

Tabla 8 Radiación Solar Extraterrestre Allen et. al (1998)

En el caso de la cuenca del Amadorio la latitud promedio correspondiente es de 38 grados.

Por otra parte, la constante de la Ecuación 1 que equivale a **0.0023** es un coeficiente empírico que varía según la zona de estudio y por ello la bibliografía recomienda implementar valores de 0.00218 para zonas del interior y 0.00257 para zonas costeras (Samani, 1998). Para la cuenca del embalse Amadorio se optó por calibrar dicha constante a partir de los datos obtenidos del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA, 2017) que registran la ETo con el método de Penman-Monteith entre el periodo 01/12/1999 – 04/09/2007 y se asumen como valores correctos o datos observacionales; dichos valores se contrastaron con los calculados por el método de Hargraves-Samani minimizando el error cuadrático medio y obteniendo así las constantes de la **Tabla 9**:

		Estaciones IVIA	
		Villajoyosa	Altea
Puntos Cercanos Malla Spain02v.02	Grid 0396	0.00245	
	Grid 0397	0.00267	0.00271
	Grid 0398		0.00297
	Grid 0361	0.00267	

Tabla 9 Constantes Obtenidas para el cálculo de la ETo por Hargraves-Samani (1982)

Como se puede apreciar la mayoría de constantes están por encima del 0.00257 sugerido por el autor y como criterio propio, después de eliminar los valores extremos se decidió adoptar un valor de **0.00267**.

A partir del método anteriormente expuesto se obtuvo la serie histórica de la evapotranspiración de referencia para la cuenca del embalse Amadorio; la Figura 27 representa los valores medios mensuales (1950-2016) y se puede apreciar que los mayores valores se presentan para los meses de junio, julio y agosto por encima de los 150 mm/mes.

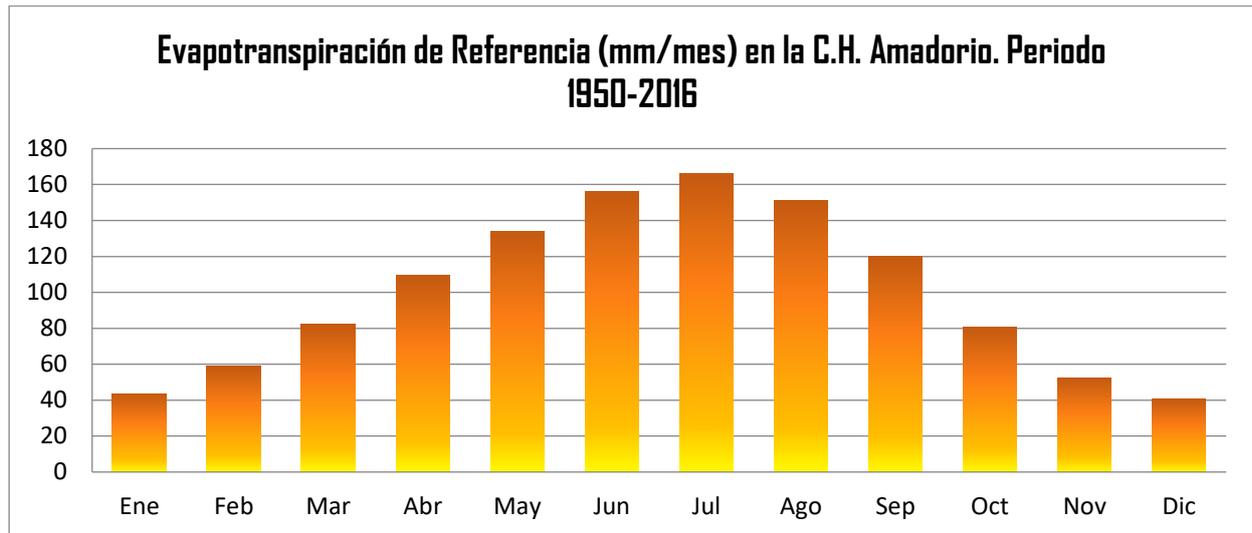


Figura 27 Distribución Mensual de la Evapotranspiración de Referencia en la C.H. Amadorio.

INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

4.4 Estaciones de Aforo y Puntos de Observación de caudales.

Las estaciones de aforo y puntos de observación de caudales seleccionados para el análisis de la hidrología de la zona son presentados en la Tabla 10:

Fuente	Cod	Nombre	Subcuencas	Municipio	UTM ETRS89 X	UTM ETRS89 Y	Año Inicio	Año Fin
RDEA	8078	E.A. Río Amadorio	Amadorio	Orxeta	737,639.99	4,271,236.62	1911	1987
RDEA	8024	E.A. Sella	Sella	Orxeta	738,745.04	4,271,486.59	1944	1985
CHJ EMBALSE	8004	P.O. Amadorio	Amadorio	Villajoyosa	738,409	4,268,581	1958	2017

Tabla 10 Estaciones de Aforo y puntos de observación cuenca Amadorio

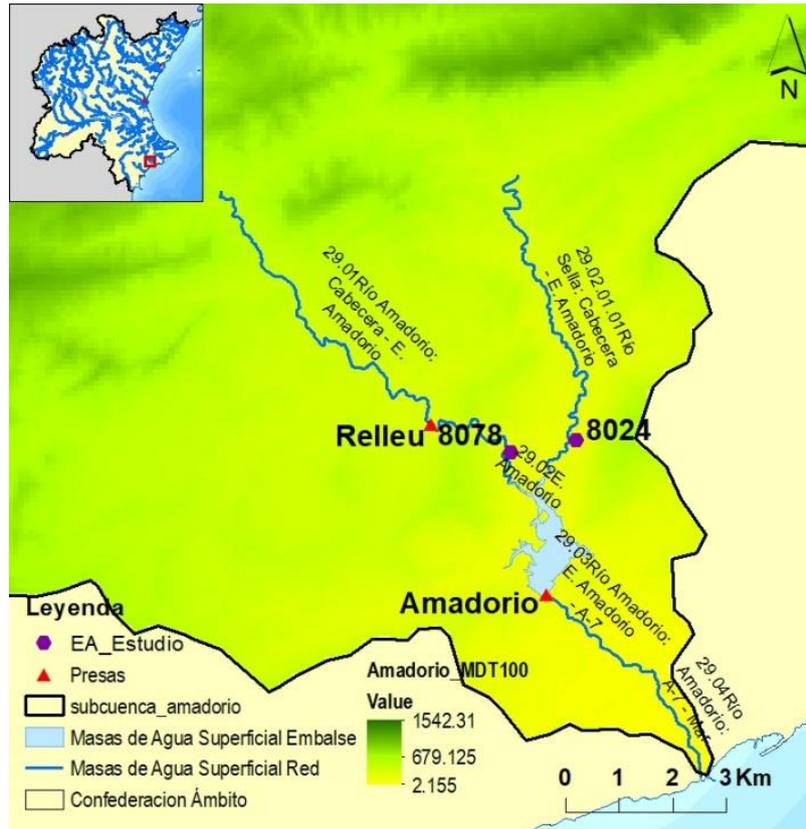


Figura 28 Estaciones de Aforo y Embalses Amadorio y Relleu.

La estación del Río Amadorio ubicada en el tramo del Amadorio (E.A. 8078) y la estación del río Sella (E.A. 8024) presentan importantes vacíos de datos, como se evidencian en la Figura 29 y Figura 30; adicionalmente, no cuentan con registros hasta la actualidad lo que dificulta su utilización como referencia en la calibración. Un tercer punto de observación de caudales (Embalse de Amadorio Cod. 8004) se ha obtenido a partir del balance en el embalse Amadorio con los volúmenes almacenados y las salidas históricas; como ventaja se tiene una serie histórica sin vacíos de datos y en principio con un mayor grado de confianza, también se cuentan con registros actuales de aforo, a diferencia de las estaciones Río Amadorio y Sella; sin embargo, presenta un grado de sensibilidad a los caudales bajos dado que no generan un cambio significativo en la batimetría, esto se da para los caudales inferiores a $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por lo enunciado anteriormente, el punto de observación de caudales del E. Amadorio se eligió como punto de aforo para la calibración; por otra parte, las estaciones Sella 8024 y Río Amadorio 8078 se utilizaron como puntos de validación espacial y temporal, siendo esta última de fundamental importancia, puesto que es la que reproduce la hidrología de la zona de cabecera del Amadorio y por lo tanto la que podría caracterizar hidrológicamente de mejor manera la masa de agua Sin Agua en los Muestreos (SAM) No 29.01.

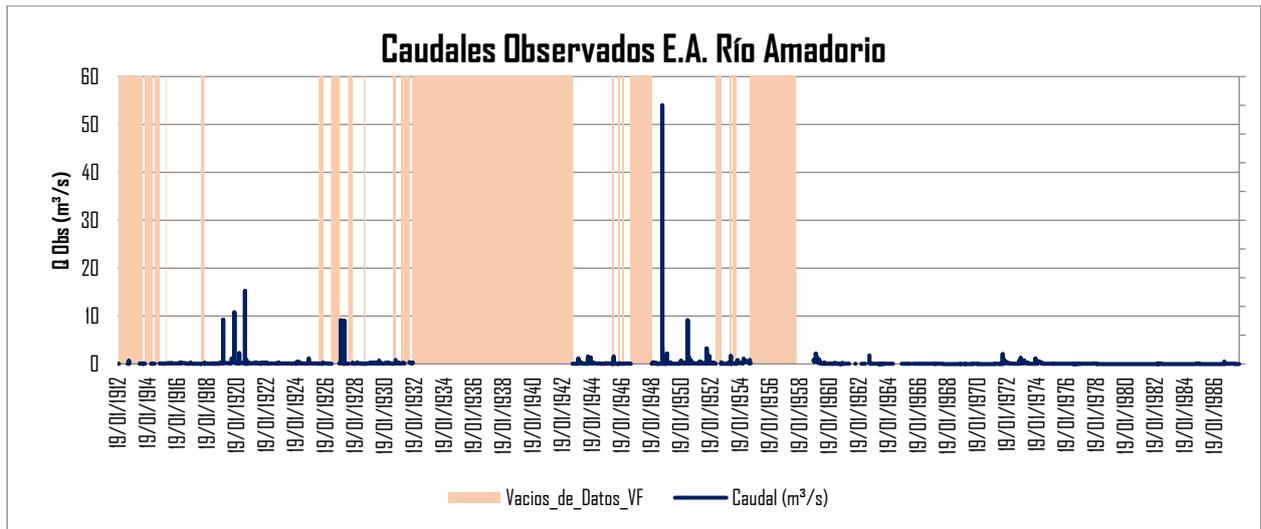


Figura 29 Serie Histórica Diaria Estación de Aforo Río Amadorio

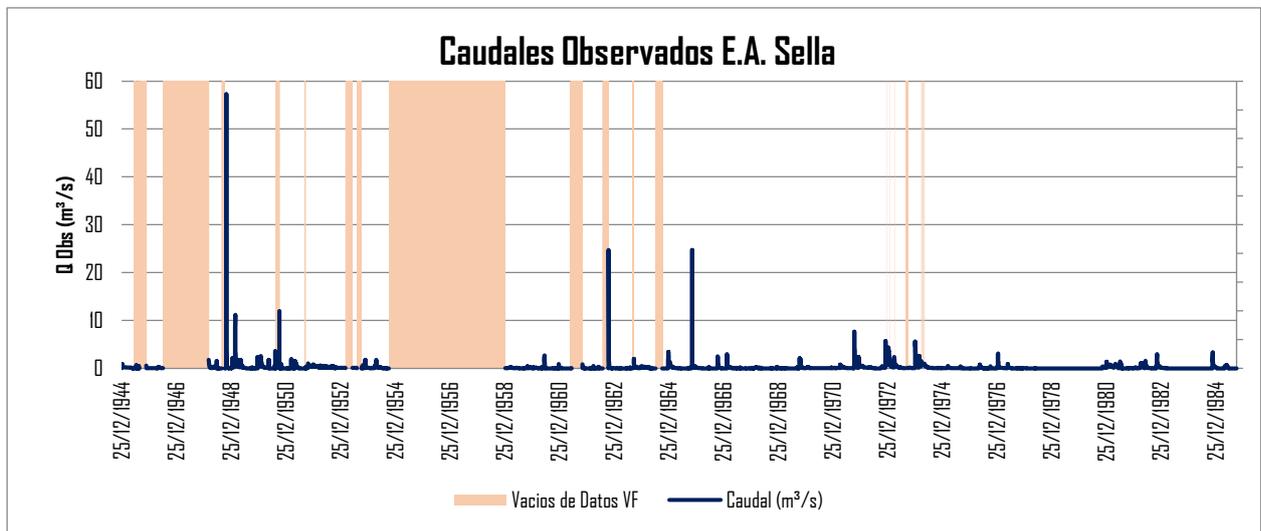


Figura 30 Serie Histórica Diaria Estación de Aforo Sella

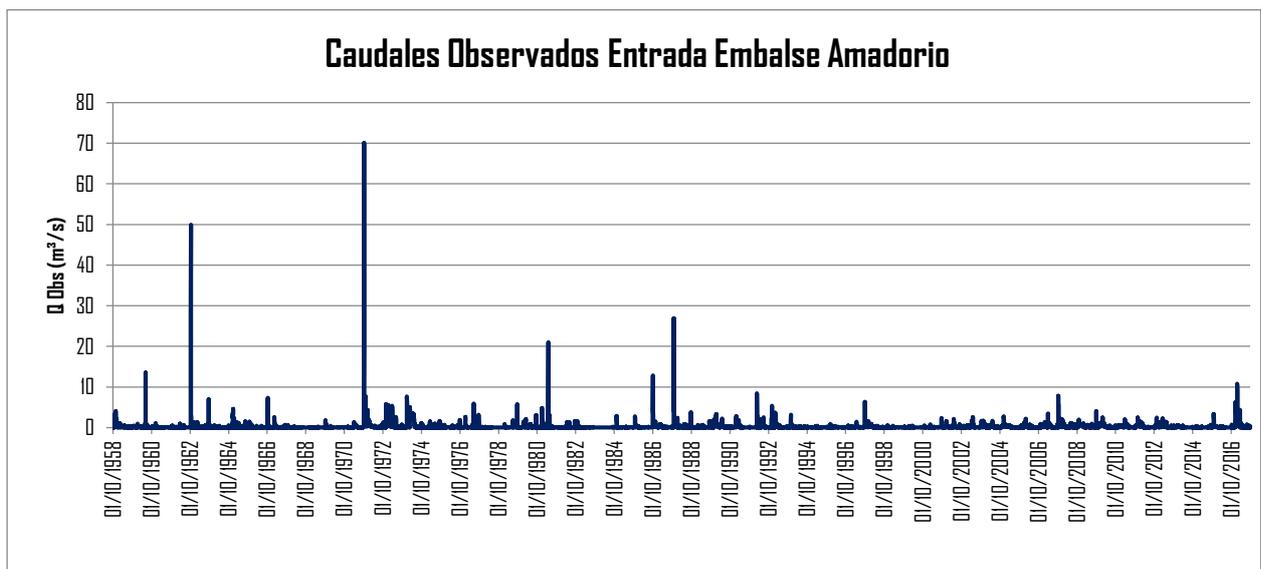


Figura 31 Serie Histórica Diaria Punto de Observación de caudales E. Amadorio.

La Figura 29, Figura 30 y Figura 31 de las series históricas nos dan un orden de magnitud de los episodios más significativos y vacíos de datos existentes en los registros; no obstante, el interés principal en términos de calidad ecológica y ambiental es el análisis de los caudales mínimos y nulos; por ello se presentan a continuación los gráficos la curva de permanencia de caudal que nos muestra su porcentaje de ocurrencia versus el valor del caudal (Q en m³/s) en escala logarítmica; adicionalmente, en el grafico (b) se amplía el eje Y de la serie histórica y se observa la ocurrencia de caudales mínimos inferiores a 0.5 y 1 m³/s según sea el caso.

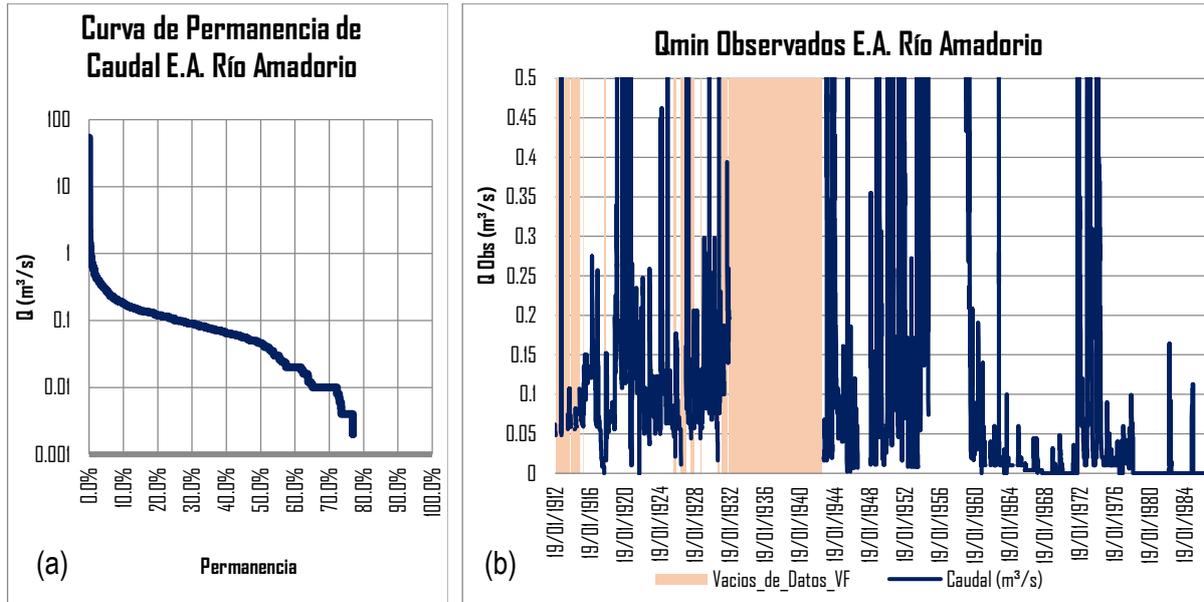


Figura 32 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Río Amadorio, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio.

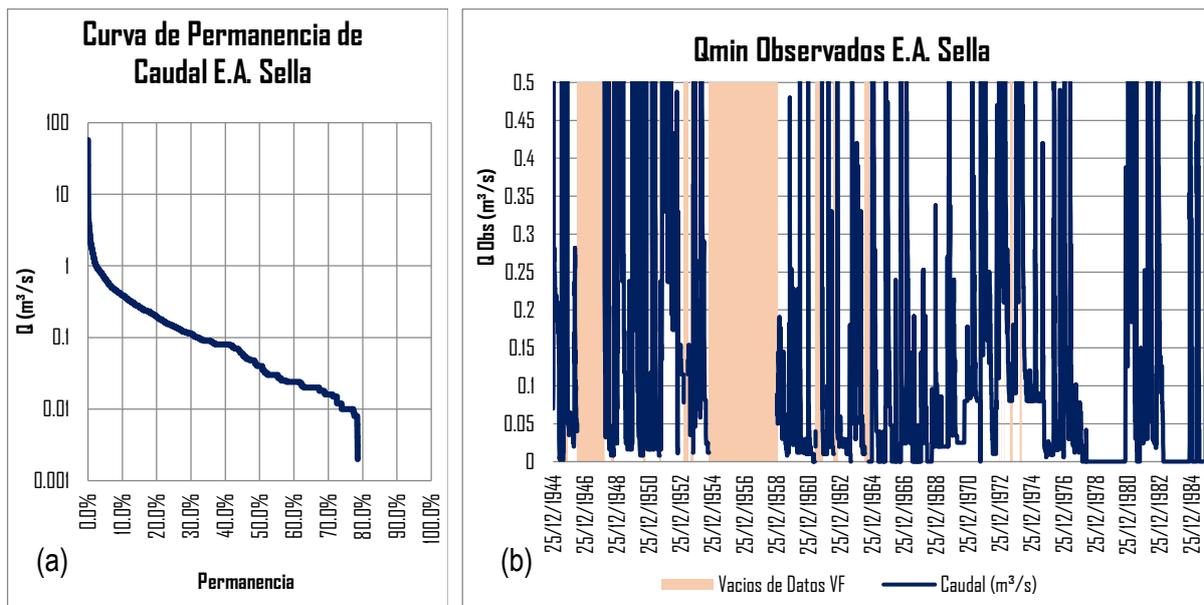


Figura 33 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Sella, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Sella.

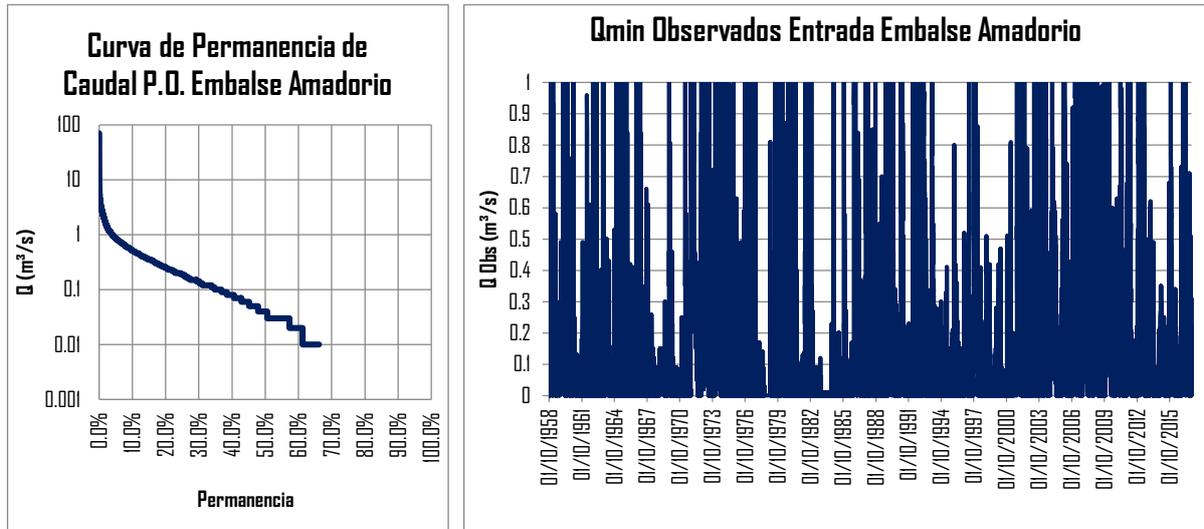


Figura 34 Curva de Permanencia Q E. Amadorio, (b) Caudales Mínimos Observados Embalse Amadorio.

Podemos apreciar que en los tres puntos de observación de caudales hay una frecuencia importante de caudales bajos; además, a partir de las curvas de permanencia se observa una presencia de caudales importante con valores de 78.5% para la EA. Río Amadorio teniendo un gran peso los caudales a principio de siglo, 76.9% para la E.A. Sella y 66.18% para el punto de observación en el Embalse Amadorio, siendo este ultimo un poco menor debido a la sensibilidad del balance en el embalse a caudales bajos, como se mencionó anteriormente.

Cabe aclarar, que como se enuncio en el apartado 3.8 Análisis de la gestión en la cuenca hidrográfica del Amadorio, la información obtenida en el Embalse del Amadorio son datos de explotación sin ningún tipo de restitución a régimen natural; por ello es necesario aplicar un procedimiento de restitución donde se evalué la influencia de la evapotranspiración en el embalse, las aportaciones externas de la cuenca y cualquier otro tipo de influencia al régimen natural del mismo.

4.5 Restitución a Régimen Natural P.O. Embalse del Amadorio.

Para realizar la restitución a régimen natural de las aportaciones registradas en el Embalse del río Amadorio se analizaron varios factores y se formularon algunas premisas:

- Las aportaciones provenientes del azud de Torres, que a su vez provienen del Canal del Bajo Algar deben ser descontadas de los datos de entrada al embalse; en aquellos casos donde no se registren entradas, pero si traslados, se acumulara y se descontara del siguiente registro para mantener el balance general de recursos.

- Se sumarán a las entradas del embalse las perdidas por evaporación de la lámina de agua a partir de la superficie embalsada.
- Por último, aunque se tiene registro de los permisos de concesión para la extracción de recursos subterráneos; en la cuenca se presenta una desconexión del río y el acuífero resultando siempre los cauces como perdedores. Por lo anterior, no se considerarán en primera medida las extracciones subterráneas dentro del balance de restitución a régimen natural en el P.O. del embalse Amadorio.

Para realizar la restitución a régimen natural (RN) se aplicó el balance de la Ecuación 2 a escala diaria en el embalse:

$$\text{Entrada } 8004 \text{ RN } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \text{Entrada } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) + \text{Sup. Embalse (Ha)} * \text{Evaporacion Mes (mm)} - \text{Bombeos Torres } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

Ecuación 2. Restitución a régimen natural en el P.O. Embalse Amadorio Cod. 8004.

Siendo:

Entrada (m³/s): Los datos de explotación del embalse obtenido por el balance de volumen embalsado y salidas; estos datos pueden ser obtenidos a través de la CHJ o el CEDEX.

Superficie del Embalse (Ha): Esta superficie fue obtenida a partir de la curva batimétrica del Embalse Amadorio, el resultado es la relación de los volúmenes embalsados versus la superficie de la lámina de agua como se puede observar en la Figura 35.

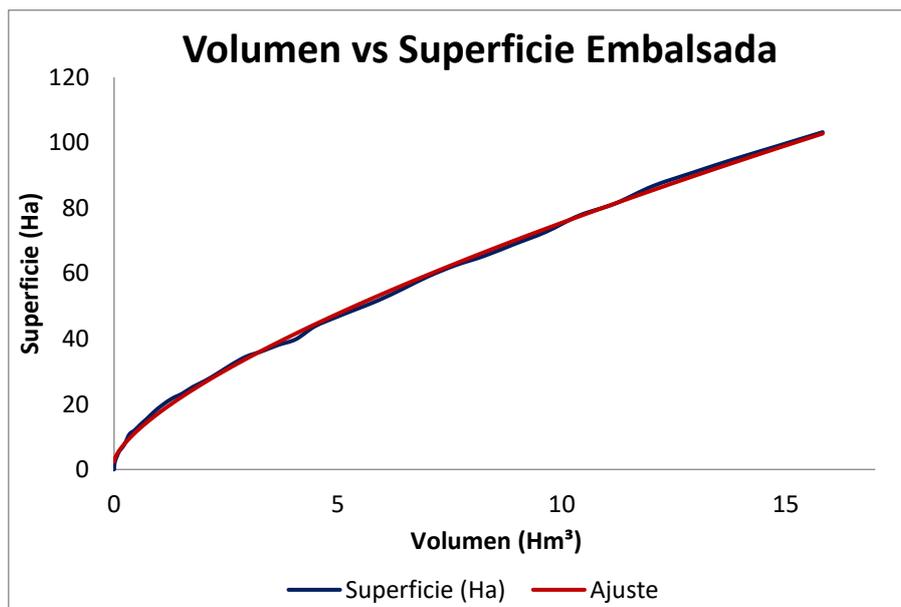


Figura 35. Curva Volumen Embalsado vs Superficie lámina de agua.

Evaporación media mensual (mm/día): para el cálculo de las pérdidas por evaporación en la lámina de agua del embalse, se implementaron los valores medios mensuales del evaporímetro instalado en el mismo embalse con código 8015, los valores medios adoptados son los expuestos en la Tabla 11:

MES	Evaporación. Media (mm/día)
Oct	2.62
Nov	2.53
Dic	2.52
Ene	2.49
Feb	2.83
Mar	2.93
Abr	2.98
May	3.08
Jun	3.35
Jul	3.56
Ago	3.32
Sep	3.00

Tabla 11. Valores medios de evaporación en el embalse.

Bombeos desde el Azud de Torres (m³/s): Los datos correspondientes a los caudales impulsados desde el Azud de Torres han sido proporcionados en su mayoría por el Consorcio de Aguas de la Marina Baja, organismo encargado de la gestión y traslado de recursos en el S.E. de la Marina Baja; los datos restantes fueron obtenidos de los registros de la CHJ. Parte de esta información fue obtenida a escala diaria y otra a escala mensual; por ello, se requirió una ponderación a escala diaria en el caso de los registros mensuales; con el fin de poder obtener los caudales de entrada al embalse a la escala que precisa el modelo de simulación. La información registra el inicio de los bombeos a partir de marzo de 1989, lo que coincide con la aplicación de los planes de garantía de suministro en la región.

A partir de la información, anterior se obtuvo una serie restituida para el periodo 01/10/1958 hasta 31/12/2016, aplicable a los modelos de simulación y análisis hidrológico.

4.6 Análisis de la información hidrológica.

Al analizar la información hidrológica existente para la cuenca del Amadorio se presentan dos hitos importantes que precisan un estudio más profundo; el primero es referente a las aportaciones en régimen natural al embalse del Amadorio, que como se observa en la Figura 36, se han visto reducidas de manera importante en el periodo reciente en cerca de un 54% si se compara con el periodo 1958/59-1979/80. Si bien, gran parte de esta reducción se debe a la fuerte influencia del periodo húmedo experimentado al inicio de los años 70s; los diversos cambios que ha experimentado la cuenca nos lleva a cuestionarnos si este comportamiento puede asociarse únicamente a la variación de los inputs climáticos o si podrían ser producto de cambios de origen antrópico.

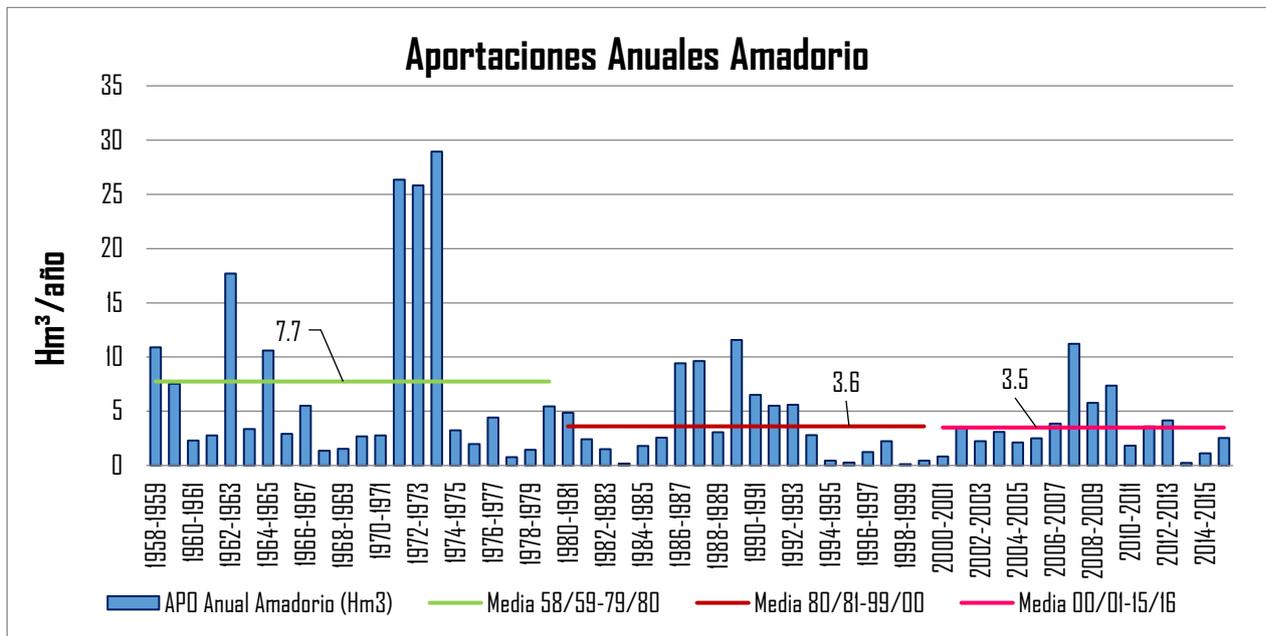


Figura 36. Aportaciones anuales en régimen natural al E. Amadorio 1958/59 – 2015/16.

En segunda instancia, examinando detenidamente el hidrograma de caudales mínimos de la estación Río Amadorio se observa una desaparición del caudal base del cauce; en la figura 38 se aprecia que a inicios de siglo se tenían valores medios de caudal base de 50 Lt/s, flujos que fueron mermando, variando e incluso desapareciendo a finales de los años 70s. Estos cambios registrados en las estaciones de aforo nos llevan a cuestionarnos ¿Qué cambios ocurridos en la cuenca podrían haber llevado a esta variación en la relación río-acuífero en el cauce?; sin embargo, la falta de información meteorológica fiable que preceda a 1970 resulta un obstáculo que debe solventarse si se quiere hacer una indagación o estimación de los posibles causantes de este fenómeno.

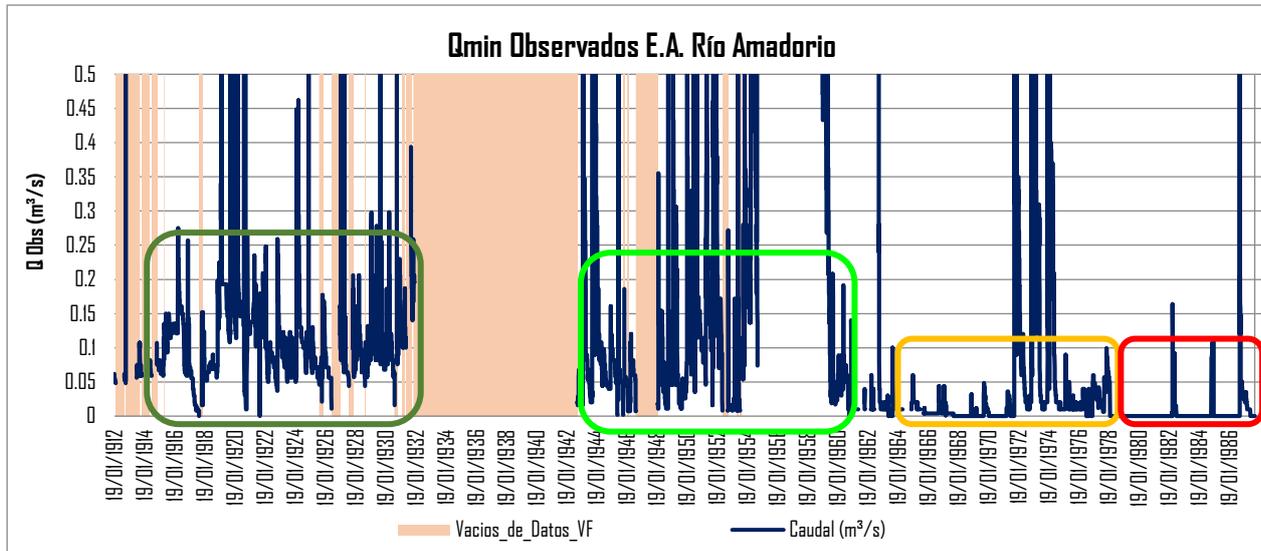


Figura 37. Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio – Análisis desaparición de flujo base.

Color	Periodo	Flujo Base
Verde	1916-1931	Caudal base importante cercano a los 50 Lt/s.
Verde claro	1944-1960	Variación del caudal base.
Amarillo	1964-1978	Fuerte reducción del caudal base.
Rojo	1980-1987	Desaparición total del caudal base.

Tabla 12. Nomenclatura periodos de caudal base E.A. Río Amadorio.

Estos análisis de la información hidrológica existente y la importancia de caracterizar los ríos temporales, ratifican la necesidad de la calibración y validación de un modelo hidrológico de tipo distribuido, que permita analizar de forma separada la variación de los distintos factores que influyen en los fenómenos de producción y propagación de escorrentía en la cuenca.



CAPÍTULO 5.

ESTIMACIÓN DE PARAMETROS CON VARIABILIDAD ESPACIAL

“Las ventajas que presenta la modelación distribuida con respecto a la tradicional modelación agregada, consisten fundamentalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos”- (GIMHA, 2018).

ESTIMACIÓN DE PARAMETROS CON VARIABILIDAD ESPACIAL.

El modelo TETIS requiere para su funcionamiento una serie de mapas de variables espaciales que representan las distintas características del suelo y sustrato; a través de estos, se busca introducir la variabilidad y heterogeneidad del medio, implementando las ecuaciones de balance del modelo que se mencionan en el Manual de Descripción del modelo Tetis v8 a escala de celda y obteniendo así una representación de los outputs de interés. Lo anterior, demuestra la funcionalidad de TETIS como un modelo conceptual distribuido con base en los procesos físicos a escala de cuenca.

Para la determinación de los mapas de parámetros, se parte de la información disponible en las distintas bases y fuentes europeas, en la Tabla 13 se enumeran los requerimientos del programa, así como la base de datos que se implementó para su determinación.

Variables Espaciales TETIS v8.		Mapa Base de Datos	
1. Modelo de elevación digital (msnm)		Modelo de Elevación Digital MED - Instituto Geográfico Nacional IGN	Tamaño pixel 100 x 100 metros
2. Mapa de Pendientes (m/m)			
3. Direcciones de Flujo			
4. Celdas Drenantes Acumuladas			
5. Velocidad de ladera (m/s)			
6. Códigos de cubierta del suelo		CORINE LAND COVER 2006	02:40.0
7. Intercepción por vegetación			
8. Almacenamiento estático H_u (mm)	a. Profundidad de Raíces (m)		
	b. Alm. Superficial (mm)		
	c. Available Water Content (mm/m)		
	d. ROD Profundidad de obstáculo (m)	European Soil Bureau DataBase ESDB	Malla 1 Km x 1 Km
	e. Alm. en Pendiente (mm)	Modelo de Elevación Digital - IGN	100 x 100 metros
9. Capacidad de infiltración (mm/hr)		European Soil Data Centre ESDAC	1 : 1.000.000
10. Capacidad de percolación (mm/hr)		Mapa geológico y de permeabilidad cualitativa IGME	04:20.0

Tabla 13 Resumen Mapas de Variables TETIS v8 y Base de Datos de Origen

5.1 Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital implementado es el proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional de formato tipo raster ASCII matriz ESRI con resolución de pixel de 25 x 25 metros; por tiempos de cálculo y debido a que el modelo hidrológico no exige tal nivel de detalle, a diferencia de un modelo hidráulico de inundabilidad, se interpoló a una malla de resolución 100x100 metros y la altitud es dada en m.s.n.m. Adicionalmente, este mapa requiere una corrección por depresiones para que el modelo pueda ejecutar de manera continua la simulación matricial celda a celda y por ello es necesaria la implementación de la herramienta de ArcGIS ".fill" que rellena los endorreísmos o depresiones del MED.

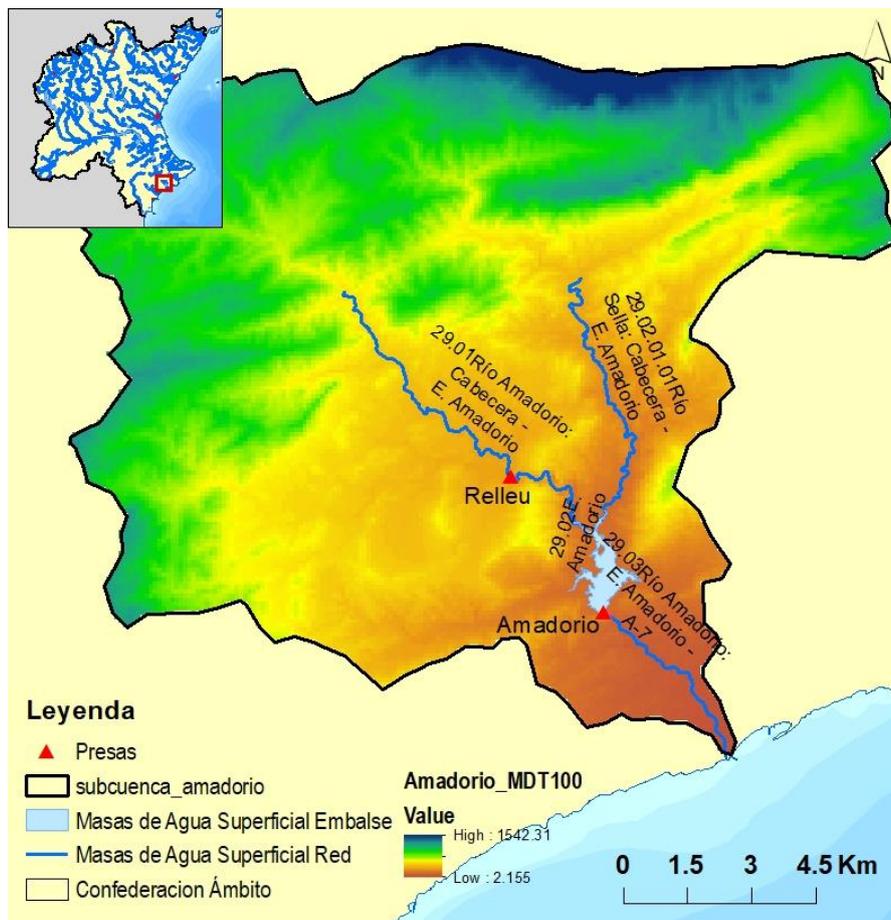


Figura 38. Modelo de Elevación Digital Cuenca Hidrográfica Amadorio

5.2 Mapa de Pendientes

El mapa de pendientes se obtuvo a partir del MED con la herramienta de ArcGIS "Slope", el mapa resultante debe ser dado en unidades de m/m y no en porcentaje como se suele representar en otros casos. En la Figura 39 se representa los valores medios de las pendientes en la cuenca del Amadorio, se logra apreciar fuertes valores de pendientes para la zona de cabecera del río Sella y en la garganta de salida del embalse de Relleu.

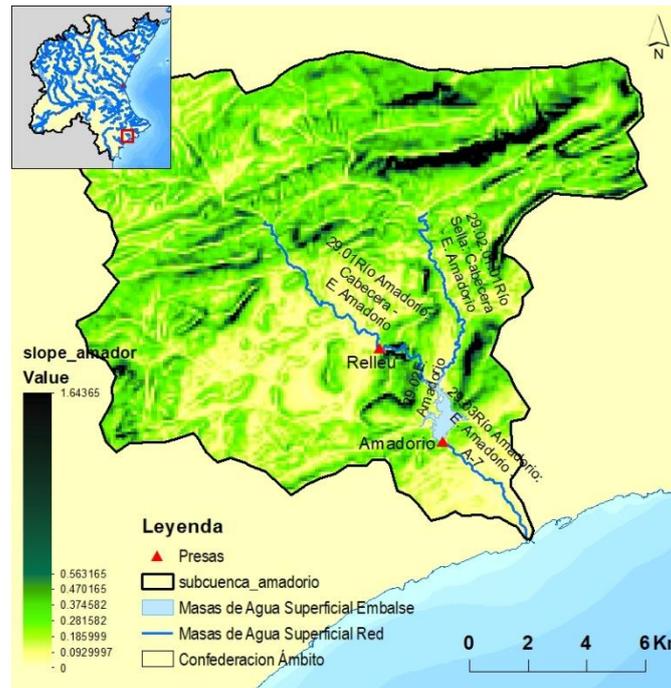


Figura 39 Mapa de Pendientes Amadorio.

5.3 Direcciones de Flujo

Este mapa, como se indicó en la Tabla 13 es obtenido igualmente a partir del MED con la herramienta de ArcGIS "FlowDirection"; en él, se ilustra de manera numérica las direcciones del flujo según su máximo gradiente de altitud. La Figura 40(b) especifica los valores que toman las celdas según la dirección de flujo calculada en el formato de ArcGIS.

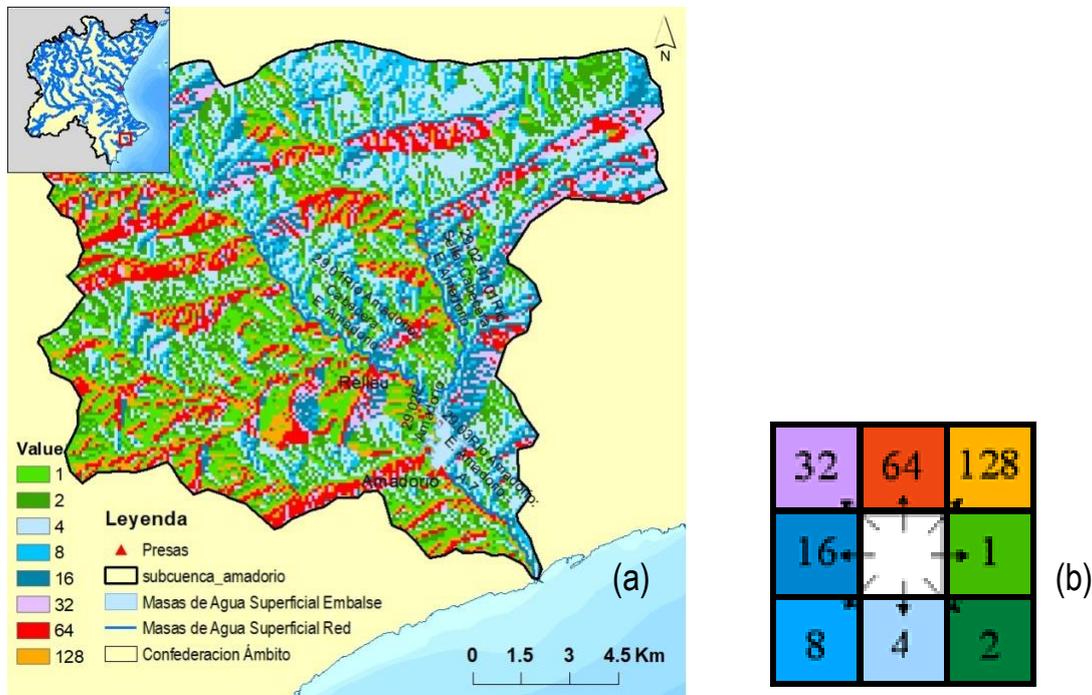


Figura 40 (a) Mapa de Direcciones de Drenaje Amadorio (b) Direcciones de Flujo ArcGIS.

5.4 Celdas Drenantes Acumuladas

El mapa de celdas drenantes acumuladas o CDA es obtenido a partir del Mapa de direcciones de flujo, en él se representa la acumulación de flujo aguas arriba de cada celda; en otras palabras, el número de celdas que drenan a través de ella. Este mapa es clave para la determinación del área umbral de aporte del flujo subterráneo; adicionalmente, permite comparar con el mapa de masas de aguas superficiales la veracidad de la red de flujo del modelo como se aprecia en la Figura 41.

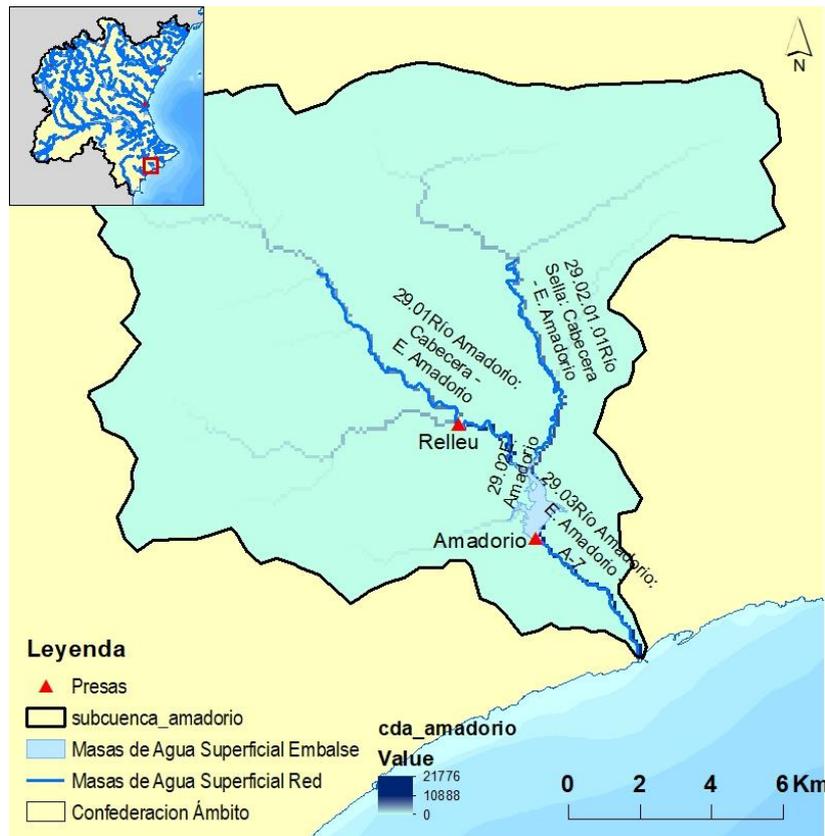


Figura 41 Celdas Drenantes Acumuladas Amadorio.

5.5 Velocidad de Ladera

Para la conceptualización del modelo de estudio, TETIS considera la velocidad como estacionaria; en nuestro caso, será estacionaria pero variable espacialmente según la pendiente. Para ello se emplea la relación expuesta en el apartado 3.2.3 *El almacenamiento superficial y la escorrentía directa* del Manual de descripción del modelo TETIS y se obtiene el resultado en m/s:

$$v = 1.4142 * So^{0.5}$$

Ecuación 3 Velocidad de ladera variable según la pendiente del terreno

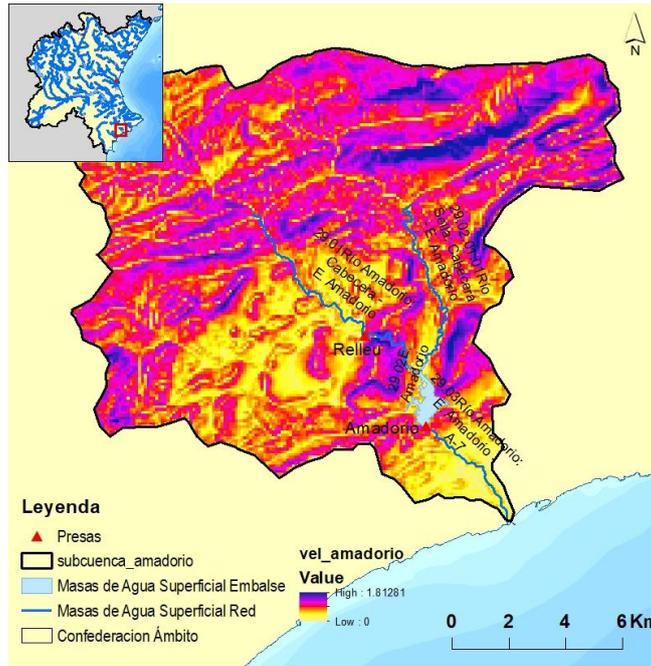


Figura 42 Mapa de Velocidad de Ladera Amadorio

5.6 Códigos de Cubierta del Suelo

Los usos del suelo o descripción de la cubierta vegetal se obtuvieron como se mencionó anteriormente, a partir del proyecto CORINE LAND COVER 2006; no obstante, TETIS solicita que tal distribución sea codificada para su posterior implementación y combinación en el modelo con el fichero Factor ETMES que se explicará en el apartado 5.7. En la Figura 43 se aprecia los usos del suelo y codificación por usos existentes en la cuenca; además, en la Tabla 14 del apartado 5.7 se enuncian los 40 usos disponibles en el ámbito de la confederación con su respectivo código en la columna ID_USOS.

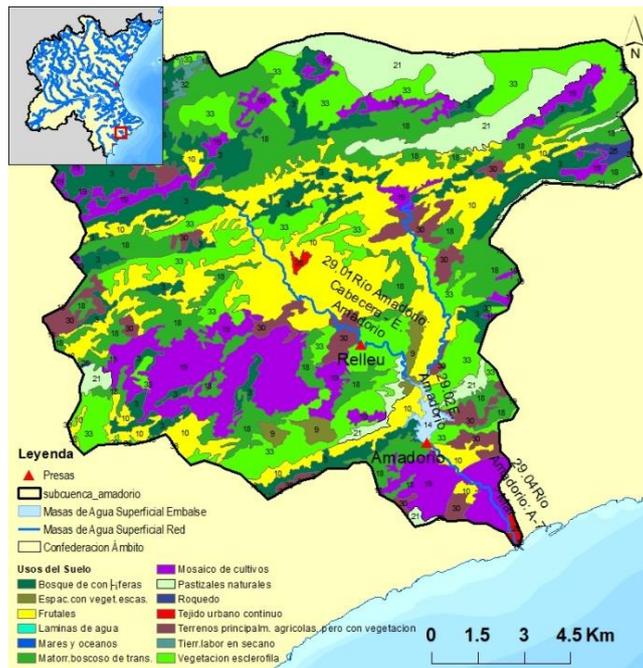


Figura 43 Mapa Actual Códigos Usos del Suelo Amadorio

5.6.1 Regresión de la cobertura del suelo a la década del 60s.

Para evaluar y comprender el origen de los cambios en la hidrología de la cuenca del Amadorio, es necesaria la implementación de una regresión en los usos del suelo en la misma; para este caso, se aplicó una modificación manual del mapa de usos del CORINE en ArcGIS a partir de la herramienta del Instituto Cartografico Valenciano (ICV, 2017) Visor-Fototeca, que permite visualizar los registros georeferenciados de la cartografía existente de la zona de estudio (Figura 44). En la zona de Villajoyosa y alrededores se cuenta con los registros de las fotografías aéreas del CECAF a partir del Vuelo Americano 1956-1957 y se obtuvieron los cambios observados en la Figura 45:



Figura 44 Visor Fototeca ICV – Villajoyosa, Vuelo Americano 1956-1957.

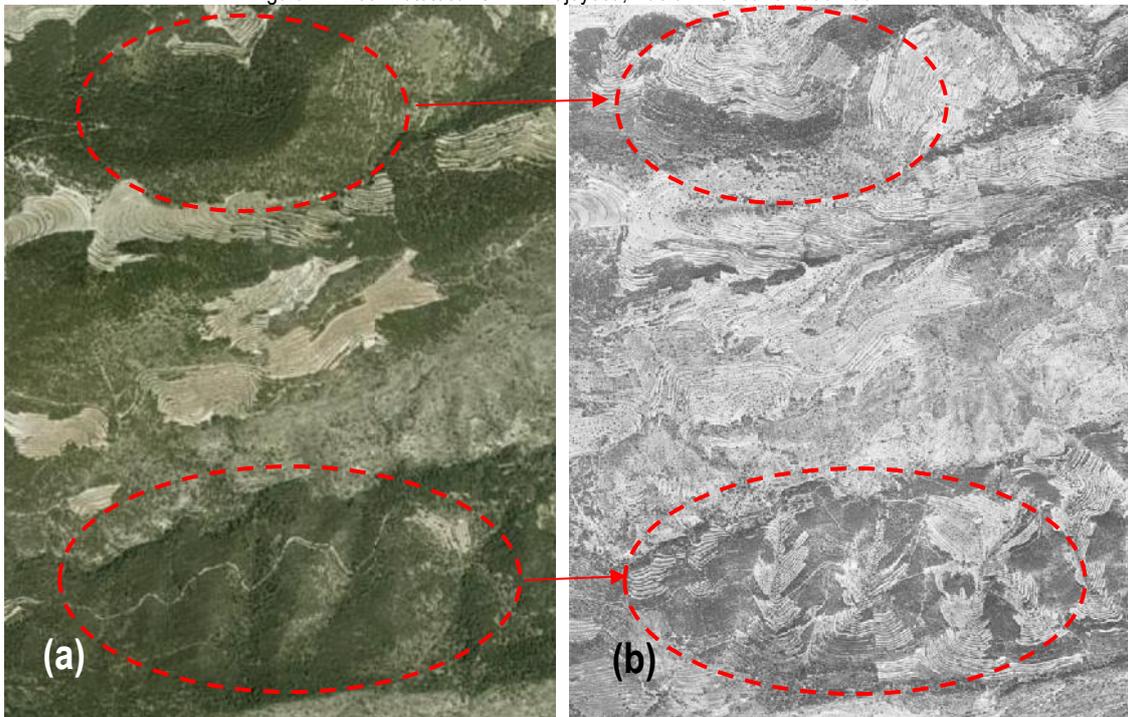


Figura 45 Contraste en municipio de Rellou (a) Zonas norte y sur bosque de coníferas (b) Terrenos agrícolas con vegetación.

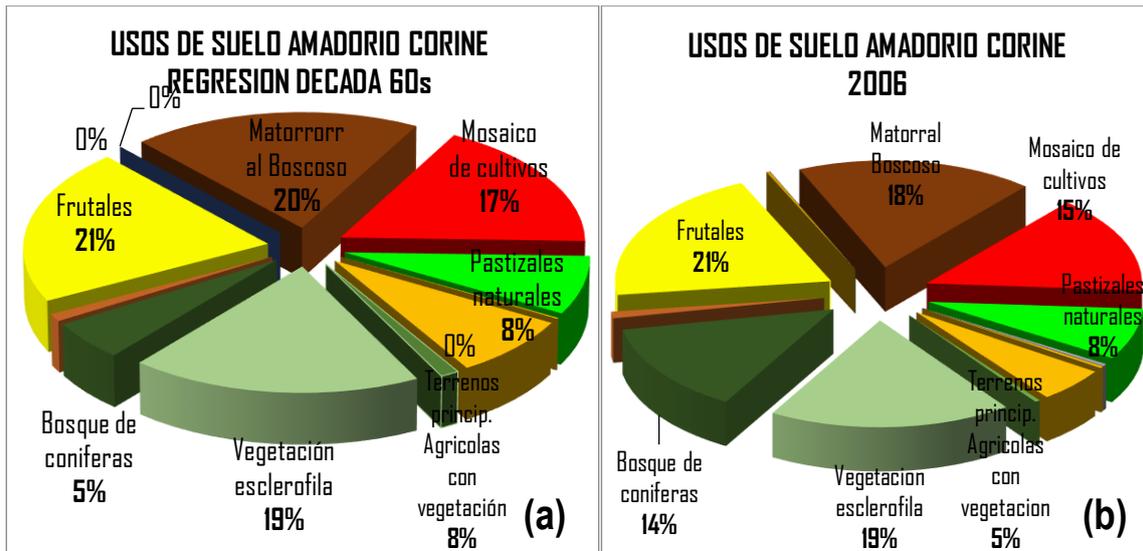


Figura 46 Comparación Usos del Suelo (a) Amadorio Década 60s vs (b) Periodo Actual.

La Figura 46 nos da un contraste del uso del suelo de la década del 60 y el periodo actual, se destacan categorías como los bosques de coníferas que contaban con un 9% más para el periodo de regresión; también se resaltan los terrenos agrícolas con vegetación (-3%) y las tierras con mosaico de cultivos (-2%). No obstante, estos cambios son más elocuentes si se compara el cambio a partir del valor en la década del 60 por categoría y por ello se presenta la Figura 47.

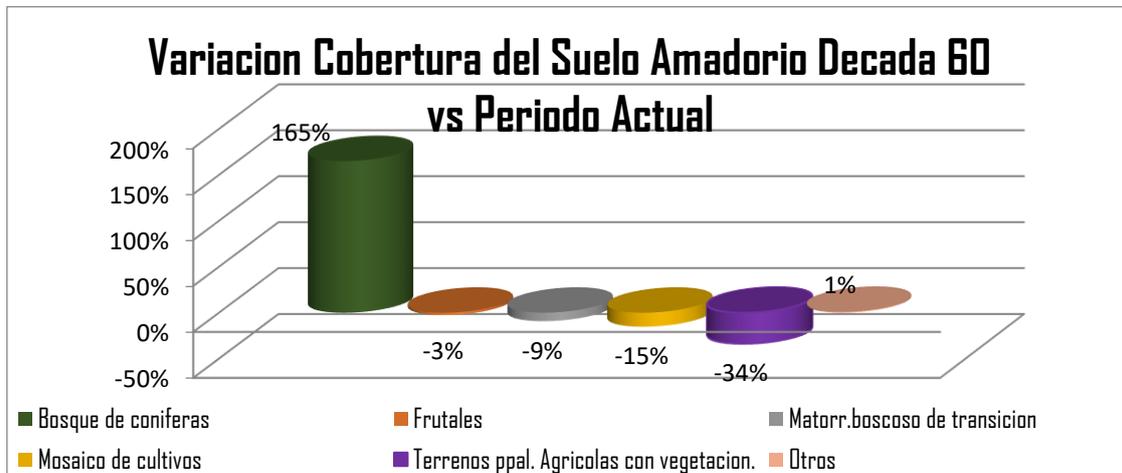


Figura 47 Variación porcentual de la cobertura del suelo en la Cuenca del Amadorio.

Como se puede apreciar, en la Figura 47 en la actualidad se han reducido las de zonas con mosaicos de cultivos (-15%) y zonas agrícolas con vegetación (-34%), su abandono puede deberse a la modernización de las técnicas de riego y producción, que demandan menor cantidad de terreno. Por otra parte, se observa un mayor porcentaje de bosque de coníferas (+165%), lo que sugiere que las áreas que en el pasado se implementaban como zonas de producción agrícola se han reforestado de manera natural y que los bosques existentes han madurado y crecido en la región. Estos cambios influyen en el modelo tanto en la intercepción y evapotranspiración, como en los valores de almacenamiento del suelo.

5.7 Intercepción por vegetación

Este apartado se refiere a la abstracción inicial de la precipitación por la vegetación; esta variable no se ingresa a TETIS propiamente como un mapa de formato raster ASCII, como se había incluido el resto de mapas hasta ahora, se ingresa a través del fichero FactorETMES que va ligado por orden de código al mapa de cobertura del suelo mostrado en el apartado 5.6. El valor de intercepción viene dado en mm y ha sido obtenido a partir del estudio del grupo de investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) para la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), en la Tabla 14 en la última columna se aprecia el valor asociado de intercepción para cada uso del suelo.

USOS DEL SUELO AMBITO CONFEDERACIÓN	ID USOS	Factor de Cobertura Vegetal o Factor de Cultivo Kc													Intercepción (mm)	
		Fuente	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
Aeropuertos	1	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Arrozales	2	FAO 56	0.2	0.2	0.2	0.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	0.8	0.2	0.2	1	
Bosque de coníferas	3	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	
Bosque mixto	4	CAPV	0.8	0.8	0.9	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.8	9	
Bosques de frondosas	5	CAPV	0.6	0.6	0.8	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.6	9	
Cultivos anuales asoc.con cult.permt.	6	FAO 56	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	1	
Cursos de agua	7	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Escubr. y vertederos	8	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Espac.con veget.escas.	9	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Frutales	10	FAO 56	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.4	1	
Humadales y zonas pantanosas	11	FAO 56	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	0.7	0.9	0.9	0	
Instalac. Deportivas y recreativas.	12	CAPV	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3	
Lagunas costeras	13	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Láminas de agua	14	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Mares y océanos	16	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Marismas	17	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	

USOS DEL SUELO AMBITO CONFEDERACIÓN	ID USOS	Factor de Cobertura Vegetal o Factor de Cultivo Kc												Interc. (mm)		
		Fuente	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov		Dic	
Matorr.boscoso de transición	18	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
Mosaico de cultivos	19	FAO 56	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	1	
Olivares	20	FAO 56	0.2	0.2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.2	0.2	1	
Pastizales naturales	21	CAPV	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3	
Playas, dunas y aren.	22	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Praderas	23	CAPV	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3	
Redes viarias, ferrov. y terrenos.	24	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Roquedo	25	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Salinas	26	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Sistemas agroforestales	27	CAPV	0.8	0.8	0.9	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.8	9	
Tejido urbano continuo	28	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Tejido urbano discontinuo	29	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
Terrenos principalm. agrícolas, pero con vegetación.	30	FAO 56	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	5	
Terrenos regados permanentemente.	31	FAO 56	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1	
Tierra labor en secano	32	FAO 56	0.2	0.2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.2	0.2	1	
Vegetación esclerófila	33	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	
Viñedos	34	FAO 56	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.2	1	
Zonas de extrac.minera	35	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Zonas en construcción	36	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Zonas industr. o comerciales	37	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Zonas portuarias	38	CAPV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
Zonas quemadas	39	CAPV	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	
Zonas verdes urbanas	40	CAPV	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3	

Tabla 14. Tabla del fichero FactorETMES (Codigos Usos del Suelo, Valores 12 Meses de Factor de Vegetación FAO56 e Intercepción)

Factor de Cobertura Vegetal o Factor de Cultivo (K_c).

Para incluir la variación intra-anual de la evapotranspiración debida al cambio en las fases de crecimiento de la vegetación, es necesaria la implementación de un factor multiplicativo que afecte la evapotranspiración potencial e interceptación por la vegetación; para ello, se ha optado por aplicar la metodología de la FAO en su guía No 56 (FAO56, 2006) que integra a través del denominado coeficiente de cultivo tal variabilidad; el procedimiento consiste en la construcción de una curva por cada tipo de cultivo con base en 4 etapas de crecimiento y 3 valores de K_c al inicio, medio y final de las etapas. Para las cubiertas de suelo no aplicables a cultivos se han implementado los valores de referencia del estudio del GIMHA en la CAPV.

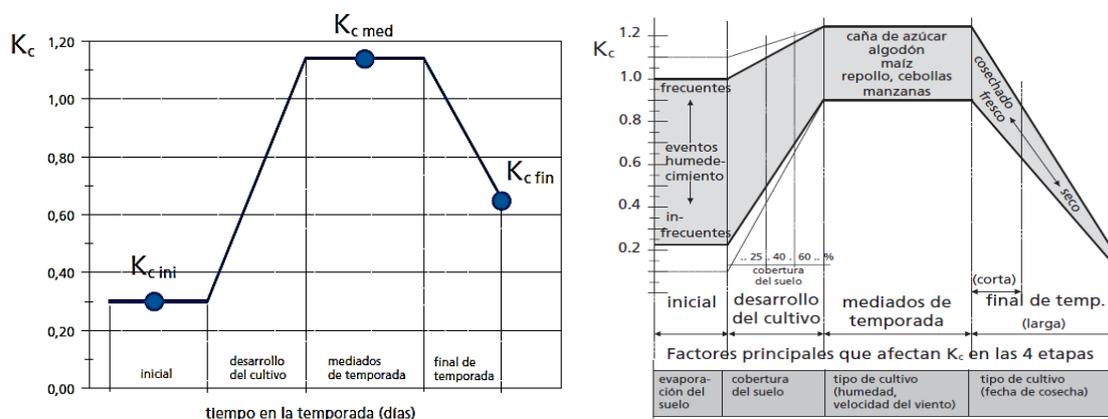


Figura 48 (a) Curva del coeficiente de cultivo (b) Rangos típicos esperados del valor de K_c para las cuatro etapas del crecimiento.

Para la construcción de las curvas de los distintos cultivos (Figura 48) se implementó los valores de la Tabla 15, ordenando en el eje x las etapas de duración del cultivo, y en el eje y el valor del coeficiente de cultivo K_c . La Figura 49 resume algunas de las curvas construidas para el modelo; en el modelo se debe ingresar el valor de K_c por cada mes, como se resume para cada uso del suelo en la Tabla 14, en la sección Factor de Cobertura Vegetal o Factor de Cultivo K_c .

CULTIVO	Inicial (Ldías)	Desarrollo (Ldías)	Medio (Ldías)	Final (Ldías)	Total	Fecha de siembra	K_c .ini	K_c .med	K_c .fin
Lechuga	20	30	15	10	75	Abril	0.7	1	0.95
	30	40	25	10	105	Nov/Ene	0.7	1	0.95
	35	50	45	10	140	Feb	0.7	1	0.95
Tomate	30	40	45	30	145	Abril/Mayo	0.6	1.15	0.7-0.9
Zanahoria	30	40	60	20	150	Feb/Marz	0.7	1.05	0.95
Melón Dulce	25	35	40	20	120	Mayo	0.5	1.05	0.75
Trigo de invierno	30	140	40	30	240	Nov	0.7	1.15	0.25-0.4
Maíz	30	40	50	30	150	Abril	0.7	1.2	0.35
Maíz Dulce	20	25	25	10	80	Mayo/Junio	0.7	1.15	1.05

CULTIVO	Inicial (Ldias)	Desarrollo (Ldias)	Medio (Ldias)	Final (Ldias)	Total	Fecha de siembra	Kc.ini	Kc.med	Kc.fin
Olivos	20	90	60	90	270	Marzo	0.65	0.7	0.7
Humedales (Veg.Baja) Carrizo Suelo Húmedo	180	60	90	35	365	Nov	0.9	1.2	0.7
Cítricos	60	90	120	95	365	Enero	0.65	0.6	0.65
Uvas (Vino)	30	60	40	80	210	Abril	0.3	0.7	0.45
Banana 2do año	120	60	180	5	365	Febrero	1	1.2	1.1
Huerto de árboles caducifolios (Manzanas)	30	50	130	30	240	Marzo	0.6	0.95	0.75
Huerto de árboles caducifolios (Duraznos)	30	50	130	30	240	Marzo	0.55	0.9	0.65
Arrozales	30	30	60	30	150	Dic, Mayo	1.05	1.2	0.9-0.6

Tabla 15 Duración Etapas de crecimiento Cultivos y Valores de Kc inicial, medio y final.

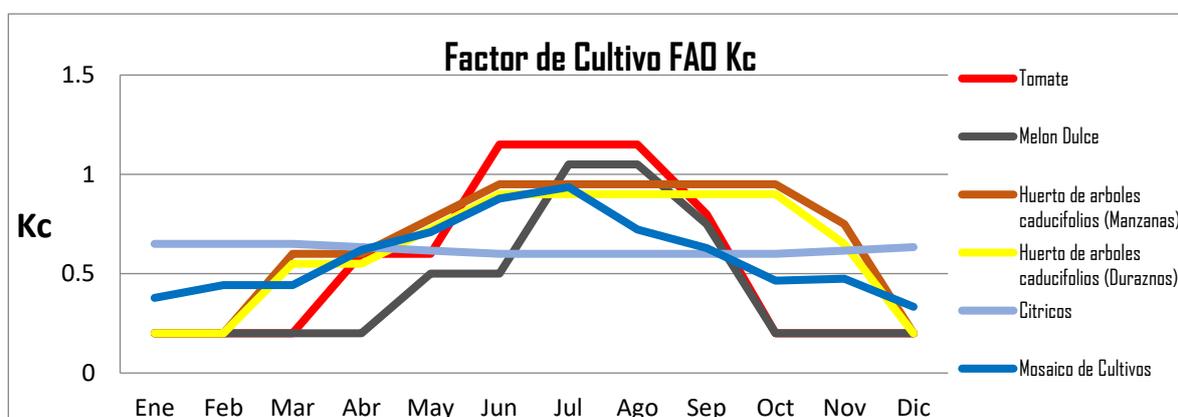


Figura 49. Curvas de Factor de Cultivo FAO Kc considerados para la determinación de la categoría Mosaico de Cultivos.

La mayoría de categorías de usos del suelo del CORINE no posee equivalente directo a los coeficientes de cultivo calculados a partir de la metodología de la FAO y por ello se ha requerido en múltiples casos promediar los cultivos más significativos, para obtener un único valor para la categoría; ejemplo de ello son las siguientes categorías de la Tabla 16 (Frutales, Mosaico de cultivos, etc.) de CORINE que se componen del promedio de los cultivos enunciados:

TERRENOS CON RIEGO PERMANENTE.	FRUTALES	MOSAICO DE CULTIVOS
Lechuga	Huerto de árboles caducifolios (Manzanas)	Huerto de árboles caducifolios (Manzanas)
Tomate	Huerto de árboles caducifolios (Duraznos)	Huerto de árboles caducifolios (Duraznos)
Zanahoria	Cítricos	Zanahoria
Melón Dulce		Melón Dulce
Cítricos		Lechuga
		Tomate
		Cítricos

Tabla 16. Promedio por categoría del CORINE a partir de los Kc de distintos cultivos.

5.8 Almacenamiento estático

El mapa de almacenamiento estático o H_u es crucial en la determinación de la capacidad de almacenamiento del suelo; para su cálculo se emplean distintas variables que contribuyen a la estimación del volumen de almacenamiento por celda en mm, la relación empleada es la expuesta por el grupo de investigación del GIMHA de la Universidad Politécnica de Valencia como se expresa en la Ecuación 4.

$$Hu_{(mm)} = Alm. pendiente_{(mm)} + Alm. Superficie_{(mm)} + AWC_{TOP (mm/m)} * Min(Prof. Raíces_{(m)}; ROO_{(m)})$$

Ecuación 4. Fórmula para determinar el Mapa de Almacenamiento estático.

a. Mapa de profundidad de raíces y b. Almacenamiento Superficial por Charcos.

La profundidad de raíces y almacenamiento por charcos se obtuvo a partir de la clasificación de usos del suelo del CORINE, aplicando los valores de referencia usados por el GIMHA (Tabla 17) y se obtuvo los mapas formato ASCII de las Figura 50 y Figura 51 para el área de estudio:

Clasificación Corine 2006	Alm. Superficial (mm)	Prof. Raíces (m)
Bosques de frondosas	4	1
Bosque de coníferas	4	1.25
Bosque mixto	4	1
Paramos y landas	6	0.7
Vegetación esclerófila	6	0.7
Matorr.boscoso de transición	5	0.7
Landas y matorrales	5	0.7
Pastizales naturales	6	0.6
Praderas	6	0.6
Playas, dunas y aren.	0	0
Roquedo	0	0.02
Espac.con veget.escas.	3	0.02
Zonas quemadas	0	0
Viñedos	6	0.8
Olivares	6	1.45
Tierr.labor en secano	6	0.8
Cultivos anuales asoc.con cult.permt.	6	0.5
Terrenos regados permanentemente.	6	0.5
Mosaico de cultivos	6	0.7
Arrozales	6	0.75

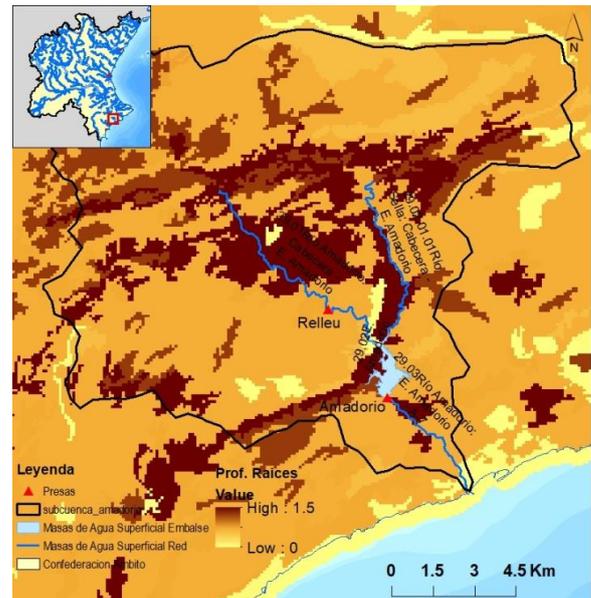


Figura 50 Mapa Profundidad de Raíces Cuenca Amadorio

Clasificación Corine 2006	Alm. Superficial (mm)	Prof. Raíces (m)
Frutales	6	1.5
Terrenos principalm. agrícolas, pero con vegetación.	6	0.75
Sistemas agroforestales	4	0.55
Forma de cultivos complejos	6	0.7
Humedales y zonas pantanosas	0	0
Turberas	0	0
Marismas	0	0
Salinas	0	0
Cursos de agua	0	0
Láminas de agua	0	0
Lagunas costeras	0	0
Mares y océanos	0	0
Tejido urbano continuo	0	0.06
Tejido urbano discontinuo	5	0.1
Zonas industr. o comerciales	0	0.06
Redes viarias, ferrov. y terrenos asociados.	0	0.06
Zonas portuarias	0	0.1
Aeropuertos	0	0.1
Zonas de extrac.minera	0	0.01
Escmbr. y vertederos	0	0.06
Zonas en construcción	0	0.06
Zonas verdes urbanas	5	0.1
Instalac. deportivas y recreativas.	5	0.1
Glaciales y nieve permanente	0	0

Tabla 17. Valores de referencia Alm. Superficial y Profundidad de Raíces.

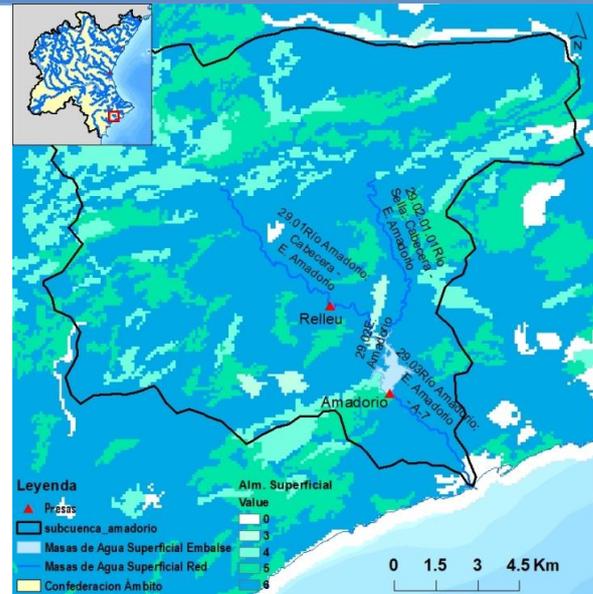


Figura 51 Mapa Almacenamiento Superficial por charcos Cuenca Amadorio

c. ROO Profundidad de Obstaculos y d. Available Water Content (AWCTOP)

Para determinar la capacidad de almacenamiento del tanque estático (Hu) es necesario además de la profundidad efectiva de raíces, la profundidad de obstáculos ROO y el valor de la capacidad de retención de agua por parte del suelo AWCTOP; para este fin, se ha aplicado los mapas formato raster de la European Soil Data Centre ESDAC que los identifica en una malla de resolución 1 Km x 1Km, estos mapas hacen parte del proyecto European Soil Database v2 Raster Library del año 2006 y fueron desarrollados a partir de la aplicación de las funciones de pedotransferencia HYPRES. El proyecto HYPRES (HYdraulic PROPERTIES of European SOILS) compiló la información de 20 instituciones de 12 naciones distintas, así como también múltiples casos de estudio, con el fin de estandarizar las

características hidráulicas del suelo a partir de la aplicación de distintas funciones de pedotransferencia (Wosten, 2006). Debido a que los mapas proporcionan un rango para cada clasificación cualitativa y no un valor exacto, se reclasifico según criterios del GIMHA en la Tabla 18.

AWC_TOP (mm/m) Original ESDAC	AWC_TOP Reclasificación (mm/m)	ROO (cm) Original ESDAC	ROO (cm) Reclasificación (mm/m)
Baja (<100mm/m)	80	>80	200
Media (100-140 mm/m)	120	60-80	70
Alta (140-190 mm/m)	165	40-60	50
Muy Alta (>190 mm/m)	200	20-40	30

Tabla 18. Valores originales AWCTOP y ROO del ESDAC y Reclasificación según GIMHA.

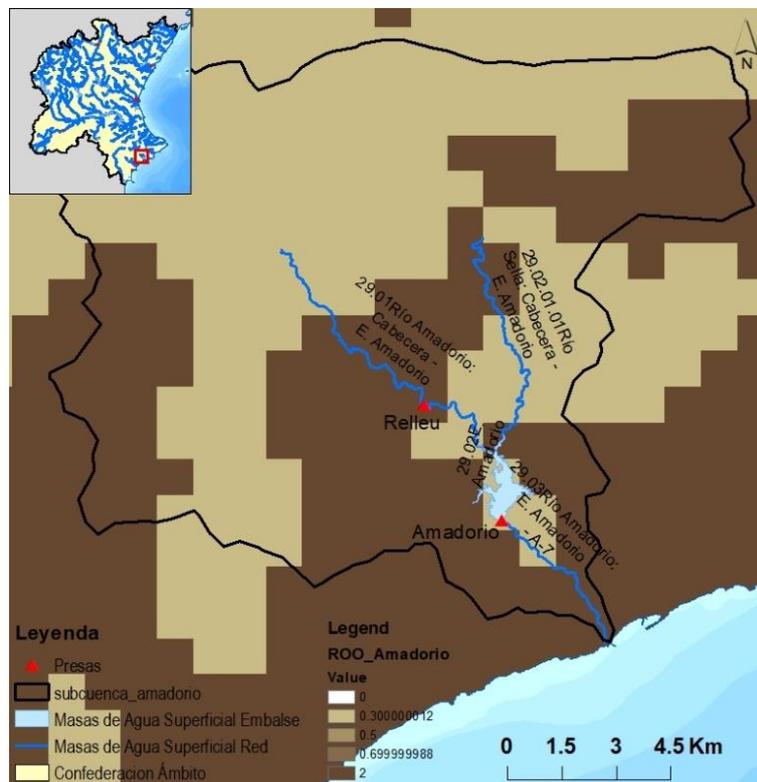


Figura 52. Profundidad de Obstáculos ROO Cuenca Amadorio

No se anexa figura del Mapa de AWCTOP para el Amadorio dado que para la totalidad de la cobertura del suelo el mapa lo clasifica como **Alta** y a partir de la reclasificación obtuvo un valor constante de 165 mm/m; por otra parte, se observa que en la Figura 52 los valores predominantes de ROO son 0.3 m y 2m.

e. Almacenamiento en Pendiente (mm)

Como último factor influyente en la determinación del mapa de almacenamiento estático Hu está el almacenamiento por pendiente o intercepción por charcos, que para pendientes superiores a 7.5% o 0.075 m/m es igual a cero, para las pendientes menores al umbral se aplica la Ecuación 5:

$$Alm. Pendiente (mm) = 10 - 1.3 * pendiente (m/m) \text{ para pendientes } < 0.075 m/m$$

Ecuación 5. Almacenamiento en pendiente para valores menores a 7.5%.

En la Figura 53 (b) se presenta el mapa definitivo de almacenamiento estático Hu que fue implementado en el modelo, los 5 mapas necesarios para su obtención no son incluidos directamente y son compilados en uno a partir de la Ecuación 4 enunciada al inicio de este apartado 5.8.

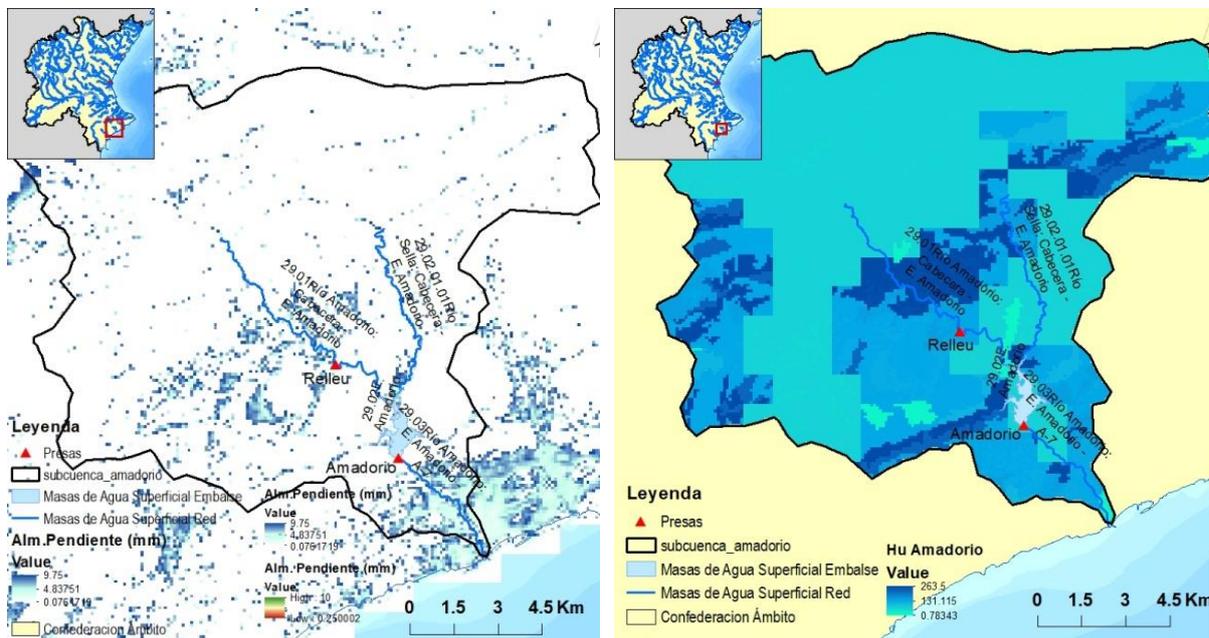


Figura 53 (a) Almacenamiento por Pendiente Amadorio y (b) Mapa Final de Almacenamiento Estático Hu Amadorio.

5.9 Capacidad de infiltración (mm/hr)

La capacidad de infiltración o conductividad hidráulica del suelo se proporciona al modelo TETIS en mm/hora; para su estimación se implementaron las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (2006), este método obtiene ciertas variables en el suelo tales como el contenido de humedad o la conductividad, a partir del análisis de otras características tales como: Textura del suelo, contenido de materia orgánica, contenido de grava, salinidad, grado de compactación, entre otras, estos valores fueron obtenidos de la base de datos de la European Soil Data Base (ESDB). El mapa de resultados de la Figura 54 fue empleado como mapa de capacidad de infiltración y como mapa de conductividad hidráulica del interflujo siendo cada uno afectado por su respectivo factor corrector del modelo.

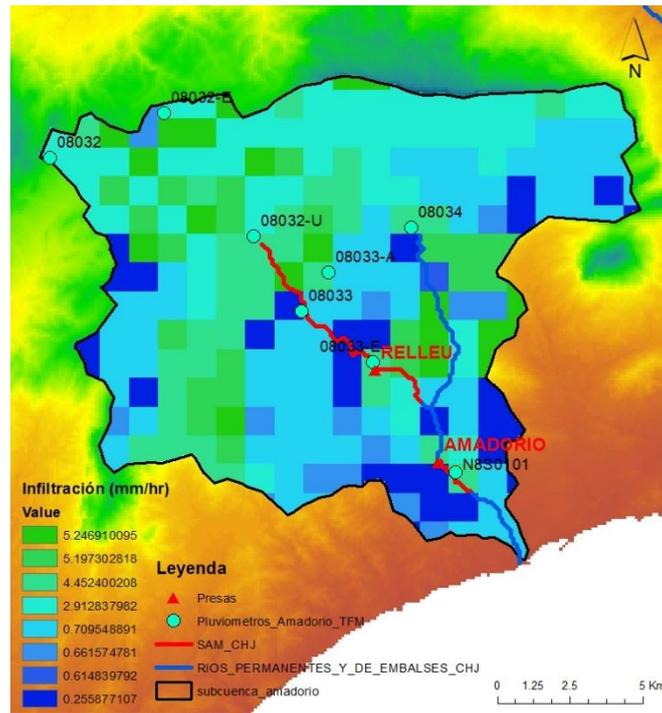


Figura 54. Mapa de capacidad de infiltración Ks y conductividad hidráulica del interflujo Kss en mm/hr.

5.10 Capacidad de percolación (mm/hr)

La capacidad de percolación fue estimada a partir del mapa de permeabilidad cualitativa del IGME y la litología presente en la zona, reasignando valores de conductividad hidráulica de acuerdo al tipo de formación descrito; en la Tabla 19, se muestra el grupo de permeabilidades que mejores presento en la investigación de Ronny Rios en el 2017 para el ámbito de la demarcación del Júcar.

Categoría	Permeabilidad (mm/hr)	Categoría	Permeabilidad (mm/hr)
C-MB	0.041666667	D-MA	4166.666667
C-B	0.416666667	M-MB	0.041666667
C-M	4.166666667	M-B	0.416666667
C-A	416.6666667	M-M	4.166666667
C-MA	41666.66667	Q-B	0.416666667
E-MB	0.041666667	Q-M	4.166666667
E-B	0.416666667	Q-A	416.6666667
E-M	4.166666667	Q-MA	41666.66667
D-MB	0.041666667	V-MB	0.041666667
D-B	0.416666667	V-B	0.416666667
D-M	4.166666667	I-MB	0.041666667
D-A	416.6666667	I-B	0.416666667

Tabla 19. Categorías y valores de permeabilidad asignados por Ronny Rios 2017.

Cabe aclarar, que las categorías corresponden a carbonatadas-**C**, detríticas del cuaternario-**Q**, detríticas-**D**, volcánicas-**V**, metadetríticas-**M**, ígneas-**I** y evaporíticas-**E** en las litologías; y muy alta-**MA**, alta-**A**, media-**M**, baja-**B** y muy baja-**MB** para las permeabilidades. La Figura 55 representa los valores de percolación en la cuenca aplicados al modelo de simulación.

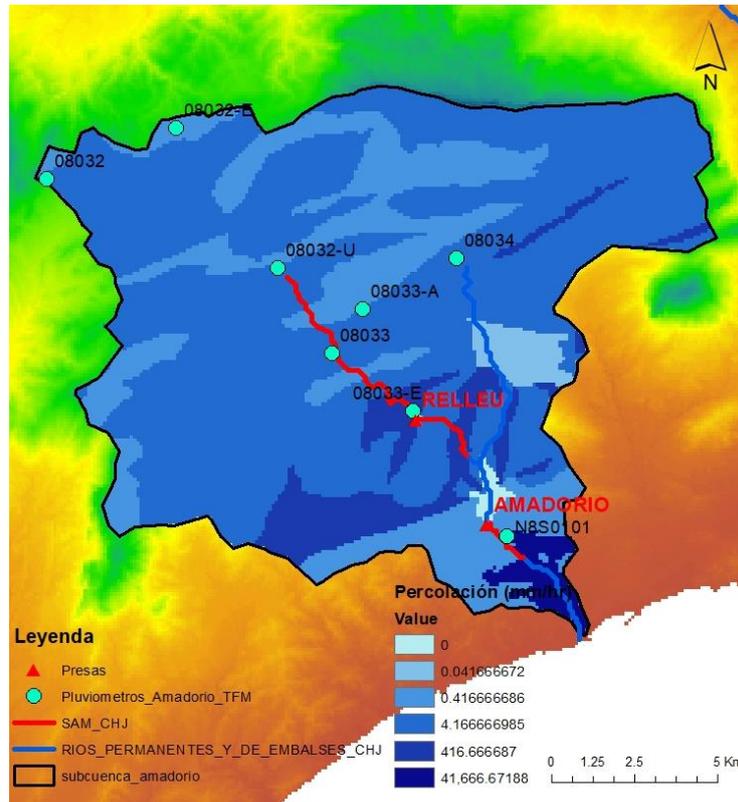


Figura 55. Mapa de capacidad de percolación K_p , conductividad hidráulica del acuífero K_{sa} y capacidad de pérdidas al acuífero profundo K_{pa} en mm/hr.

De forma similar a la capacidad de infiltración, el mapa de capacidad de percolación fue empleado adicionalmente como parámetro de la conductividad hidráulica del acuífero y de la capacidad de pérdidas al acuífero profundo; siendo afectado cada mapa de parámetros por su respectivo factor corrector.



CAPÍTULO 6.

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

“El agua juega un papel fundamental en nuestros sectores económicos, social y ambiental; ya sea en cantidad y/o calidad, por lo que es necesario asegurar nuestro futuro”- (Félix Francés, 2016).

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

6.1 Eventos de Calibración y Validación.

Se eligió como evento de calibración aquel periodo en el cual se tuviera mayor certeza y exactitud de la información registrada, este periodo se refiere a la época actual donde el punto de observación. E. Amadorio es el único que cuenta con registros. Para los periodos de validación se decidió analizar dos tipologías: (a) Validación temporal y (b) validación temporal-espacial. Para el caso (a) se tomó un periodo actual (año 2000 en adelante) y para el caso (b) un periodo de control en la década del 70 donde se encontró concordancia entre lo registrado por las estaciones de aforo y el punto de observación del E. Amadorio (E.A. Río Amadorio, EA. Sella y P.O. E. Amadorio), además, se consideró que en los puntos de observación de caudal no se tuvieran grandes vacíos de datos o faltantes en los inputs que imposibilitaran la comparación objetiva. En este periodo de validación de la década del 70 se realizó tanto validación temporal como espacial que nos permitió evaluar los cambios en la cuenca. Para estos fines se eligieron los eventos que se observan en la Tabla 20:

Eventos de Calibración y Validación.			
Calentamiento	Fecha	Evento	Fecha
Periodo de Calentamiento 1	01/01/2002-31/12/2005	Periodo de Calibración	01/01/2006-31/12/2008
Periodo de Calentamiento 2	01/01/1999-31/03/2000	Periodo de Validación Temporal	01/04/2000-31/12/2016
Periodo de Calentamiento 3	01/07/1968-30/06/1970	Periodo de Validación Temporal y Espacial	01/07/1970-30/06/1974

Tabla 20. Periodos de calentamiento para la calibración y validación del modelo.

Uno de los beneficios de aplicar modelos integrales que combinan el manejo de recursos y el análisis de crecidas, como es el caso de TETIS; es la ventaja de resolver la incertidumbre del estado inicial de humedad del suelo y demás almacenamientos en la cuenca, es por ello que adicional a los periodos de calibración y validación se requieren periodos de calentamiento del modelo que no se tomen en cuenta en el cálculo de los indicadores de eficiencia, pero que aumenten la robustez de las estimaciones y simulaciones. En la Figura 56 y Figura 57 se observan los periodos de calibración y validación temporal seleccionados con la serie de caudales observados en el embalse Amadorio; por otra parte, para la Figura 58 se incluyen las dos estaciones de aforo y el P.O. del embalse Amadorio para el periodo de validación espacial y temporal; adicionalmente se graficó en todos los casos en el eje superior la precipitación promedio en la cuenca para analizar el desfase ocurrido entre el inicio de la precipitación y el Hidrograma de crecida.

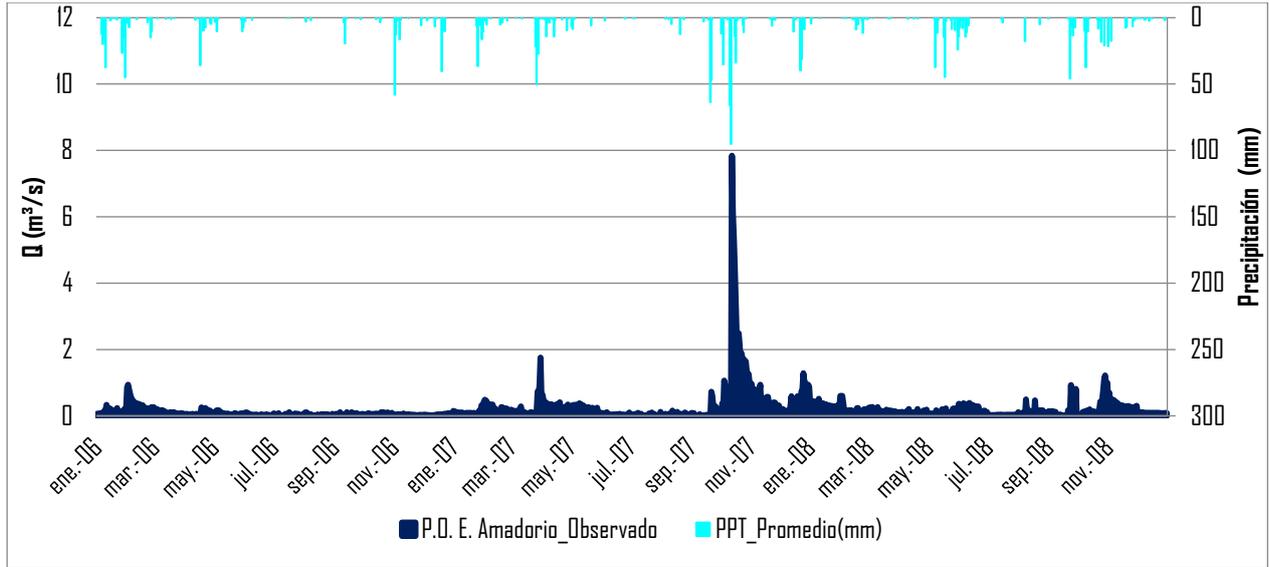


Figura 56. Periodo de Calibración 01/01/2006-31/12/2008.

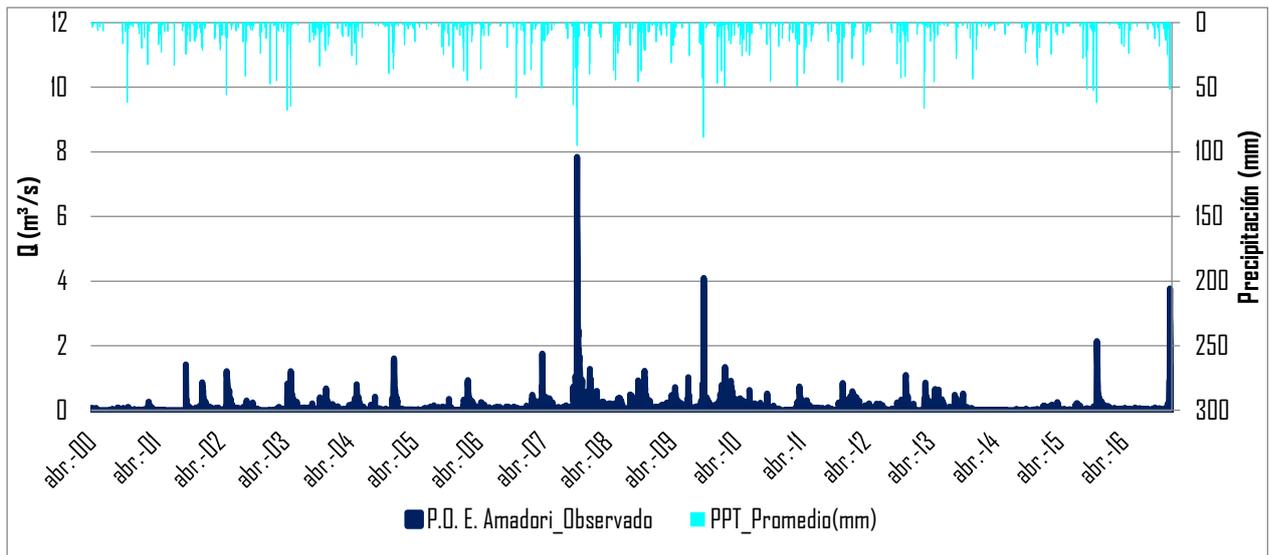


Figura 57. Periodo de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.

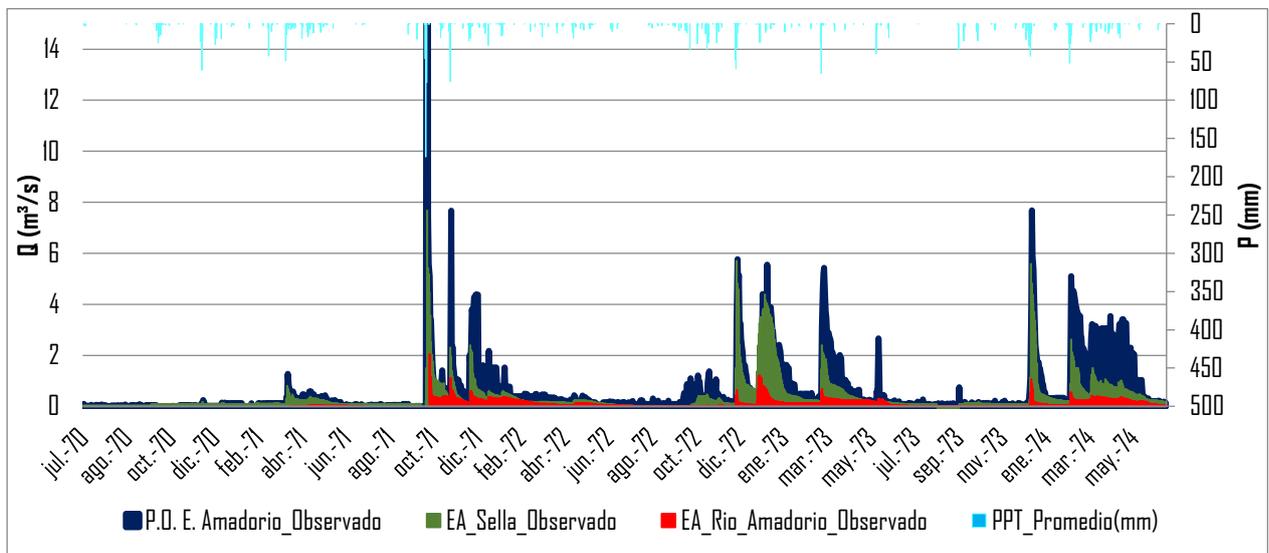


Figura 58. Periodo de Validación espacio-temporal 01/07/1970-30/06/1974.

6.2 Calibración del modelo.

La calibración de un modelo hidrológico consiste en la determinación y ajuste de ciertas constantes que influyen de manera directa en los flujos y almacenamientos de la cuenca; el modelo TETIS conceptualiza tales constantes en 9 factores correctores y un factor lluvia-altitud, que modifican los mapas de parámetros de forma lineal, de ahí nace el concepto de parámetro efectivo.

Los parámetros efectivos de un modelo se caracterizan porque deben ser estacionarios; además, tienden a ser distintos de la medición real de la característica que representan; esto se explica debido a que su objetivo no es la reproducción exacta de la realidad, sino funcionar como ajuste del modelo ante los distintos tipos de errores esperables en la simulación; estos tipos de errores se engloban en 4 características generales:

- Errores en la medición de inputs: tales como lluvia, temperatura, evapotranspiración.
- Efecto de escala espacial y temporal: en nuestro caso la escala espacial de 100 x 100 metros puede requerir un ajuste de los mapas de parámetros; adicionalmente, la escala temporal de 1 día influye de manera importante y por ello es necesaria la calibración de los factores.
- Conceptualización del modelo: el modelo al intentar reproducir una realidad tan compleja y heterogénea requiere ajuste en aquellos procesos que no contempla y afectan a los resultados finales de la simulación.
- Errores en la medición de outputs: tales como aforos y niveles de embalse.

Para esta etapa se partió por una calibración manual del modelo y comprobación de los flujos de salida del mismo; posteriormente se afinó dicha calibración a partir de la calibración automática con el algoritmo SCE-UA que incorpora TETIS y se obtuvieron los factores correctores de la Tabla 21 con su respectivo hidrograma de respuesta en la Figura 59:

FACTOR CORRECTOR	EMBALSE AMADORIO 8004
FC 1 Almacenamiento estático	2.27553
FC 2 Evaporación	0.44733
FC 3 Infiltración	3.33692
FC 4 Escorrentía directa	1.35054
FC 5 Percolación	1.10547
FC 6 Interflujo	52.2691
FC 7 Flujo subterráneo profundo	1000000
FC 8 Flujo base	0
FC 9 Velocidad del flujo base	0.00702
Factor de corrección de la lluvia con la altitud (β)	0.00116

Tabla 21. Factores Correctores Evento de Calibración Amadorio

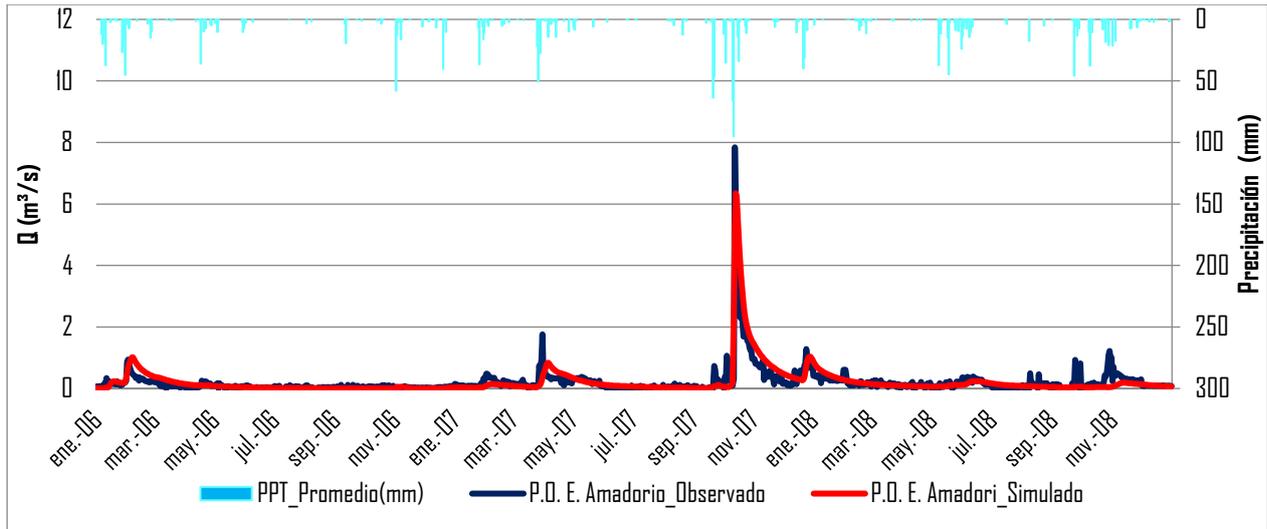


Figura 59. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio - Evento de Calibración 01/01/2006-31/12/2008.

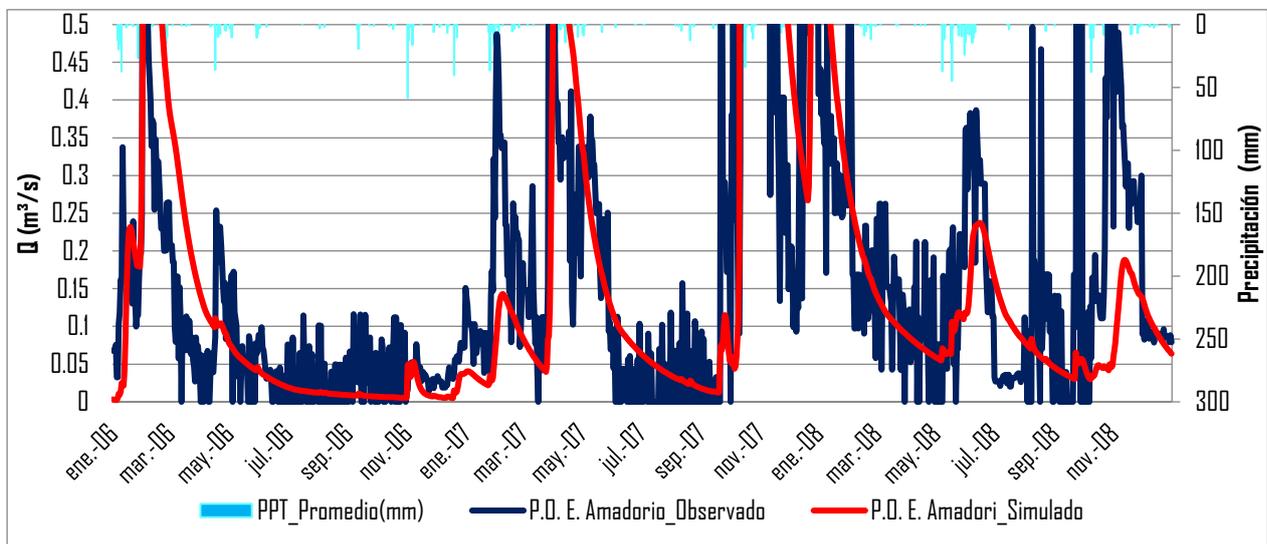


Figura 60. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio - Evento de Calibración 01/01/2006-31/12/2008 – Caudales inferiores a 0.5 m³/s.

A partir de estos factores correctores se obtuvo un índice de Nash de 0.7343 (Valor Objetivo = 1), un error cuadrático medio (RMSE) de 0.234 (Valor Objetivo = 0) y un desfase del tiempo al pico (t. pico) de 1 día; estos resultados se pueden evaluar como muy buenos teniendo en cuenta el nivel de incertidumbre que se presenta por la existencia de un embalse en desuso (Relleu) y un punto de observación de caudales obtenido a partir del balance en el embalse de Amadorio. Aunque el desfase en el t. pico puede parecer importante, no resulta decisivo considerando que se busca analizar la permanencia y flujo de caudal, un caso distinto sería el análisis de crecidas y riesgo de inundación donde la propagación puede llegar a tener mayor relevancia que la producción misma. En la Tabla 22 se presentan las principales características del evento e indicadores de eficiencia. Adicionalmente, en la Figura 60 se puede observar un buen comportamiento del modelo a los caudales bajos, lo cual es un factor clave en el análisis de ríos temporales.

CARACTERÍSTICAS DEL EVENTO DE CALIBRACIÓN			
Caudal max. Obs (m ³ /s)	7.842	Error tiempo al pico (dt)	1
Caudal max. Sim (m ³ /s)	6.347	Volumen observado (Hm ³)	19.272
RMSE	0.234	Volumen simulado (Hm ³)	20.2
Tiempo al pico observado	13/10/2007	Error en volumen (%)	4.815
Tiempo al pico simulado	14/10/2007	Índice de Nash y Sut. (NSE)	0.7341
Área Acumulada (Km ²)	203.58		

Tabla 22. Características generales Evento de Calibración Amadorio.

6.3 Validación Temporal del modelo.

El periodo de validación temporal como se mencionó con anterioridad va desde el 01/04/2000 al 31/12/2016; se decidió incluir el periodo de calibración dentro del periodo de validación temporal debido a que su influencia no es determinante en los resultados del modelo debido a la longitud de la simulación en la validación. Adicionalmente, los resultados para la mayor parte de la simulación muestran un comportamiento favorable en las estimaciones, como se puede observar en la Figura 61. Como índices de eficiencia se obtuvo un índice de Nash de 0.5449 y un RMSE de 0.183, que se consideran buenos. Se destaca dentro de los resultados obtenidos el comportamiento del modelo a los caudales bajos, además del ajuste de los caudales simulados y observados en términos de permanencia.

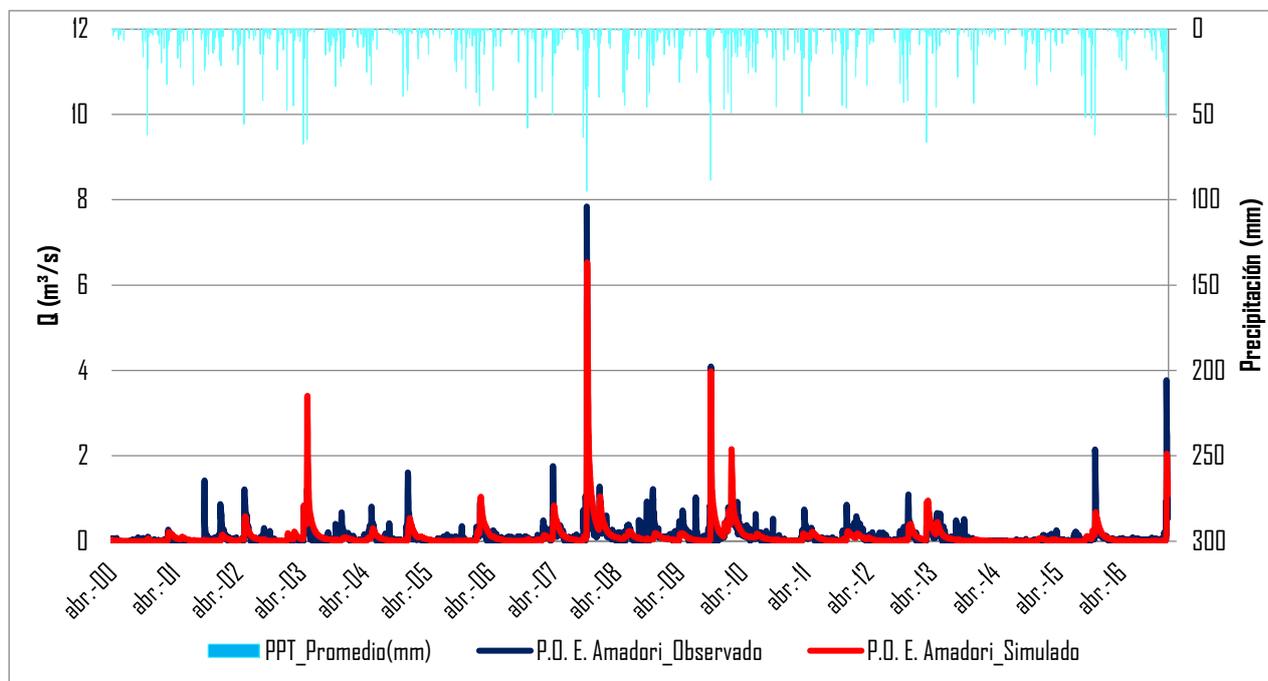


Figura 61. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio - Evento de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.

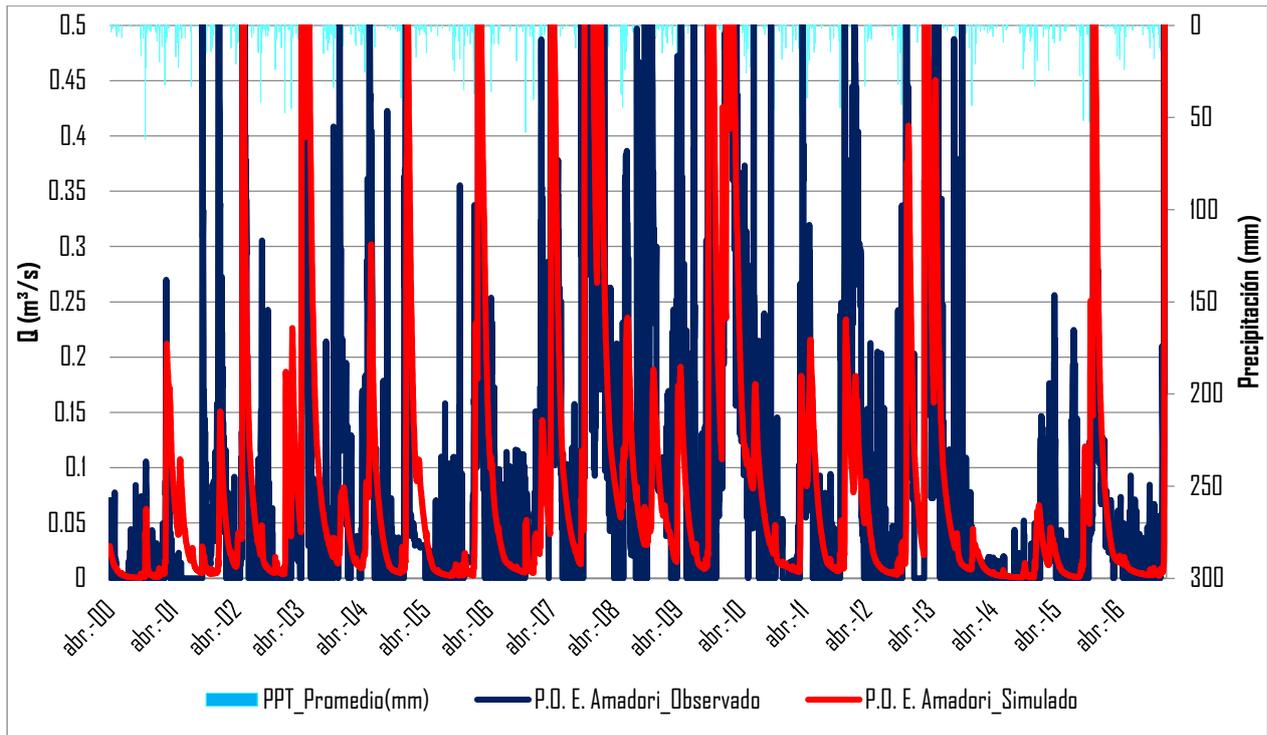


Figura 62. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorío-Evento de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016 – Caudales inferiores a 0.5 m³/s.

CARACTERÍSTICAS DEL EVENTO DE VALIDACIÓN TEMPORAL			
Caudal max. Obs (m ³ /s)	7.842	Error tiempo al pico (dt)	1
Caudal max. Sim (m ³ /s)	6.532	Volumen observado (Hm ³)	58.331
RMSE	0.183	Volumen simulado (Hm ³)	58.751
Tiempo al pico observado	13/10/2007	Error en volumen (%)	0.719
Tiempo al pico simulado	14/10/2007	Índice de Nash y Sut. (NSE)	0.5449
Área Acumulada (Km ²)	203.58		

Tabla 23 Características generales Evento de Validación Temporal Amadorio.

Uno de los análisis fundamentales en el estudio de la temporalidad de los ríos mediterráneos es la permanencia de caudal y el umbral de caudal nulo; debido al grado de sensibilidad que presenta el punto de observación de caudales en el embalse Amadorio, se ha fijado el umbral de caudal nulo en 0.01 m³/s o 10 Lt/s, los valores inferiores a este serán considerados como ausencia de caudal. Como se puede apreciar en la curva de permanencia de caudal de la Figura 63, la probabilidad de existencia de caudal para el umbral fijado se ajusta de manera muy aproximada encontrando un 66.8% para los caudales observados versus 70.7% para los caudales simulados por el modelo.

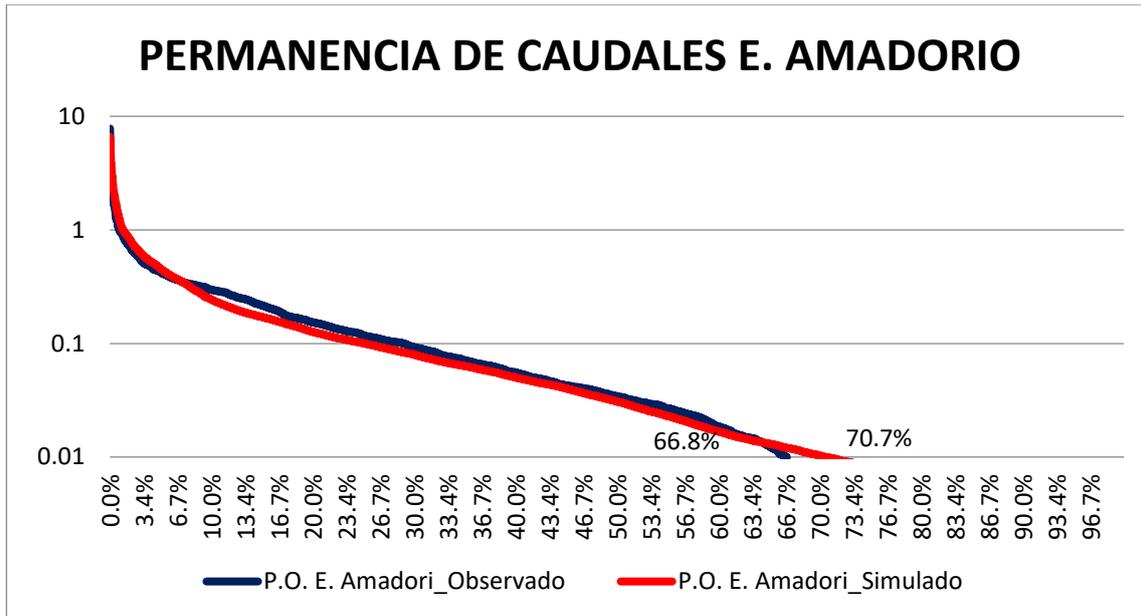


Figura 63. Curva de Permanencia de Caudal - Periodo de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.

Por último, es conveniente analizar el balance hídrico a escala de cuenca de la Figura 64; para este análisis se eligió el periodo de validación temporal debido a la fiabilidad en las mediciones de inputs y outputs, y a la bondad en el ajuste del modelo de simulación. Se observa que cerca del 73% de los recursos de la cuenca se quedan en los procesos de evapotranspiración de la vegetación, cerca de 3.7% sumando los flujos de escorrentía directa e interflujo resultan en las aportaciones superficiales netas de la cuenca que terminan en el embalse y un importante 21.4% corresponde al flujo subterráneo no conectado que finalmente se convierte en aportaciones desde el subsuelo a la columna de agua salada proveniente del mar y que mantiene el equilibrio de la cuña salina.

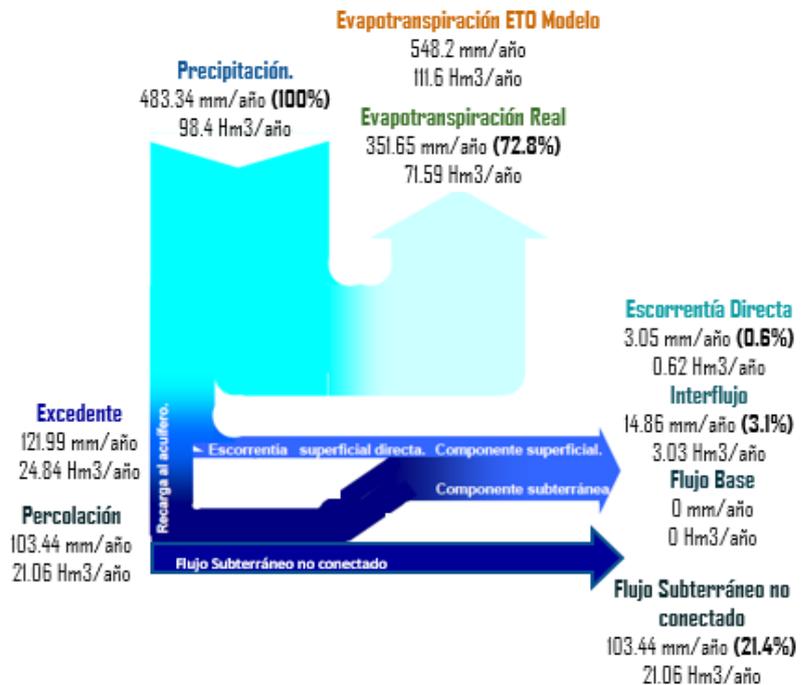


Figura 64 Balance hídrico cuenca Amadorio Periodo de Validación temporal 01/04/2000-31/12/2016.

6.4 Validación Temporal y Espacial del modelo (Periodo Década 70s).

La validación temporal del modelo en la década de los 70s es clave para la comprobación de la aplicabilidad del mismo; la validación espacial permite completar los datos de aforo para cada afluente al embalse del Amadorio de manera independiente (E.A. Río Amadorio y E.A. Sella) para los periodos en los cuales no se cuenta con registros, además de comprobar la estacionaridad del modelo y de sus factores correctores. No obstante, es pertinente realizar cambios además de los inputs de precipitación y evapotranspiración para el periodo en estudio; el cambio más importante es la capa de usos del suelo, que como se explicó en el apartado 5.6.1, permite obtener de manera aproximada los usos del suelo para los años 1956-57; además, con el objetivo de simplificar los escenarios se decidió aplicar la capa de cubierta del suelo 1956-57 a todo periodo de análisis antes del 01/01/1985, dentro del que se incluye este periodo de validación espacial y temporal. Los hidrogramas obtenidos son los observados en la Figura 65, Figura 66 y Figura 67:

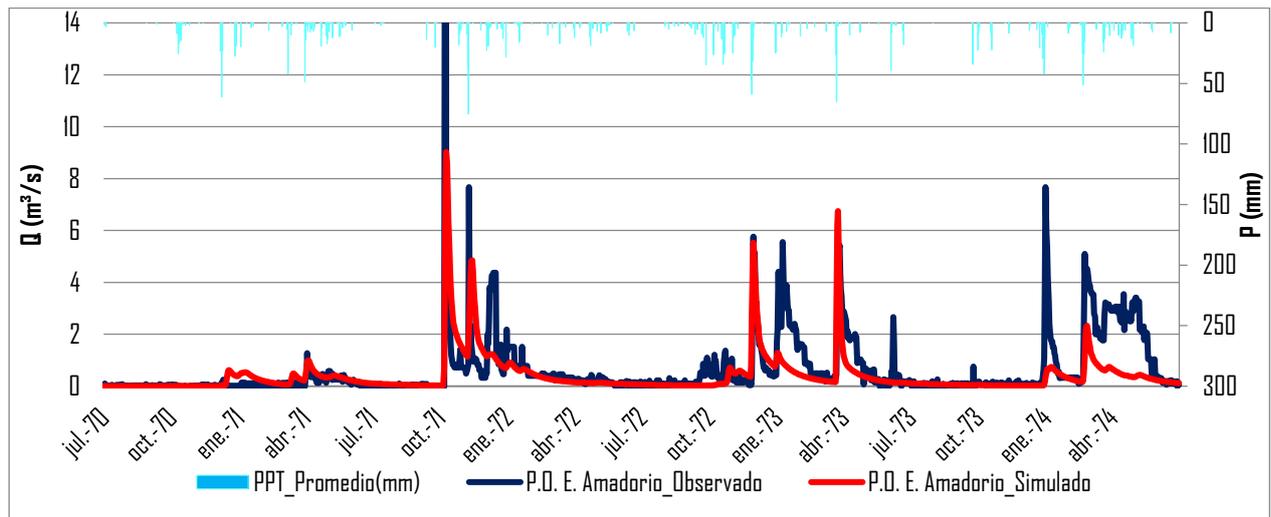


Figura 65. Hidrograma Punto de Observación E. Amadorio – Validación Temporal 01/07/1970-30/06/1974.

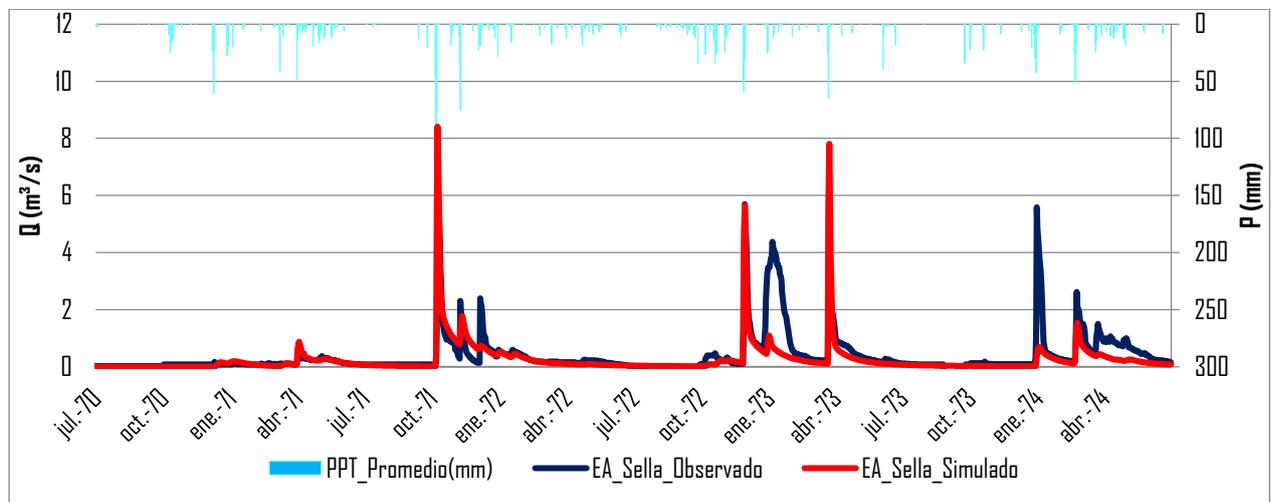


Figura 66. Hidrograma E.A. 8024 Sella – Validación Espacial y Temporal 01/07/1970-30/06/1974.

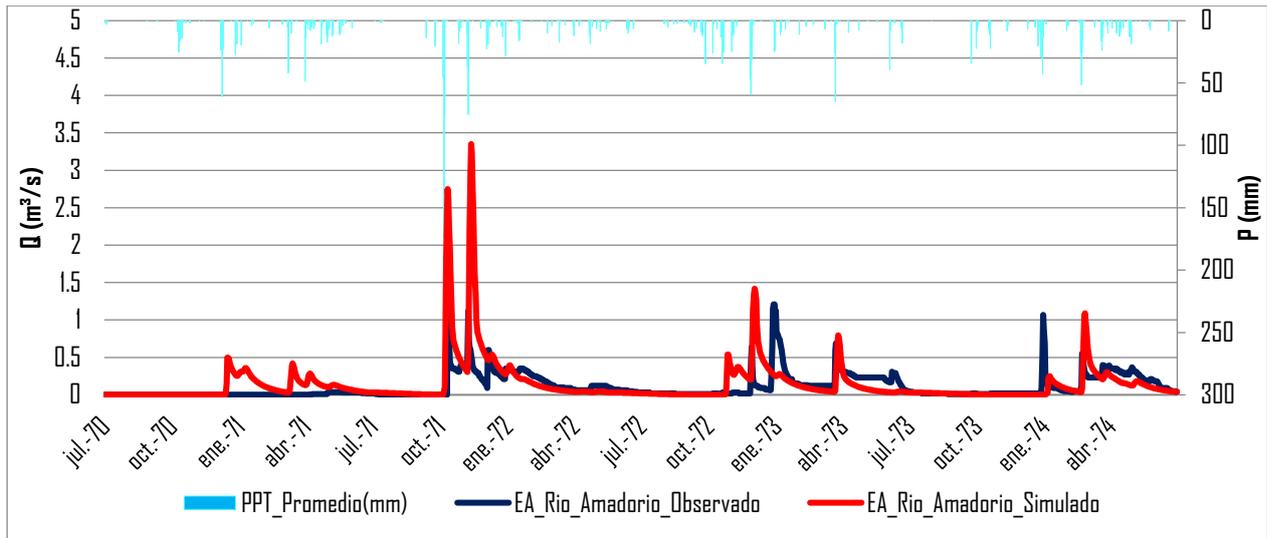


Figura 67. Hidrograma E.A. 8078 Río Amadorio – Validación Espacial y Temporal 01/07/1970-30/06/1974.

A modo de resumen se presenta la Tabla 24 que muestra los índices de Nash para cada periodo de calibración, validación temporal y validación temporal-espacial en la década de los 70s; se destaca de los resultados obtenidos que para periodos continuos como el de validación temporal el índice está por encima de los 0.5. En contraste, la validación temporal y espacial en la E.A. Río Amadorio con un valor de -1.5961 podría inducir a descartar los resultados del modelo para esta estación; no obstante, si se analiza con detalle el hidrograma se observa que el modelo reproduce acertadamente los episodios de lluvia pero en la mayoría de casos con mayor intensidad y en otros se presenta un desfase, esto se debe a la sensibilidad de los caudales circulantes en esta subcuenca de menor tamaño; sin embargo, cuando se revisa la permanencia de caudal en el cauce los valores observados y simulados tienen un comportamiento favorable.

Periodo en estudio / Índice de Nash por cada Punto de Observación de Caudal	E. Amadorio	E.A. Sella	E.A. Río Amadorio
Evento de Calibración 01/01/2006-31/12/2008	0.7343	Sin aforo	Sin aforo
Periodo Validación Temporal 01/04/2000-31/12/2016	0.5449	Sin aforo	Sin aforo
Periodo Validación Temporal-espacial Década 70s 01/07/1970-30/06/1974	0.2238	0.3891	-1.5961

Tabla 24 Resumen de Índices de Nash por eventos de calibración, Validación Temporal y Validación espacial y temporal Amadorio.

Como punto de referencia comparativo, se revisaron investigaciones anteriores en la zona de estudio y se encontró una mejora en comparación al análisis ejecutado por Ronny Rios Pacheco en su trabajo "Análisis de la implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS en el ámbito regional de la demarcación hidrográfica del Júcar utilizando información estándar" donde se obtuvo un índice de Nash de calibración máximo de 0.56 y una validación temporal similar con un valor de 0.31 (Pacheco, 2017).

Como se mencionó anteriormente, en la validación temporal y espacial se busca corroborar la modelación del régimen hidrológico y de los caudales bajos y nulos; para ello, se muestra en la Figura 68, Figura 69 y Figura 70 parte (a) las curvas de permanencia de caudal para los tres puntos de observación de caudales E. Amadorio, Sella y Río Amadorio y en la (b) los caudales bajos para el periodo de análisis:

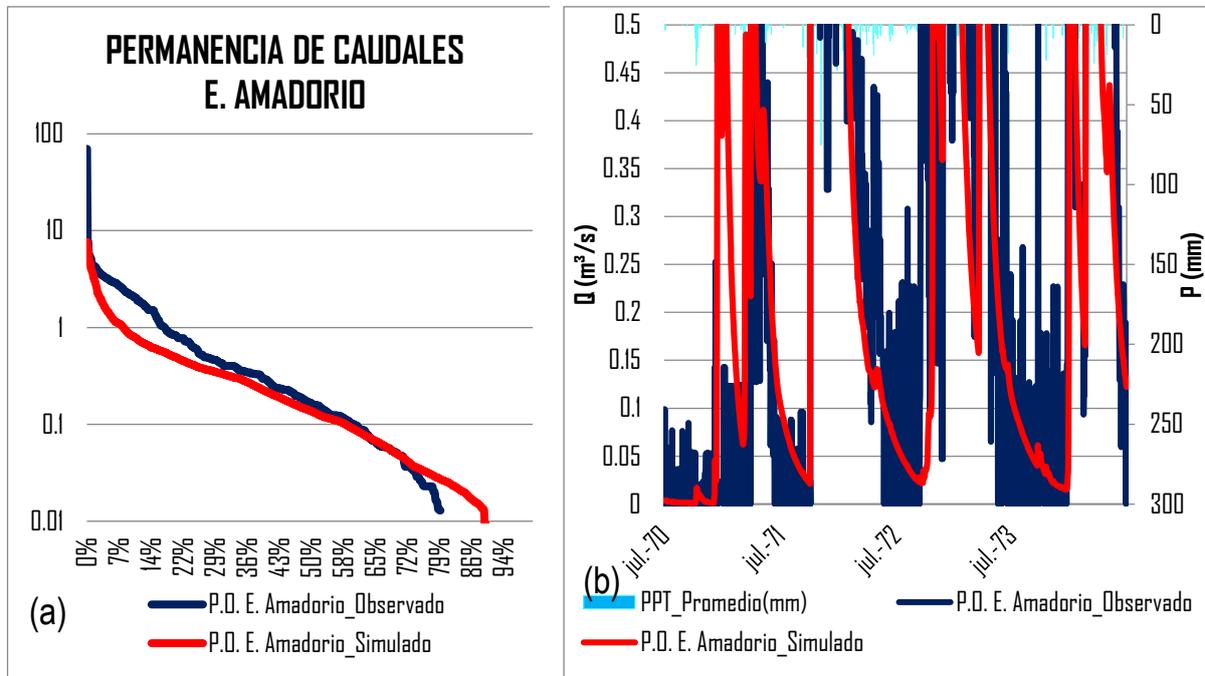


Figura 68 (a) Curva de Permanencia P.O. E. Amadorio, (b) Caudales Mínimos Observados P.O. E. Amadorio.

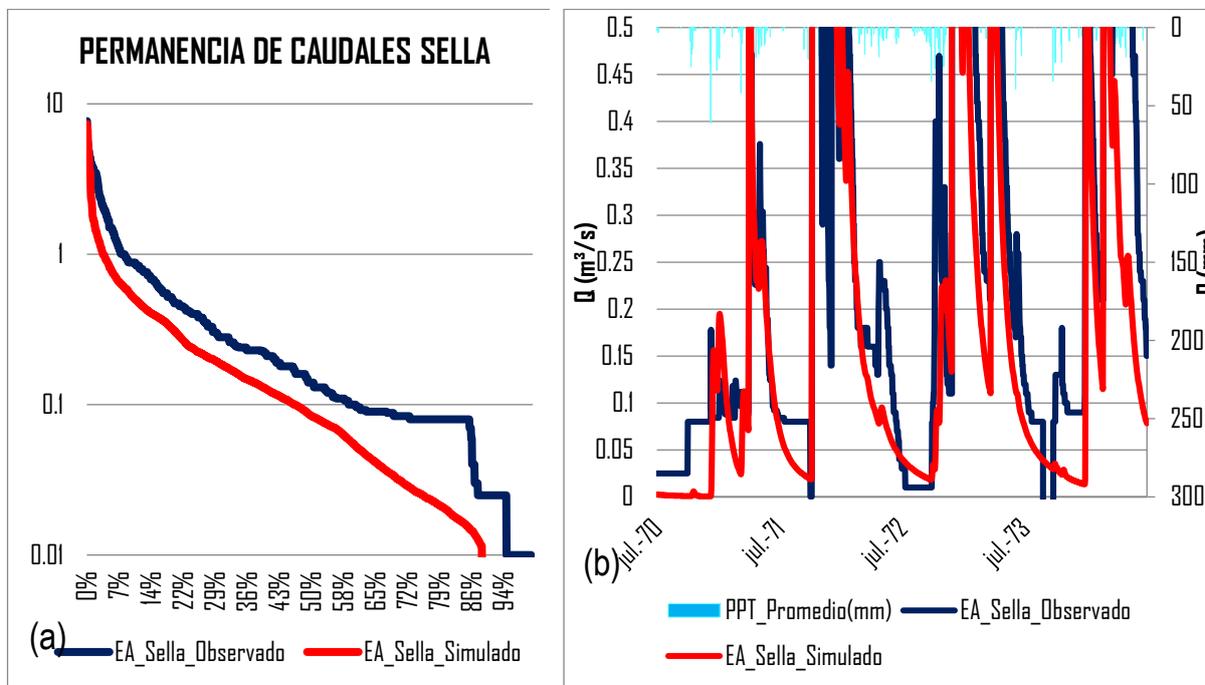


Figura 69 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Sella, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Sella.

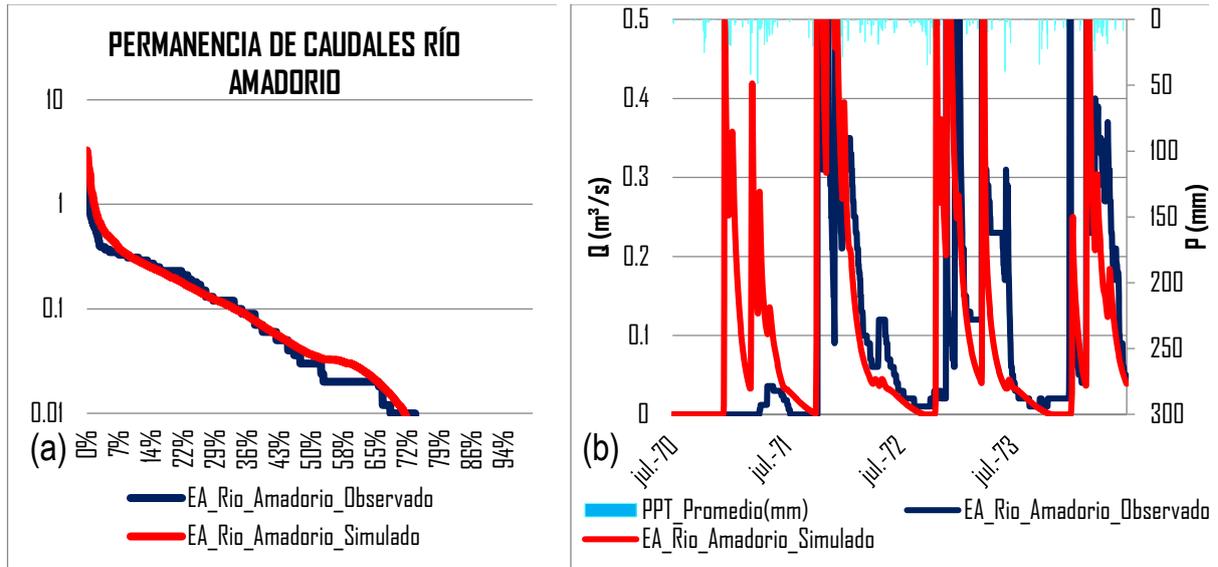


Figura 70 (a) Curva de Permanencia Q E.A. Río Amadorio 8078, (b) Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio 8078.

Las curvas de permanencia de caudal se ajustan muy bien a las series de caudales observados; esta comprobación resulta clave para la fiabilidad en la aplicación de la metodología de ríos temporales TRHES que permita la caracterización ecológica de estas masas.

Por último, para ver el ajuste del modelo en una escala anual de producción de recursos, se revisó las aportaciones medias anuales observadas en contraste con las simuladas y se obtuvo la Figura 71; aunque en ella se observa diferencias en los ajustes entre los años 70-80, se aprecia que el ajuste para periodos posteriores es muy bueno; adicionalmente se observa que las medias para los tres periodos analizados en lo observado y lo modelado se ajustan en todos los casos y ratifica la importante reducción de recursos en el periodo actual.

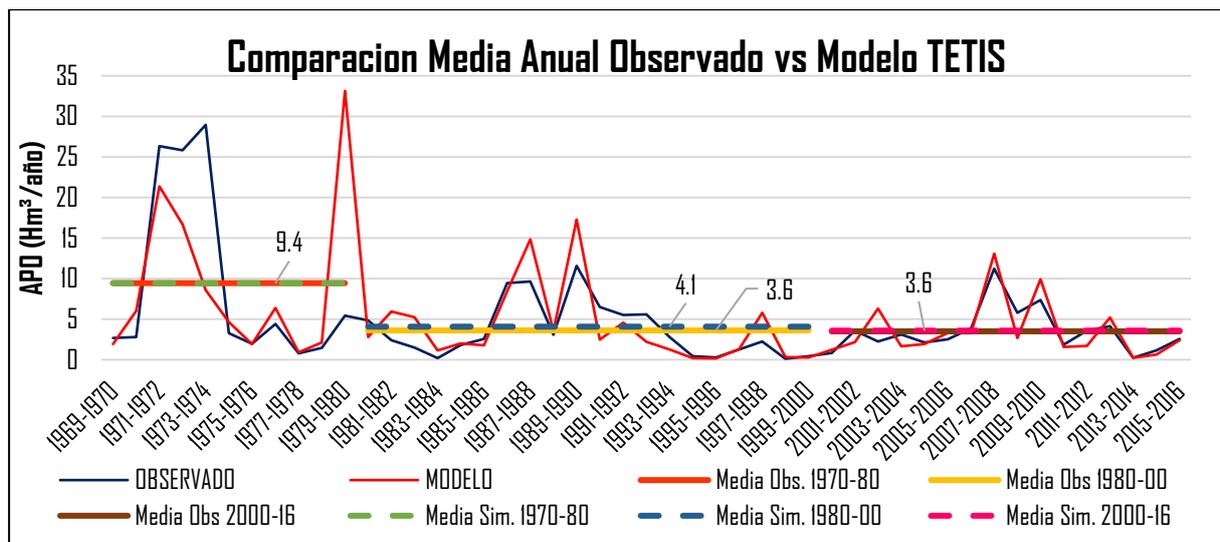


Figura 71 Aportaciones anuales E. Amadorio Observado vs Simulado – Comparación medias 1970/80, 1980/2000 y 2000/16.



CAPÍTULO 7.

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS INPUTS A MEDIANO PLAZO POR CONTRASTE ENTRE LA DECADA DEL 70 Y LA ACTUALIDAD

“A la hora de abordar el problema del agua es esencial entender, desde el primer momento, que no existe tal problema del agua en abstracto, y lo que en realidad existe no es sino la suma de muchos y muy diferentes problemas parciales, distintos, que a veces se entrecruzan, que divergen, problemas antiguos que desaparecen, problemas nuevos que emergen”- (Teodoro Estrela Monreal, 1999).

INFLUENCIA DE LOS INPUTS EN EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA E. AMADORIO POR CONTRASTE ENTRE LA DECADA DEL 70 Y EL PERIODO ACTUAL.

Una vez se cuenta con un modelo calibrado y validado entre el periodo 1970-2016, que reproduce la permanencia de caudal en el cauce, los eventos de crecida y el balance de recursos en la cuenca se pueden plantear distintas aplicaciones para intentar responder algunas de las interrogantes planteadas en el proyecto. La primera cuestión a resolver sería ¿Qué cambios ocurridos en la cuenca podrían haber llevado a la reducción en las aportaciones al embalse del Amadorio? Y para ello conviene analizar los distintos inputs por separado.

7.1 Inputs entre el periodo 1970-2016 con influencia en el régimen hidrológico del cauce.

- **Precipitación:** Como input fundamental en el ciclo del agua se ha analizado la media areal para la cuenca del embalse Amadorio reproducida a partir del modelo TETIS con su respectivo factor β , como resultado se obtuvo la Figura 72; en ella se aprecia una fuerte tendencia a la baja de las precipitaciones medias anuales, así como un incremento de los años secos y una reducción de los años húmedos. Si bien es cierto que esta grafica se ve fuertemente influida en su inicio por los años húmedos a principios de los 70s, es evidente que se ha producido una disminución de las lluvias en el periodo reciente en lo referente a la cuenca del Amadorio, tal y como lo muestra su media móvil para un periodo de 10 años cuyo valor en 1979 es de 563 mm/año y para el año 2016 se sitúa en 478 mm/año (un 15% menos aproximadamente).

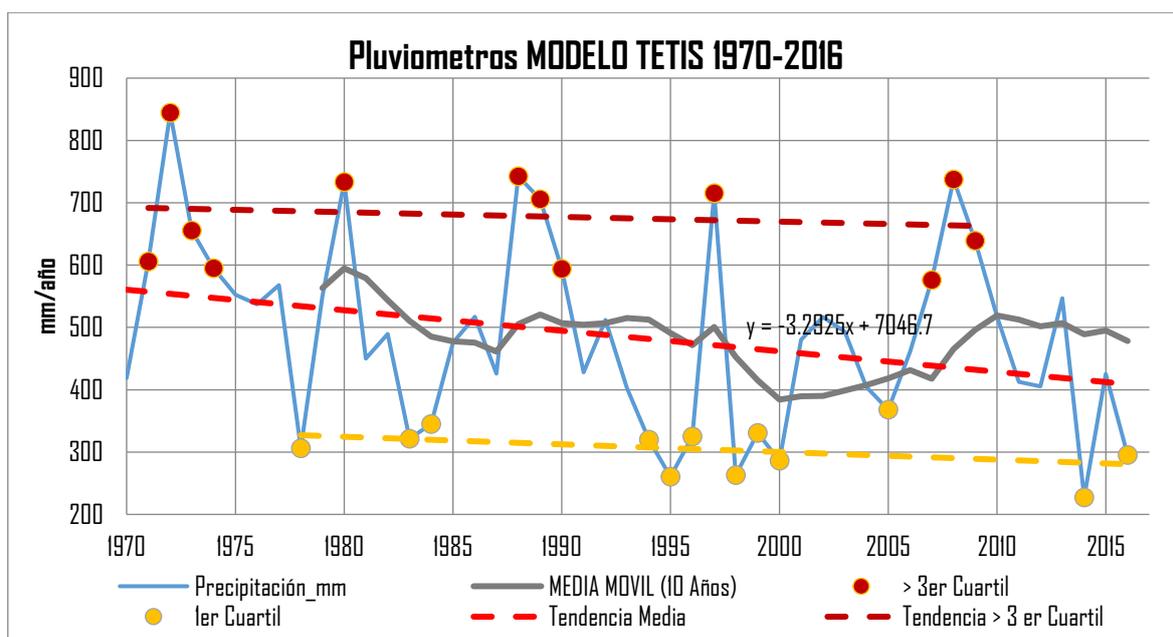


Figura 72. Precipitación media areal TETIS a escala anual – Periodo 1970-2016 - Tendencia, años secos y húmedos.

Para analizar estadísticamente las muestras se deben aplicar test que permitan su evaluación, estos tipos de pruebas se engloban en dos grandes grupos, paramétricas y no paramétricas; se diferencian fundamentalmente en que las pruebas paramétricas asumen distribuciones estadísticas subyacentes a los datos; por tanto, deben cumplirse algunas condiciones de validez, de modo que el resultado de la prueba paramétrica sea fiable. Por otra parte, las pruebas no paramétricas no deben ajustarse a ninguna distribución; en otras palabras, son válidas en un rango más amplio de situaciones (exigen menos condiciones de validez) y se consideran más robustas que las paramétricas.

A partir de las estimaciones, se optó por aplicar el test de tendencia de Mann-Kendall que está catalogado como una prueba no paramétrica; para el test se aplicaron las siguientes hipótesis:

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
Tau de Kendall	-0.213691027	valor-p (bilateral)	0.034926952
Se rechaza la hipótesis nula Ho y se acepta la hipótesis alternativa Ha.			

Tabla 25. Test de tendencia de Mann-Kendall Precipitación 1970-2016.

A partir de los valores obtenidos del test se concluye que la serie de precipitación presenta una tendencia a la disminución en la variable en estudio con un nivel de riesgo en el rechazo Ho por debajo del 3.5%.

Temperatura y Evapotranspiración de referencia (ETo): La evapotranspiración es el proceso a escala de cuenca que más agua requiere dentro del balance hídrico (72.8%); por ende, cualquier cambio por pequeño que parezca puede tener importantes repercusiones en los recursos disponibles en la cuenca. En este estudio, se implementó el método de Hargraves como método de cálculo de la ETo, éste implementa directamente la temperatura máxima, mínima y media para su aplicación; y por ello, con el fin de evaluar los cambios en la cuenca, se optó por analizar en primera medida la variación en la temperatura, contrastando la media anual de la serie 1970-2016 y aplicando el respectivo test de tendencia de Mann-Kendall.

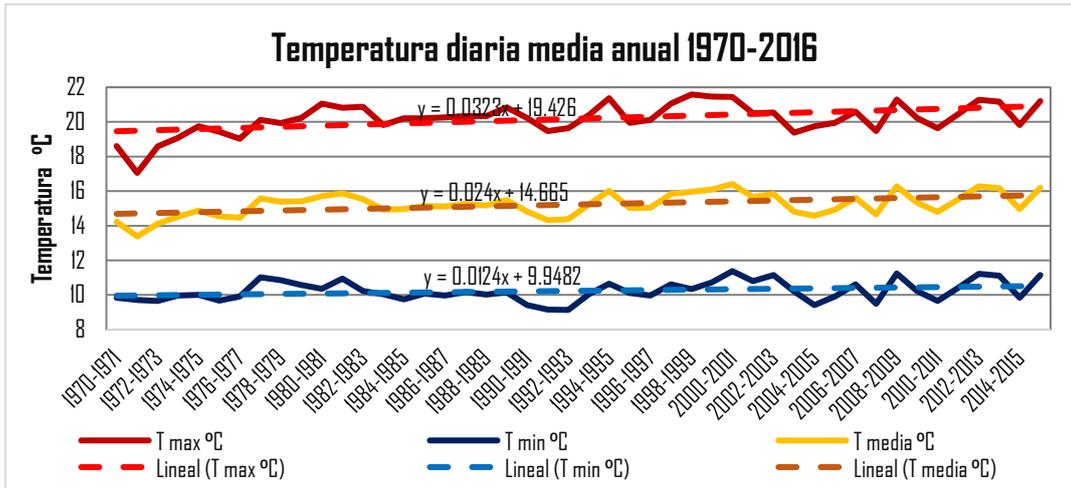


Figura 73 . Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media – Periodo 1970-2016

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
	Tau de Kendall	valor-p (bilateral)	Interpretación
Temperatura Max	0.2329	0.0231	Se rechaza la hipótesis nula Ho, y se acepta la hipótesis alternativa Ha.
Temperatura Min	0.1768	0.0849	No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.
Temperatura Media	0.2077	0.0427	Se rechaza la hipótesis nula Ho, y se acepta la hipótesis alternativa Ha.

Tabla 26 Test de tendencia de Mann-Kendall Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media 1970-2016.

En los resultados de los test de tendencia de Mann-Kendall se puede concluir que la serie presenta una tendencia creciente con un riesgo menor al 5%, exceptuando la serie de temperaturas mínimas; no obstante, su valor cercano al umbral de significancia sugiere también tendencia en la serie 1970-2016, pero con menor potencia estadística.

Adicionalmente, para evaluar la variación de la ETo se presentó en contraste los valores medios mensuales del periodo 1970/79 y 2000/16 en la Figura 74, en ella se aprecia un incremento de la ETo de aproximadamente un 10.33% en promedio para los años analizados; cabe aclarar que, aunque el aumento es notable, se están comparando distintos ciclos que pueden coincidir con periodos secos y húmedos, a partir de esto concluimos que la variación se ve afectada directamente por los periodos estudiados; por ejemplo, si se compara la ETo de 1970/89 con la de 1989/2016 se encontrara una fluctuación de 5.88%, un valor inferior al 10.33% del periodo 1970/79 y 2000/16.

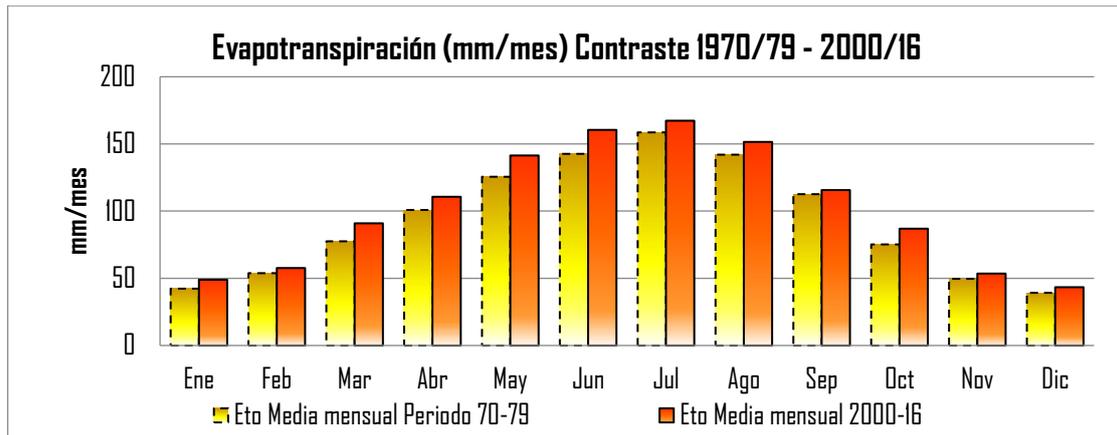


Figura 74 Comparación ETo media mensual para los periodos 1970/79 vs 2000/16.

La serie de evapotranspiración obtenida a partir de los datos de temperatura de Spain02 v2 a diferencia de la serie de precipitación cuenta con un registro más amplio, lo que permite el análisis de la serie desde 1950; no obstante, para efectos del análisis a mediano plazo se analizó la serie de media anual 1970-2016 de la Figura 75.

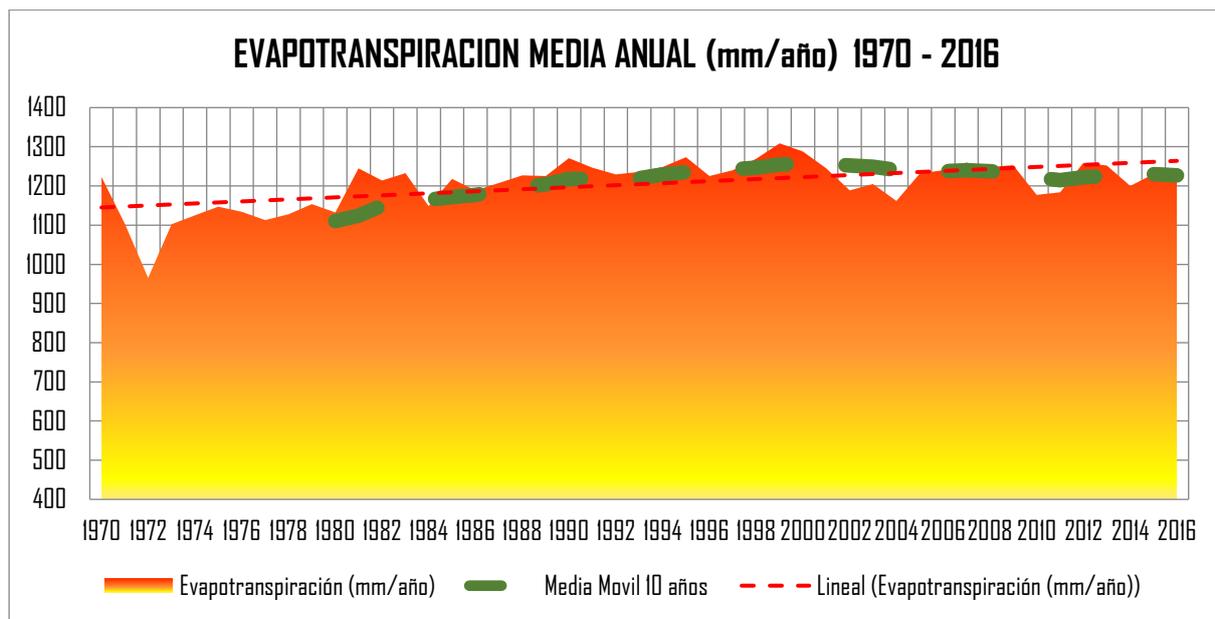


Figura 75 Serie 1951 – 2016 Evapotranspiración media areal cuenca del embalse Amadorio.

Adicionalmente, al igual que en el análisis de la precipitación, se optó por aplicar el test de Mann-Kendall para determinar si existe una tendencia significativa en la serie media anual de la evapotranspiración. Se plantearon las siguientes hipótesis y se obtuvieron los resultados de la Tabla 27.

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
Tau de Kendall	0.3950	valor-p (bilateral)	< 0.0001
Se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_a .			

Tabla 27 Test de tendencia de Mann-Kendall Evapotranspiración 1951-2016.

Se aprecia una clara tendencia positiva que indica un aumento de la ET_o , por esta razón en el siguiente apartado se plantea la influencia de un posible aumento de la variable para los periodos de análisis con el fin de evaluar su incidencia en el balance hídrico de la cuenca.

- **Cubierta vegetal y usos del suelo:** Como se ha mencionado anteriormente en el apartado 5.6.1 se han evidenciado importantes cambios en la cubierta vegetal de la cuenca, en mayor medida se aprecia un aumento del bosque de coníferas en la zona alta (+9%), esto a priori, desencadenaría en una mayor intercepción de la vegetación y un mayor flujo de salida por evapotranspiración; por otra parte, también se ha visto una reducción en la superficie agrícola, atribuible a la tecnificación en el riego o al aumento de la productividad por hectárea cultivada. Sin embargo, solo a través de un contraste de ambos escenarios (Cubierta del suelo actual vs cubierta del suelo 56/57) se puede analizar la importancia de los mismos.
- **Bombeos con fines agrícolas o urbanos:** se ha estimado a partir del SIGPAC y el censo agrario la superficie regada en la cuenca, que contrastándola con los permisos de aprovechamientos y captaciones expedidos por la comisaría de aguas de la CHJ presenta un balance de $0.48 \text{ Hm}^3/\text{año}$ de demanda agrícola para el tramo del río Amadorio aguas arriba del embalse y de $0.35 \text{ Hm}^3/\text{año}$ para el tramo del Sella. Por otra parte, para la demanda urbana se obtuvo una necesidad estimada de $0.27 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y $0.08 \text{ Hm}^3/\text{año}$ para el Amadorio y Sella respectivamente.

Adicionalmente, en los registros hidrométricos del cauce se observó una desconexión con el acuífero, hipótesis que fue corroborada en la calibración del modelo donde las aportaciones son provenientes en su mayoría de la escorrentía superficial e interflujo, con una contribución nula por parte del flujo base. Para poder analizar las causas de tal aparente desconexión registrada en los aforos de la estación Río Amadorio, es necesaria la modelación del tanque del acuífero en un periodo más extendido; por esta razón, esta variable se analizará de forma independiente para un periodo mayor de estudio y por ende el planteamiento de escenarios a mediano plazo no tendrá en cuenta en principio las afectaciones por bombeos en las masas subterráneas.

7.2 Planteamiento de escenarios Mediano Plazo.

Los escenarios que se abordaran con el modelo buscaran analizar la influencia de los distintos factores de una forma univariada; esto se refiere a que se cambiara una a una las variables para un mismo periodo de control y se comparara con el escenario base; se ha elegido como escenario de partida el evento de validación temporal 01/04/2000 – 31/12/2016 en el P.O. Embalse Amadorio, con la meteorología de este periodo y los usos del suelo de CORINE 2006 que representan los usos actuales en la cuenca; los escenarios a contrastar son los siguientes:

- **Escenario 1 Cambios en los usos del suelo:** Escenario Base con el mapa de regresión de usos del suelo 1956 y modificando el mapa de almacenamiento estático Hu para tales usos.
- **Escenario 2 Aumento en la ETo en la actualidad:** Escenario Base con una reducción de la ETo del 10.33% y del 5.88% para evaluar la incidencia del aumento en el periodo actual.
- **Escenario 3 Reducción en la precipitación en la actualidad:** Escenario Base con un aumento de 15% en la precipitación que busca representar el régimen de lluvias de 1970 y el efecto de la reducción en el periodo actual.

7.2.1 Escenario 1 Efecto de la variación en la cubierta vegetal y usos del suelo.

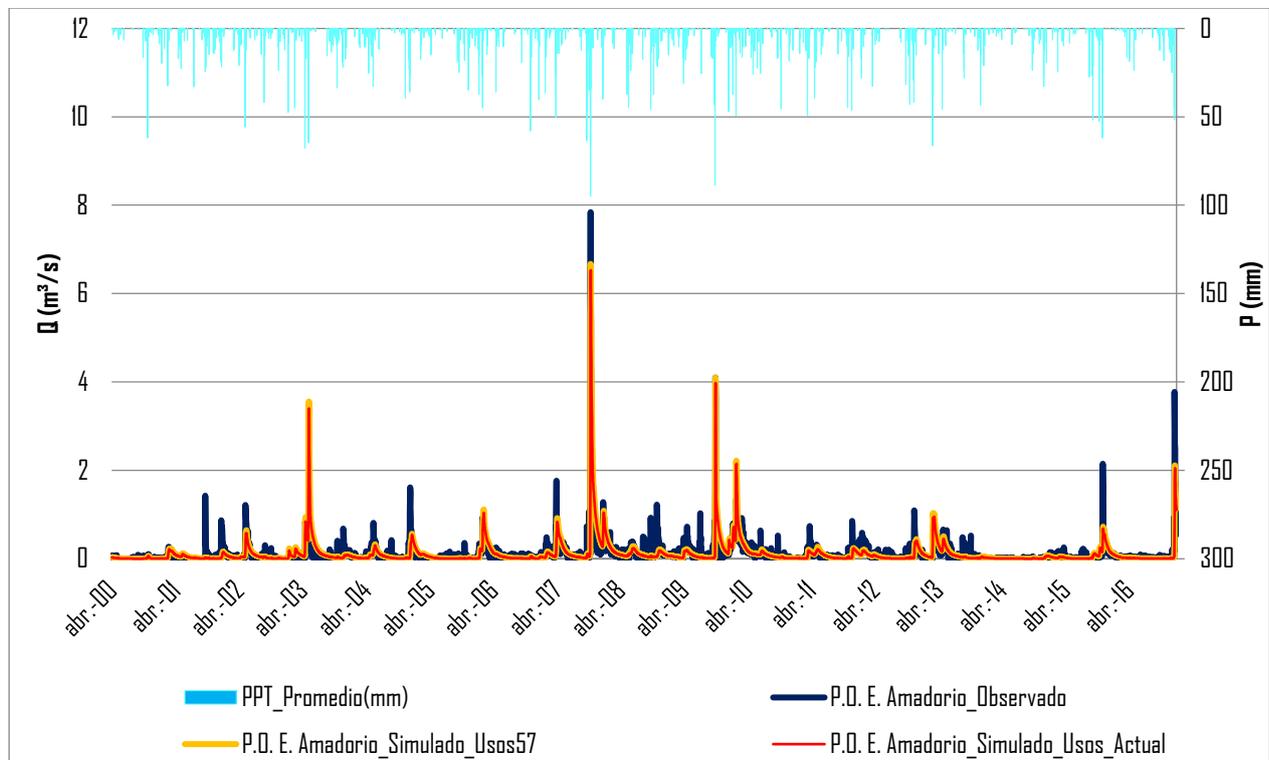


Figura 76 Contraste Caudales Simulados Usos 57 y Usos Actuales – Periodo de Validación 01/04/2000 – 31/12/2016.

Escenario I Usos del suelo del 57		Escenario Base		Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	6.672	Caudal max. Sim. (m ³ /s)	6.532	-2.1%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	3.793	Volumen simulado (Hm ³ /año)	3.505	-7.6%
Precipitación (mm/año)	483.327	Precipitación (mm/año)	483.327	0.0%
Evapotranspiración desde Intercepción (mm/año)	84.037	Evapotranspiración desde Intercepción (mm/año)	91.647	9.1%
Excedente (mm/año)	126.312	Excedente (mm/año)	122.513	-3.0%
Escorrentía (mm/año)	3.087	Escorrentía (mm/año)	3.059	-0.9%
Interflujo (mm/año)	15.810	Interflujo (mm/año)	14.910	-5.7%
Recarga subterránea (mm/año)	106.784	Recarga subterránea (mm/año)	103.923	-2.7%

Tabla 28 Variaciones más importantes en el cambio de usos del suelo 1957 vs 2006.

Como se aprecia en la Tabla 28, la reforestación del 9% y abandono de tierras agrícolas en un 5% ha contribuido a una reducción de caudales de avenidas (Qp) en un 2.1% y en mayor medida a la producción de recursos en un 7.6%; esta reducción puede atribuirse a una mayor evapotranspiración desde la intercepción y a un contenido de humedad en el suelo menor por la mayor evapotranspiración de este tipo de vegetación. No obstante, este proceso no es determinante si se compara con la reducción en las aportaciones registradas en el embalse Amadorio.

7.2.2 Escenario 2 Efecto variación en la evapotranspiración de referencia ETo:

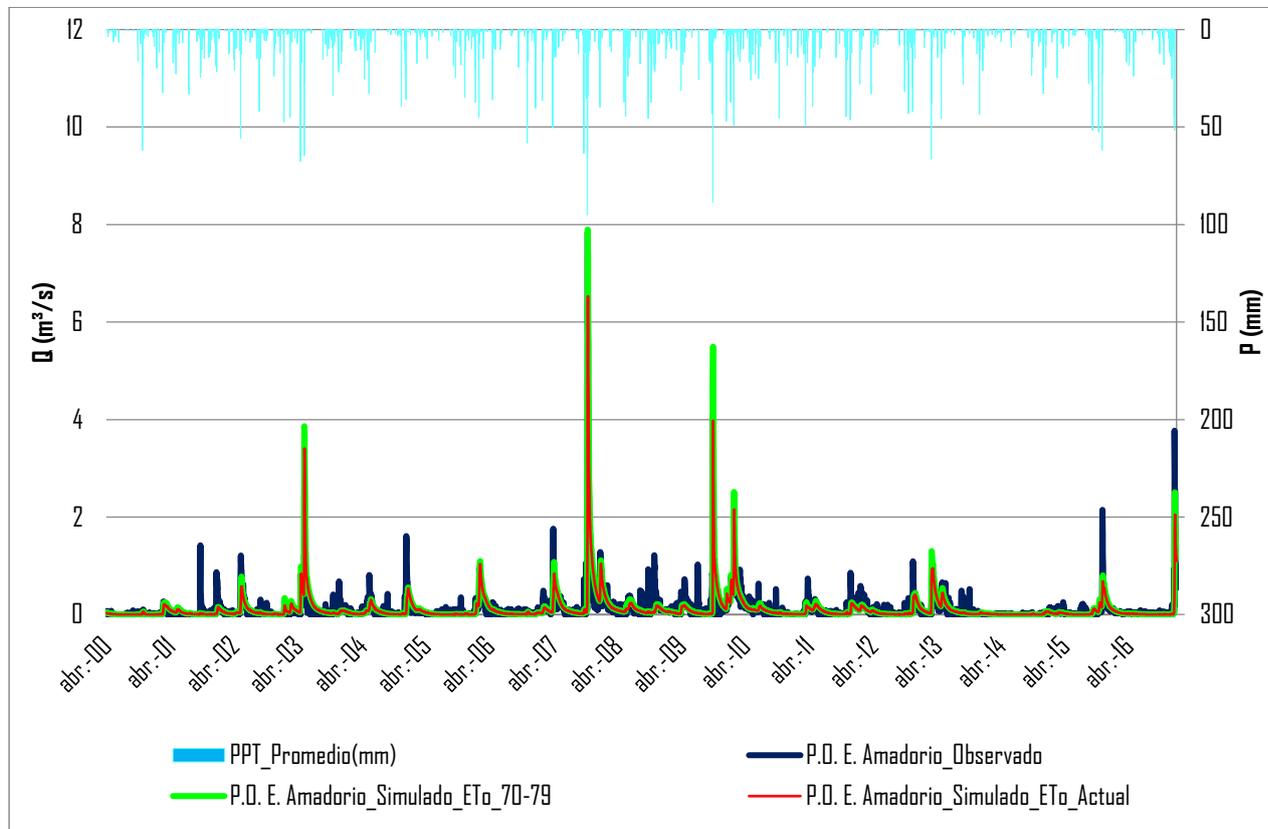


Figura 77 Contraste Caudales Simulados ETo (+10.33%)– Periodo de Validación 01/04/2000 – 31/12/2016.

Escenario 2 ETo con (- 10.33% ETo)		Escenario Base		Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	7.894	Caudal max. Sim. (m ³ /s)	6.532	-17.3%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	3.930	Volumen simulado (Hm ³ /año)	3.505	-10.8%
Precipitación (mm/año)	483.327	Precipitación (mm/año)	483.327	0.0%
Evapotranspiración (mm/año)	254.807	Evapotranspiración (mm/año)	265.376	4.1%
Excedente (mm/año)	133.256	Excedente (mm/año)	122.513	-8.1%
Escorrentía (mm/año)	3.552	Escorrentía (mm/año)	3.059	-13.9%
Interflujo (mm/año)	16.052	Interflujo (mm/año)	14.910	-7.1%
Recarga subterránea (mm/año)	113.011	Recarga subterránea (mm/año)	103.923	-8.0%

Tabla 29. Variaciones más importantes en los escenarios ETo 70/79 vs ETo Actual.

Dentro de las variaciones más importantes se destaca que, aunque la ETo aumento en un 10.33% en promedio, la evapotranspiración real aumento solo en un 4.1%; sin embargo, tal aumento se ve traducido en una reducción de los recursos disponibles en cerca del 10.8% y de los caudales pico en un 17.3% debido a la menor humedad antecedente en el suelo antes de los fenómenos de lluvia. Como se había mencionado anteriormente, este contraste depende en gran medida de los periodos comparados; con el fin de estimar un rango de variabilidad, se aplicó también al modelo la fluctuación de la ETo de 5.88% registrada para los periodos 1970/89 vs 1989/2016, obteniendo los siguientes valores:

Escenario 2 ETo con (- 5.88% ETo)		Escenario Base		Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	7.394	Caudal max. Sim. (m ³ /s)	6.532	-11.7%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	3.693	Volumen simulado (Hm ³ /año)	3.505	-5.1%
Precipitación (mm/año)	483.327	Precipitación (mm/año)	483.327	0.0%
Evapotranspiración (mm/año)	260.350	Evapotranspiración (mm/año)	265.376	1.9%
Excedente (mm/año)	126.798	Excedente (mm/año)	122.513	-3.4%
Escorrentía (mm/año)	3.301	Escorrentía (mm/año)	3.059	-7.3%
Interflujo (mm/año)	15.362	Interflujo (mm/año)	14.910	-2.9%
Recarga subterránea (mm/año)	107.512	Recarga subterránea (mm/año)	103.923	-3.3%

Tabla 30 Variaciones más importantes en los escenarios ETo 70/89 vs ETo Actual.

De los valores registrados se destaca la reducción en las aportaciones del 5.1%, valor por debajo del 10.8% registrado con la ETo 70/79; esto en consecuencia al aumento en la evapotranspiración real del 1.9% inferior al 4.1% del escenario con la ETo 70/79.

7.2.3 Escenario 3 Efecto de la variación en la precipitación.

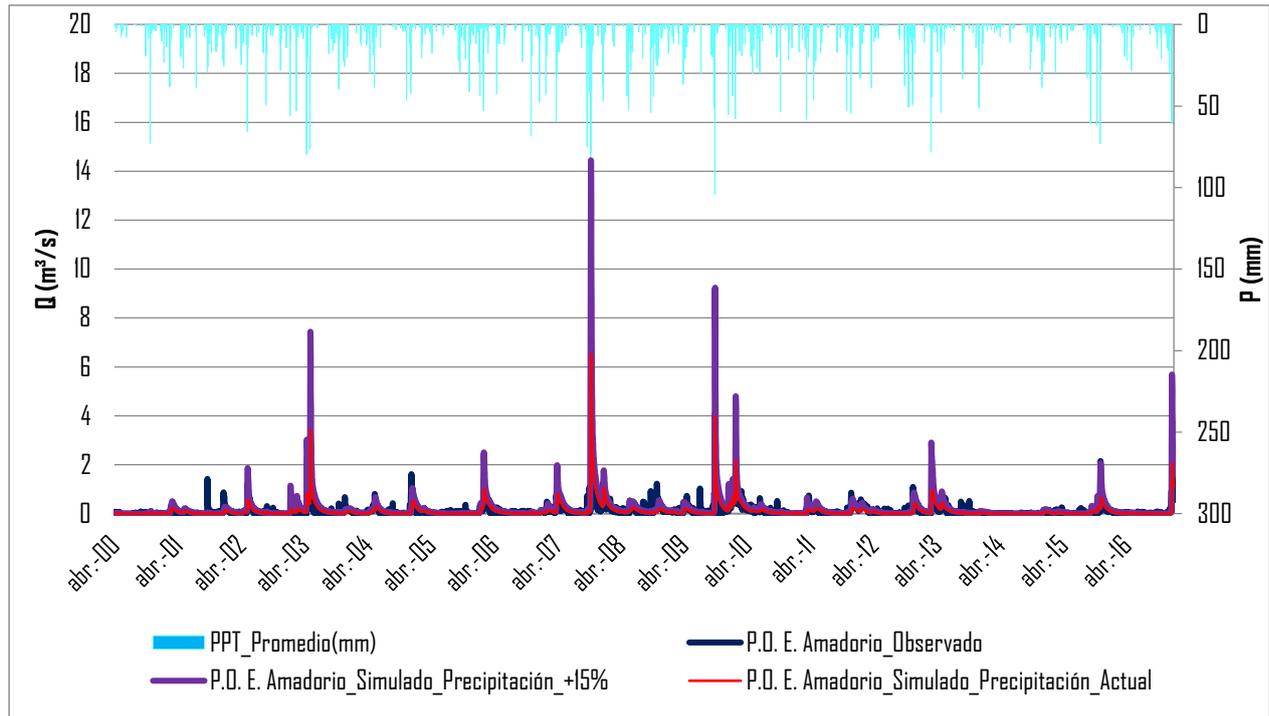


Figura 78 Contraste Escenario Precipitación +15%– Periodo de Validación 01/04/2000 – 31/12/2016.

Escenario 3 Precipitación (+ 15%)		Escenario Base		Variación %
Caudal max. Sim. (m³/s)	14.45	Caudal max. Sim. (m³/s)	6.53	-54.8%
Volumen simulado (Hm³/año)	6.67	Volumen simulado (Hm³/año)	3.50	-47.4%
Precipitación (mm/año)	483.33	Precipitación (mm/año)	483.33	0.0%
Evapotranspiración (mm/año)	280.86	Evapotranspiración (mm/año)	265.38	-5.5%
Excedente (mm/año)	188.20	Excedente (mm/año)	122.51	-34.9%
Escorrentía (mm/año)	6.71	Escorrentía (mm/año)	3.06	-54.4%
Interflujo (mm/año)	24.55	Interflujo (mm/año)	14.91	-39.3%
Recarga subterránea (mm/año)	155.98	Recarga subterránea (mm/año)	103.92	-33.4%

Tabla 31 Variaciones más importantes en los escenarios Precipitación Actual + 15% vs Actual neta.

Se buscó al igual que en las comparaciones anteriores contrastar una de las variables versus el periodo de control actual; en este caso, el incremento en 15% en la precipitación actual que representa la climatología de 1970/79, produjo un cambio significativo en los flujos principales en la cuenca; dentro de los cambios más llamativos se resalta que a raíz de la reducción actual de las lluvias la producción en la cuenca ha disminuido en un 47.4%, la magnitud de los caudales pico un 54.8% y debido a la menor disponibilidad de recursos la evapotranspiración también ha decaído en un 5.5%.

7.2.4 Resumen Escenarios contraste Década 70 y periodo actual.

Se puede inferir, a partir de los escenarios planteados, que la reducción en las aportaciones en la cuenca hidrográfica del embalse Amadorio para los periodos con los que se cuenta información meteorológica e

hidrológica no puede ser atribuible a una única causa. La suma de distintos factores es lo que ha contribuido a la menor disponibilidad de recursos en la zona y en el sistema en general; es por esto, que a partir de las simulaciones y variables analizadas se presenta la Tabla 32 de ponderaciones del nivel de influencia de cada uno de los factores analizados:

RESUMEN DE LA INFLUENCIA DE LOS INPUTS Y PARAMETROS EN LA REDUCCIÓN DE LAS APORTACIONES DÉCADA 70 VS PERIODO ACTUAL		
Variable	% Variación en la aportaciones	% Variación en la percolación
Cambios en los usos del suelo	-7.6%	-2.7%
Aumento de la evapotranspiración	-5.1% (Relativo al periodo estudiado)	-3.3%
Reducción de la precipitación	-47.4%	-33.4%
Total reducción	-60.1%	-39.4%

Tabla 32. Balance de influencia de las variables en la reducción de las aportaciones y la percolación.

Resulta evidente que la causa más importante de la menor cantidad de recursos disponibles es el cambio climático que se manifiesta con la disminución de lluvias principalmente; sin olvidar que otros factores como la reforestación y un posible aumento de la evapotranspiración podría resultar afectando en mayor medida las aportaciones existentes. Adicionalmente, el porcentaje de 60.1% obtenido con la suma de las variables, coincide con el 61.7% de descenso en las aportaciones de la Figura 71, analizado en el apartado 6.4 de Validación temporal y espacial del modelo entre la media de 9.4 Hm³/año para la década de 70-80 vs 3.6 Hm³/año del periodo actual.



CAPÍTULO 8.

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN EL RÍO AMADORIO Y EL CAMBIO EN LA RELACIÓN RÍO- ACUÍFERO.

“Reanalizar los datos climáticos del pasado es clave para entender el cambio climático en el futuro”- (ERA-CLIM², 2018).

EVOLUCIÓN HISTÓRICA RÍO AMADORIO

El río Amadorio y Sella han estado ligados históricamente al desarrollo productivo de la cuenca y de sus pobladores desde su fundación. Los musulmanes llegaron a la península en el año 711, pero los primeros vestigios en el municipio de Relleu se sitúan en el siglo X; a partir de este punto, el agua paso a ser un elemento fundamental para el crecimiento y progreso de la zona; la cultura musulmana, introdujo los sistemas de acequias que copiaban los antiguos canales de Babilonia. De esta forma los musulmanes propagaron por todas las zonas conquistadas sus sistemas de conducción del agua, que se hicieron especialmente útiles en Siria, el Norte de África y la Península Ibérica (Museo de Relleu, 2008).

En época cristiana, el agua continuó siendo una parte fundamental de esta civilización; se construyeron embalses como el de Relleu, balsas, molinos y nuevas acequias e, incluso, se legislo el uso de tan preciado tesoro. Un claro ejemplo de estos orígenes es el himno de Relleu que empieza "Poble de moros, poble de esclaus" en referencia a la ocupación musulmana y a la posterior conquista cristiana, también en él encontramos referencias concretas a la importancia que tenía el agua para los habitantes de la villa (Museo de Relleu, 2008).

Todo lo anterior nos lleva a pensar que, aunque en ocasiones escaso y variable, el agua siempre ha estado presente en la cuenca del Amadorio como elemento de desarrollo y bienestar de sus pobladores; es por esta razón que surge la interrogante planteada a partir de los caudales observados en los registros de la estación de aforo del Río Amadorio 8078 y nos lleva a cuestionarnos ¿Qué paso con los caudales base observados desde principios de 1920, su prolongada variación y reducción hasta 1978?

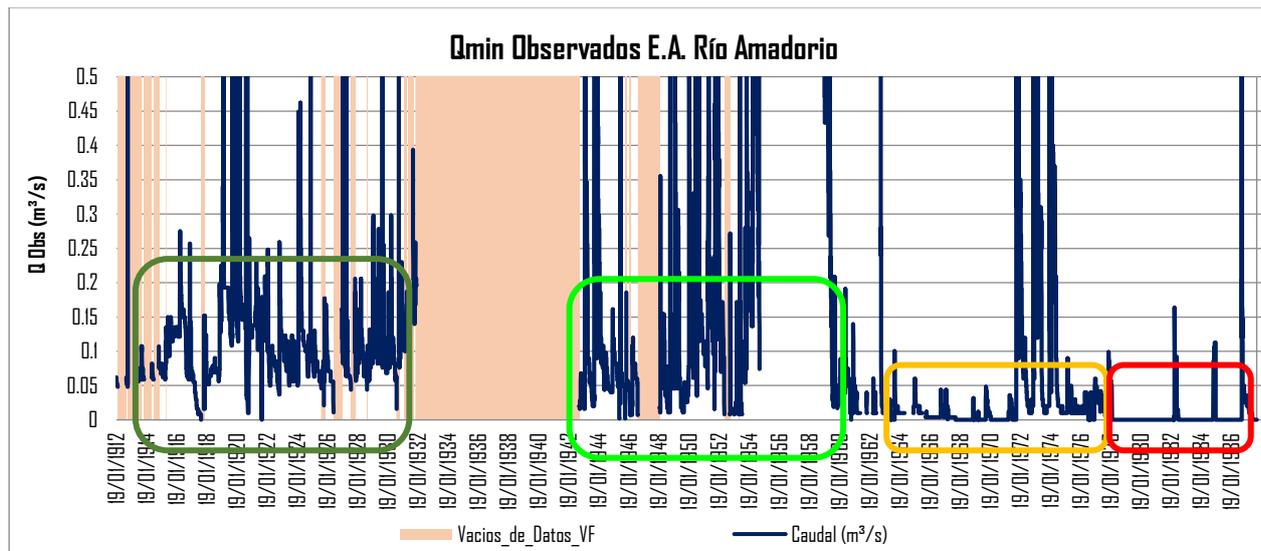


Figura 79 Caudales Mínimos Observados E.A. Río Amadorio – Análisis desaparición de flujo base.

En primera medida, cabe aclarar, como ya se observó en el capítulo anterior, que la disminución en las lluvias, cambios en usos del suelo y aumento de la evapotranspiración han contribuido a la reducción de los recursos disponibles en la cuenca; no obstante, por las características de los hidrogramas y las observaciones ejecutadas en la cuenca se ha establecido una desconexión entre el río y el acuífero. Para analizar a profundidad que podría haber causado tal desconexión es necesaria la modelación de los acuíferos subyacentes al tramo del río Amadorio en cabecera.

8.1 Reconstrucción de la información meteorológica.

8.1.1 Precipitación histórica.

El principal obstáculo que se presenta para poder modelizar el comportamiento de los acuíferos desde los años 20s es la escasez de información meteorológica; como alternativa, se ha decidió buscar información de precipitación cercana que pueda interpolarse a la cuenca en estudio y que proporcione un estimativo de los flujos infiltrados a los acuíferos en la cuenca. En este proceso de búsqueda se encontraron dos pluviómetros ubicados en la población de Alicante que combinados cubren el periodo 01/01/1921 – 31/12/2016.

Los pluviómetros encontrados son el 8025 que cubre el periodo 01/09/1938 – 31/10/2017 y el 8025-G que abarca desde 01/01/1921-30/08/1938; debido a la cercanía entre ellos que se estima en 1.83 Km, y a la coincidencia y continuidad de sus registros, se han englobado estos datos como un único pluviómetro 8025 que cubre el periodo 01/01/1921 – 31/10/2017.

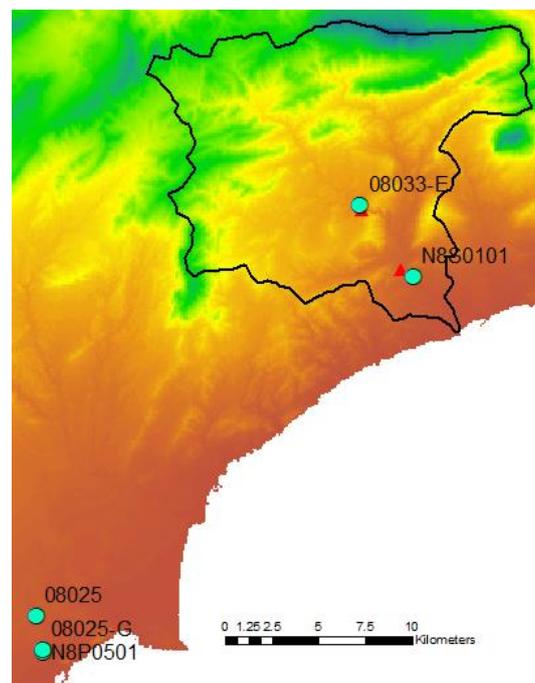


Figura 80 Traslado de pluviómetros Alicante a Amadorio

Como se aprecia en la Figura 80, aunque los pluviómetros elegidos se encuentran en la cuenca continua a la del Amadorio, la distancia entre ellos puede resultar importante; es por esto, que para validar la posibilidad de traslado de los datos se tuvieron en cuenta tres criterios:

- Comparación de la precipitación media anual con respecto a los pluviómetros en la cuenca.
- Desviación estándar a escala diaria para los pluviómetros de Alicante y Amadorio.
- Factor de correlación de Pearson entre los pluviómetros de Alicante y.

$$r = \frac{S_{XY}}{S_X * S_Y}$$

Ecuación 6. Coeficiente de correlación de Pearson.

PERIODO CORRELACION	01/03/1971-31/10/2017	
PLUVIDOMETROS	8025	8033-E
MEDIA DIARIA	0.870	0.835
DESVIACION ESTANDAR	5.181	4.518
MEDIA ANUAL (mm/año)	317.672	304.915
COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON	<u>0.670</u>	

Tabla 33. Criterios para el traslado de pluviómetros.

Para analizar la factibilidad del traslado de los pluviómetros se revisaron para un periodo de control (01/03/1971 – 31/10/2017), donde los pluviómetros tuvieran los mismos datos, los criterios señalados anteriormente; a partir de este análisis, se encontró la mayor correlación entre los pluviómetros 8025 y 8033-E, su media anual coincide de forma cercana, la desviación estándar sugiere una mayor torrencialidad para el pluviómetro 8025 con respecto al 8033-E pero dentro de un rango aceptable; por último, el coeficiente de correlación nos muestra una correlación moderada, que aunque está un poco alejada del óptimo (1), muestra una similitud en el comportamiento meteorológico aceptable para el análisis de recarga de los acuíferos en la cuenca del embalse Amadorio.

Se presenta la Figura 81 con el objetivo de analizar la serie de precipitación a interpolar desde Alicante, sus años secos y húmedos y la tendencia lineal de la serie.

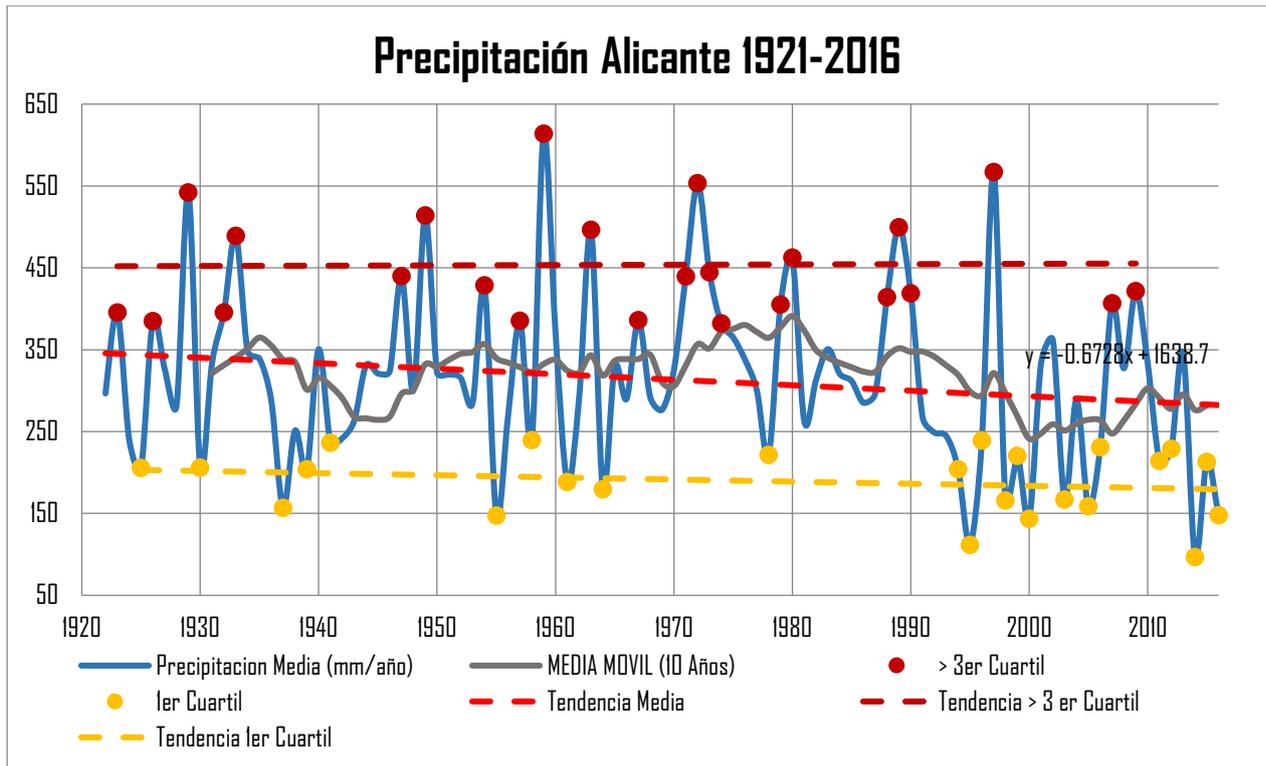


Figura 81 Precipitación media anual Alicante – Periodo 1921-2016 – Tendencia, años secos y húmedos.

Para revisar si la serie de precipitación de Alicante presenta una tendencia significativa, y repitiendo el proceso empleado en el apartado 7.1 se aplicó el test de Mann-Kendall para la serie obteniendo los siguientes resultados:

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
Tau de Kendall	-0.120268757	valor-p (bilateral)	0.084836354
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho, pero la cercanía del valor p al nivel de significancia no da suficiente capacidad para descartar la hipótesis alternativa.			

Tabla 34 Test de tendencia de Mann-Kendall Precipitación Alicante 1921-2016..

El test nos da como resultado un valor del parámetro p superior al nivel de significancia mínimo del 5%; lo cual no permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa de tendencia en la serie; no obstante, el bajo valor de p no proporciona suficiente capacidad para rechazar la hipótesis alternativa sin un riesgo cercano al 92%; por ello, para ampliar el entendimiento de la serie se acude al análisis por periodos, donde se eligió 1921/40 – 1940/81 y 1981/2016 para analizar la variación de la precipitación y

el fenómeno del efecto 80 mencionado por otros investigadores en el ámbito de la demarcación hidrográfica del Júcar (Miguel A. Pérez-Martín, 2012); obteniendo los resultados de la Figura 83.

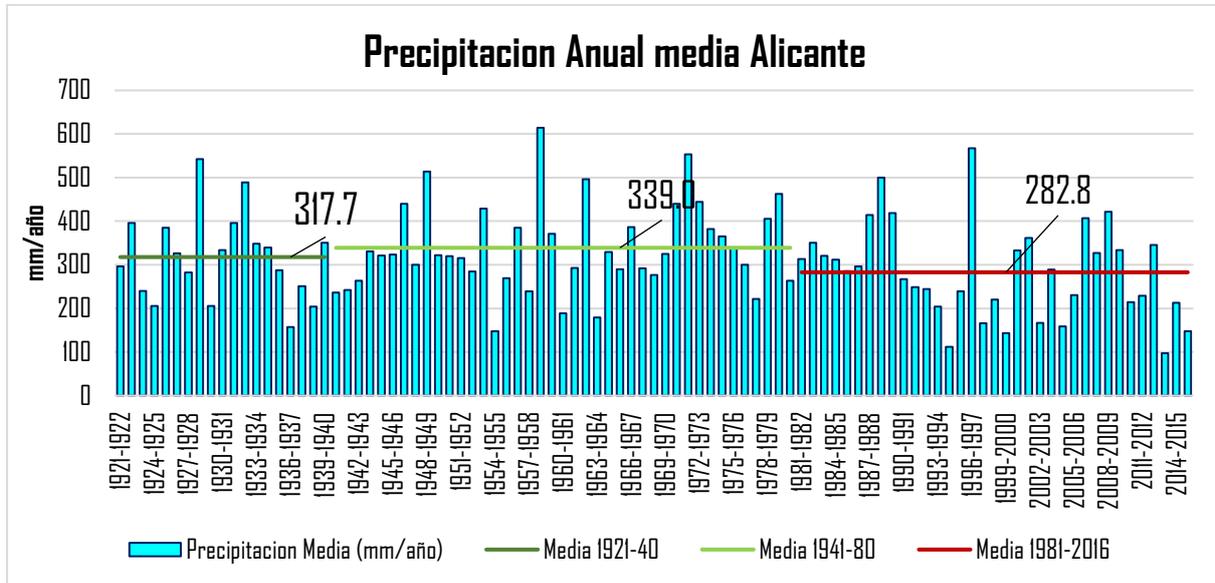


Figura 82 Histograma de precipitación media areal histórica de Alicante – Periodo 1921-2016.

En la Figura 82 se observan saltos en las medias de los periodos analizados; sin embargo, para evaluar la significancia de dichos saltos se acudió a la prueba no paramétrica de saltos de Wilcoxon, Mann y Whitney que compara dos muestras, determinando si se pueden considerar idénticas o no, sobre la base de sus rangos. Los resultados del test para la serie de precipitación de Alicante fue la mostrada en la Tabla 35.

Ho (Hipótesis nula) = La diferencia de posición entre las muestras es igual a 0.

Ha (Hipótesis alternativa) = La diferencia de posición entre las muestras es diferente de 0.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE SALTO WILCOXON, MANN - WHITNEY.			
CONTRASTE 1921/40 - 1940/81		CONTRASTE 1940/81 - 1981/2016	
valor-p (bilateral)	0.3788	valor-p (bilateral)	0.0186
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.		Se debe rechazar la hipótesis nula Ho y aceptar la hipótesis alternativa Ha de salto significativo en la serie.	

Tabla 35 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney Precipitación Alicante 1921/40-1940/81- 1981/2016

Se concluye a partir de los test de Mann-Kendall y Wilcoxon, Mann-Whitney, que en la serie histórica de precipitación de Alicante no se tiene una tendencia significativa por debajo del nivel de significancia del 5%; sin embargo, se tiene un salto significativo entre los periodos 1940/81 y 1981/2016 donde la precipitación media se redujo cerca de un 16%.

Por otra parte, para alcanzar una mayor similitud entre las medias de los pluviómetros Alicante y Amadorio, se ponderaron las lluvias registradas por factores a escala mensual que igualaran las medias de los registros como se aprecia en la Tabla 36:

MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Factor de Ponderación	1.08	1.03	0.87	0.88	1.09	1.12	0.81	1.17	0.79	0.95	0.98	1.02

Tabla 36. Factores ponderadores de media anual entre los pluviómetros 8025 y 8033-E.

A partir de estos análisis y modificaciones a las series de lluvia se obtuvo un nuevo registro que abarca el periodo 01/01/1921 – 31/12/2016; que combinado con el factor de gradiente de la precipitación con la altitud del modelo TETIS, nos presenta los siguientes valores medios de precipitación anual en la cuenca del embalse Amadorio:

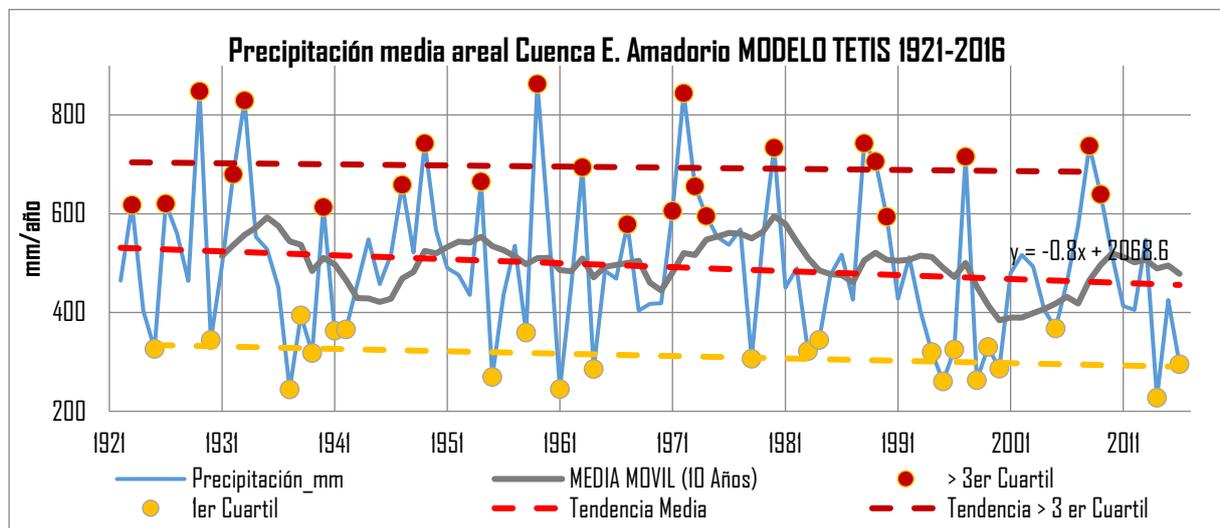


Figura 83. Precipitación media areal TETIS a escala anual – Periodo 1921-2016 – Tendencia, años secos y húmedos.

Al igual que en el análisis de la serie de precipitación para Alicante se ha aplicado el test de Mann-Kendall para la serie media areal implementada en el modelo y se han obtenido los siguientes resultados:

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
Tau de Kendall	-0.097872	valor-p (bilateral)	0.160981
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.			

Tabla 37 Test de tendencia de Mann-Kendall Precipitación reconstruida Amadorio 1921-2016.

Nuevamente se observa un valor de p superior al umbral de significancia del 5% y por ello no se puede afirmar que la serie tiene una tendencia significativa.

Adicionalmente, a partir de la reconstrucción de la lluvia en la cuenca hidrográfica del Amadorio, se observa en la Figura 84 un descenso en media de la lluvia en el periodo 1981-2016 con respecto a los periodos 1921/40 y 1941/80, tal disminución del orden del 12% ratifican los resultados obtenidos en el planteamiento de escenarios y el análisis de las variables influyentes comparadas en el periodo de la década del 70 y el actual; adicionalmente, se aprecia en la Figura 84 un incremento de los periodos con sequia meteorológica y una reducción de los años húmedos correspondientes al 3er cuartil de la muestra.

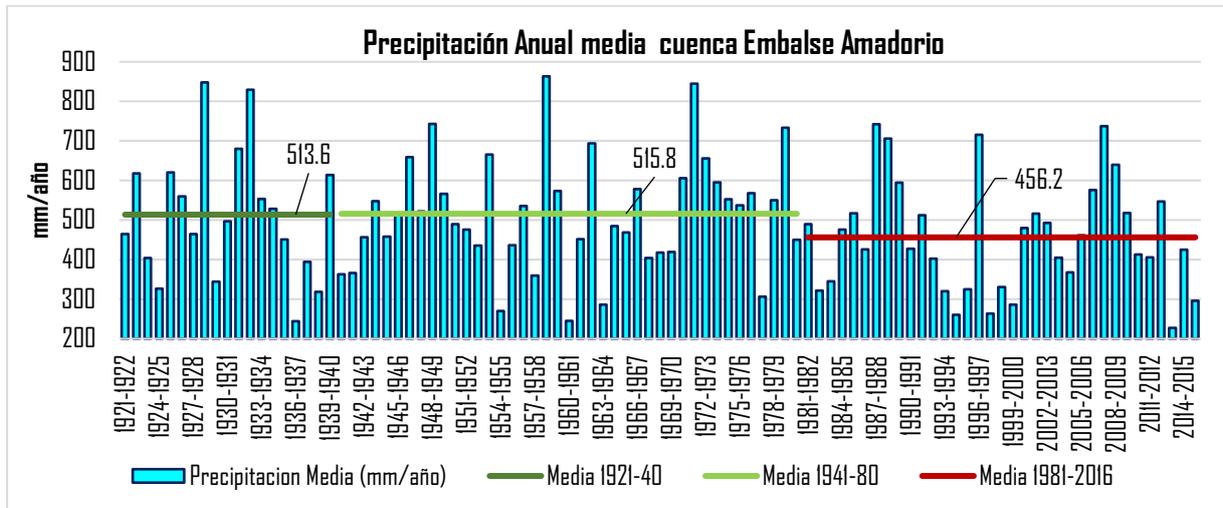


Figura 84. Histograma de precipitación media areal histórica con TETIS de la cuenca del Amadorio – Periodo 1921-2016.

Siguiendo el razonamiento que en el análisis de la precipitación de Alicante se aplicó el test Wilcoxon, Mann y Whitney con el fin de corroborar la significancia de los saltos, donde se encontraron los siguientes resultados:

Ho (Hipótesis nula) = La diferencia de posición entre las muestras es igual a 0.

Ha (Hipótesis alternativa) = La diferencia de posición entre las muestras es diferente de 0.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE SALTO WILCOXON, MANN - WHITNEY.			
CONTRASTE 1921/40 - 1940/81		CONTRASTE 1940/81-1981/2016	
valor-p (bilateral)	0.6576	valor-p (bilateral)	0.0437
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.		Se debe rechazar la hipótesis nula Ho y aceptar la hipótesis alternativa Ha de salto significativo en la serie.	

Tabla 38 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney Precipitación Amadorio 1921/40-1940/81- 1981/2016

En serie de precipitación media areal obtenida con TETIS para la cuenca del embalse Amadorio, vemos a partir de los test de Mann-Kendall y Wilcoxon, Mann y Whitney, no presenta una tendencia significativa;

sin embargo, presenta un salto significativo entre los periodos 1940/81 y 1981/2016 que podría afectar en las aportaciones de la cuenca y en los volúmenes de recargas a las masas subterráneas.

8.1.2 Temperatura y Evapotranspiración histórica.

Para la revisión de la temperatura en el periodo histórico se analizaron nuevamente los valores máximos, mínimos y medios de la variable, obteniendo los resultados de la Figura 85; de forma complementaria se aplicó el test de tendencia de Mann-Kendall para analizar estadísticamente la significancia del aumento de la temperatura.

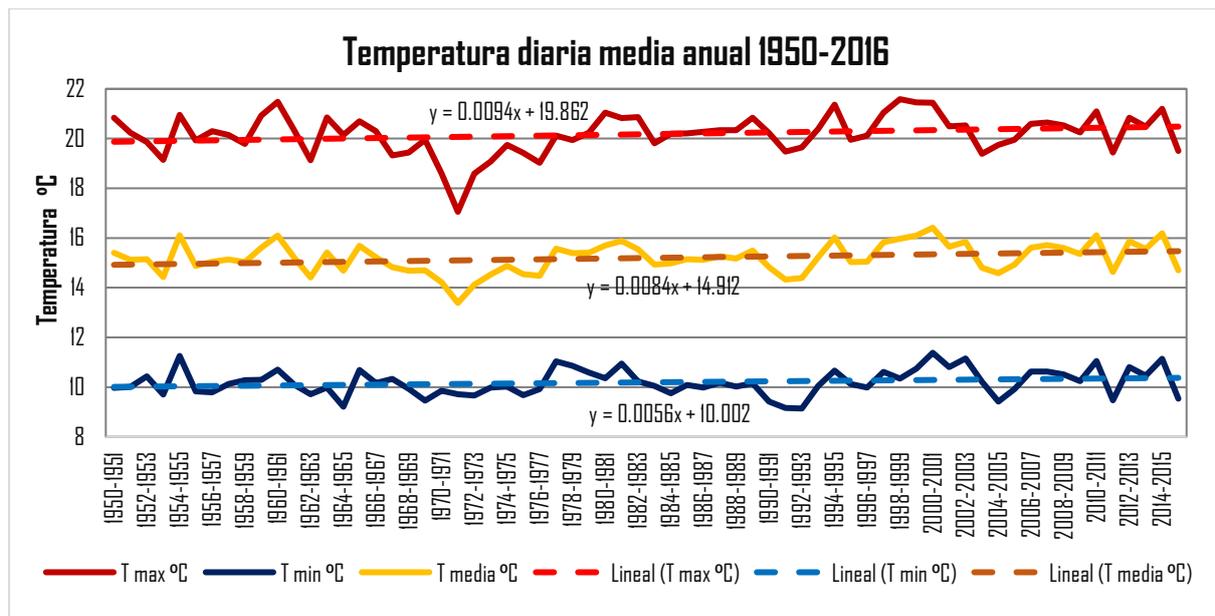


Figura 85 Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media – Periodo 1950-2016

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
	Tau de Kendall	valor-p (bilateral)	Interpretación
Temperatura max	0.0993	0.2407	No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.
Temperatura min	0.1366	0.1061	No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.
Temperatura media	0.1040	0.2192	No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.

Tabla 39 Test de tendencia de Mann-Kendall Temperatura diaria Máxima, Mínima y Media 1950-2016.

Como se aprecia en la Tabla 39 para los distintos valores temperatura máxima, mínima y media el valor de p indica una tendencia poco significativa y por ello se procede a rechazar la hipótesis nula; estos resultados sugieren que la temperatura ha presentado un incremento en el periodo reciente, aunque se requiere de una muestra de mayor longitud para considerar tal aumento estadísticamente significativo.

En conjunto, la evapotranspiración de referencia ETo fue simulada para el periodo 1921-1950 con los valores medios del periodo 1950/59; esto debido a que a partir de 1950 se cuenta con los registros de temperatura del proyecto Spain02 v2 que nos permite por el método de Hargraves obtener la serie de ETo. En la Figura 86 se presentan los valores medios de ETo para la serie de 1951-2016.

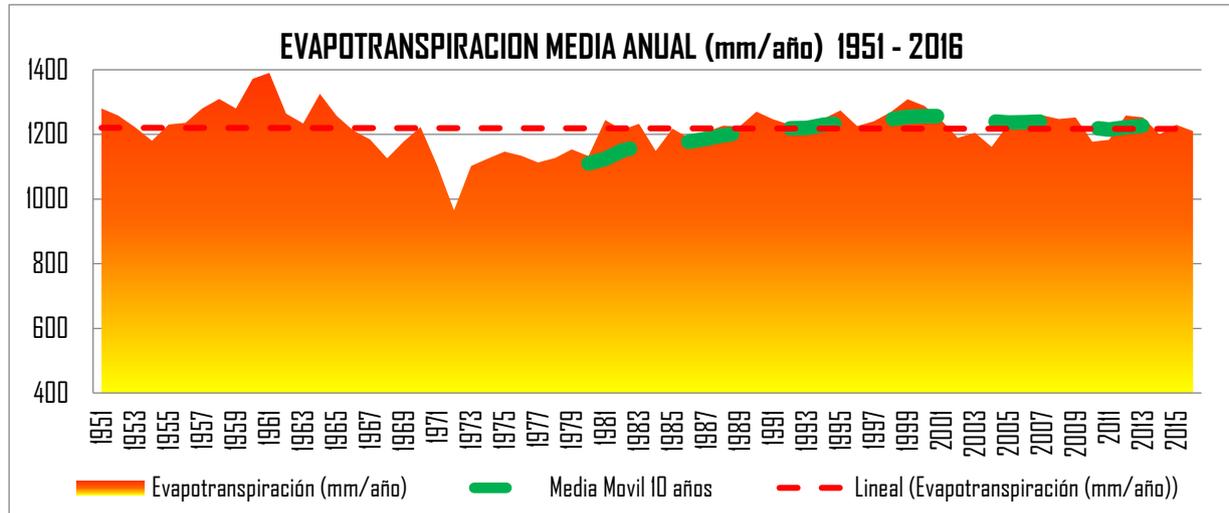


Figura 86 Serie 1951 – 2016 Evapotranspiración media areal cuenca del embalse Amadorio.

Para evaluar la tendencia de la serie se aplicó el test de Mann-Kendall con los siguientes resultados:

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
Tau de Kendall	0.02004	valor-p (bilateral)	0.8162
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.			

Figura 87 Test de tendencia de Mann-Kendall ETo 1951-2016.

A partir de los resultados se concluye que no hay tendencia en la serie.

A partir del test de Wilcoxon, Mann-Whitney se evaluó la significancia del salto entre el periodo 1951/81-1981/2016 observado en la Figura 88

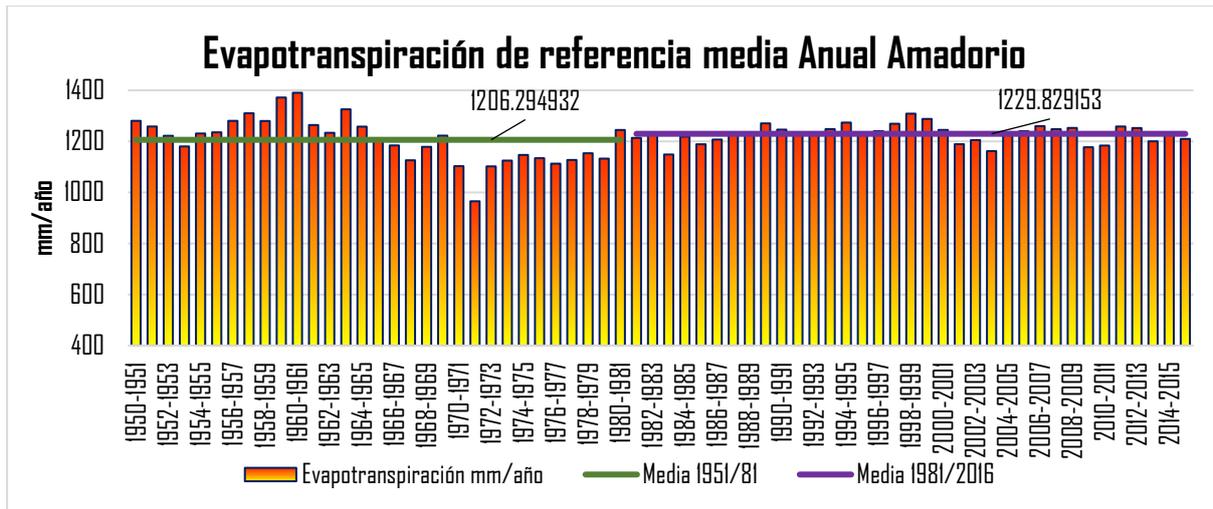


Figura 88 Serie 1951 – 2016 Comparación de medias 1951/81 – 1981/2016.

Ho (Hipótesis nula) = La diferencia de posición entre las muestras es igual a 0.

Ha (Hipótesis alternativa) = La diferencia de posición entre las muestras es diferente de 0.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE SALTO WILCOXON, MANN - WHITNEY.	
CONTRASTE 1951/81-1981/2016	
valor-p (bilateral)	0.22882
No se puede rechazar la hipótesis nula.	

Tabla 40 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney ETo Amadorio1951/81- 1981/2016

No se evidencia un salto significativo en la serie entre los periodos 1951/81 y 1981/2016, a pesar del aumento en media del 2% entre los periodos contrastados.

8.2 Análisis de las masas subterráneas.

Para lograr reproducir el comportamiento de las masas subterráneas se requirió delimitar los acuíferos en la cuenca y especialmente los subyacentes al río Amadorio aguas arriba del embalse; para caracterizar dichos acuíferos se procedió a aplicar la información disponible en el *Informe sobre la caracterización básica de las masas de agua subterránea de la CHJ* (IGME, 2011), donde se describen de forma general algunas de las masas más importantes de la demarcación; en nuestro caso se tomaron los valores disponibles de las masas Orcheta con código 80.183 y Sierra Aitana con código 80.177; a partir de la información y valores encontrados se establecieron de manera aproximada los parámetros de la Tabla 41 para los acuíferos Local 22, Sella y Orcheta:

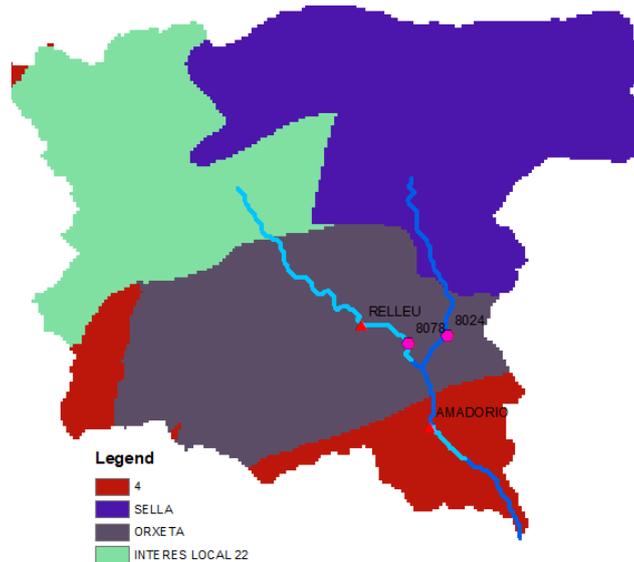


Figura 89 Acuíferos en TETIS cuenca hidrográfica del Amadorio.

Acuífero	Área (Km ²)	Celdas	Coef. Almacenamiento (S)	Altura (m)	Volumen Aprox. (Hm ³)
Sella	77.71	7771	0.02	200	310.84
Anticlinares de Orxeta Norte	62.5	6250	0.02	100	125
Interés Local No 22	52.38	5238	0.02	200	209.52

Tabla 41 Acuíferos en TETIS cuenca hidrográfica del Amadorio.

En el análisis de la hidrogeología de la zona se aprecia que los acuíferos que podrían presentar una conexión del flujo base entre el río y el acuífero para el Amadorio son el acuífero Local 22 en cabecera, y el acuífero Orcheta en zona media y baja del cauce. Para establecer de manera aproximada el nivel freático de la masa subterránea se analizaron los piezómetros existentes en la zona de estudio y se encontraron los siguientes datos disponibles:

Piezómetro	Acuífero	Fecha Inicial	Fecha Final
08.48.018	Local 22	dic-76	may-00
08.48.007	Orcheta	jun-98	may-00
08.48.017	Orcheta	dic-77	mar-00
08.48.001	Orcheta	jun-08	dic-17

Tabla 42 Piezómetros disponibles en los acuíferos subyacentes al río Amadorio.

Con los valores máximos históricos registrados en las series de estos piezómetros, en combinación con el modelo de elevación digital se construyó un perfil del nivel freático y del nivel de terreno a lo largo de la longitud del cauce, desde su cabecera hasta el embalse del Amadorio; la Figura 91 presenta el esquema descrito y las características más destacadas en términos de demandas y asignaciones.

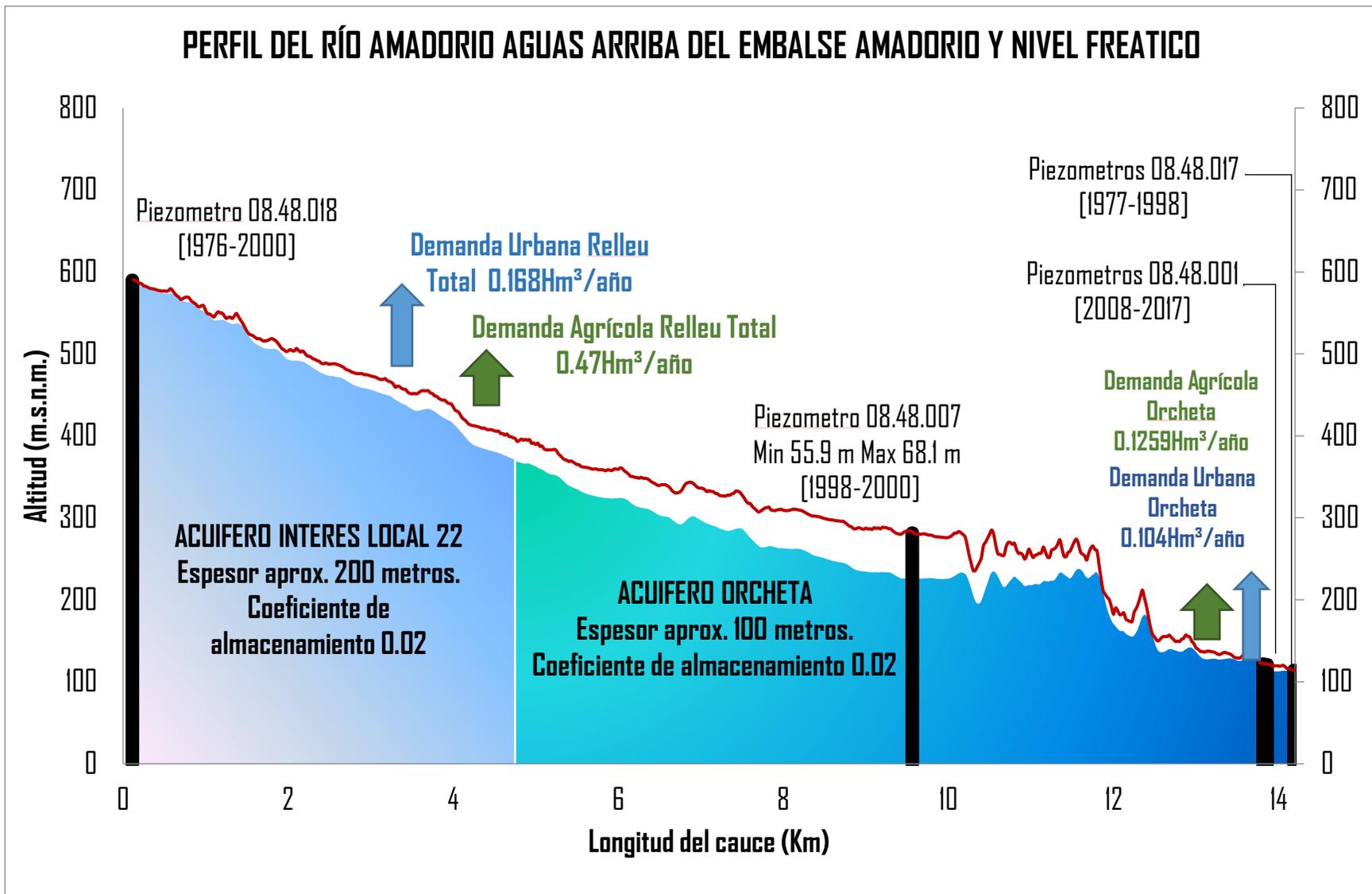


Figura 90 Perfil del nivel freático y nivel del terreno para el cauce del río Amadorio desde su nacimiento hasta el embalse Amadorio.

La conclusión más destacable del análisis en la Figura 91 es la ubicación de los distintos puntos que históricamente han mostrado una posible conexión entre el río y el acuífero; estos puntos se refieren al tramo de cabecera entre el Km 0 y 1, y al tramo final en la cola del embalse entre el Km 13 y 14. Debido a que históricamente el embalse ha alcanzado los niveles máximos de operación normal, se estima que los datos piezométrico tomados en la cola del embalse se pudieron ver influidos y por ello se ve un nivel freático cercano al del terreno (Km 13 y 14); caso contrario es el tramo de cabecera donde históricamente en periodos húmedos se han visto manantiales resurgir pero después de periodos con poca lluvia su aportación desaparece; es en este punto del acuífero Local 22 donde estimamos que se debe analizar el balance de recargas por infiltración y extracciones por bombeo para los distintos usos, todo con el fin de establecer el grado de afectación de tales bombeos al régimen histórico del río.

A partir del análisis de la piezometría de la zona de estudio, se encontró un fuerte descenso en el punto de cabecera en el piezómetro 08.48.018; este punto podría validar las estimaciones realizadas en la modelación del acuífero; sin embargo, no se tiene certeza de que sea un punto representativo del comportamiento general de la masa subterránea.

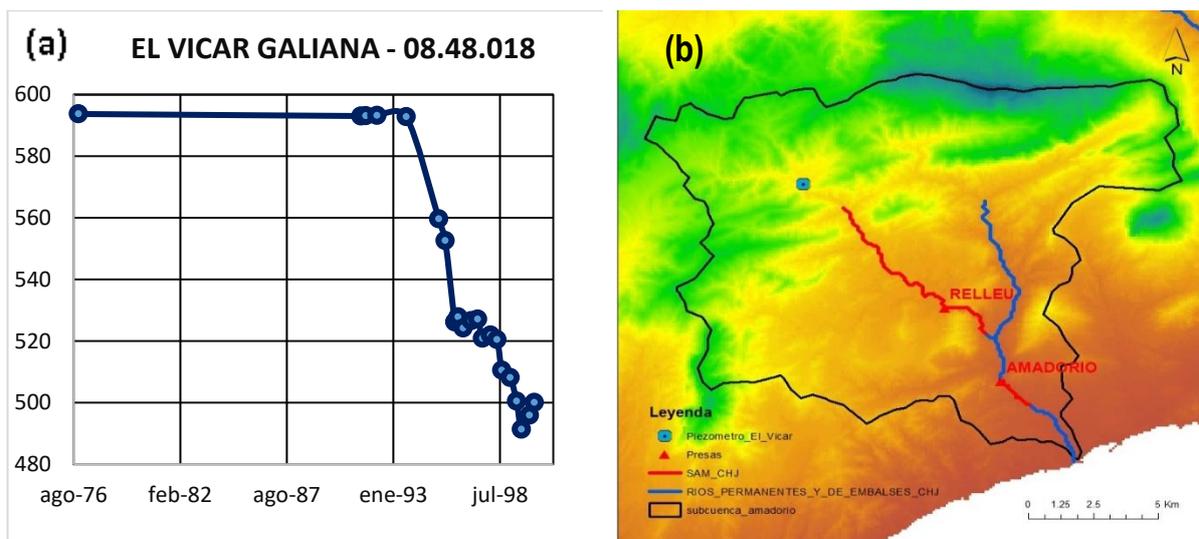


Figura 92 Piezómetro 08.48.018 El Vicar Galiana. (a) registros (b) ubicación en la cuenca.

8.3 Modelización de las recargas a los acuíferos con TETIS.

Como se mostró en el balance hídrico del apartado 6.4, el modelo TETIS calcula los flujos infiltrados y finalmente percolados al acuífero subyacente a la masa superficial. Gracias a la reconstrucción aproximada de las lluvias desde el año 1921 se ha podido generar un balance de recarga por cada acuífero en la cuenca; en este caso, debido a la información hidrológica encontrada se destacan las recargas al acuífero Local 22 registradas en la Figura 93.

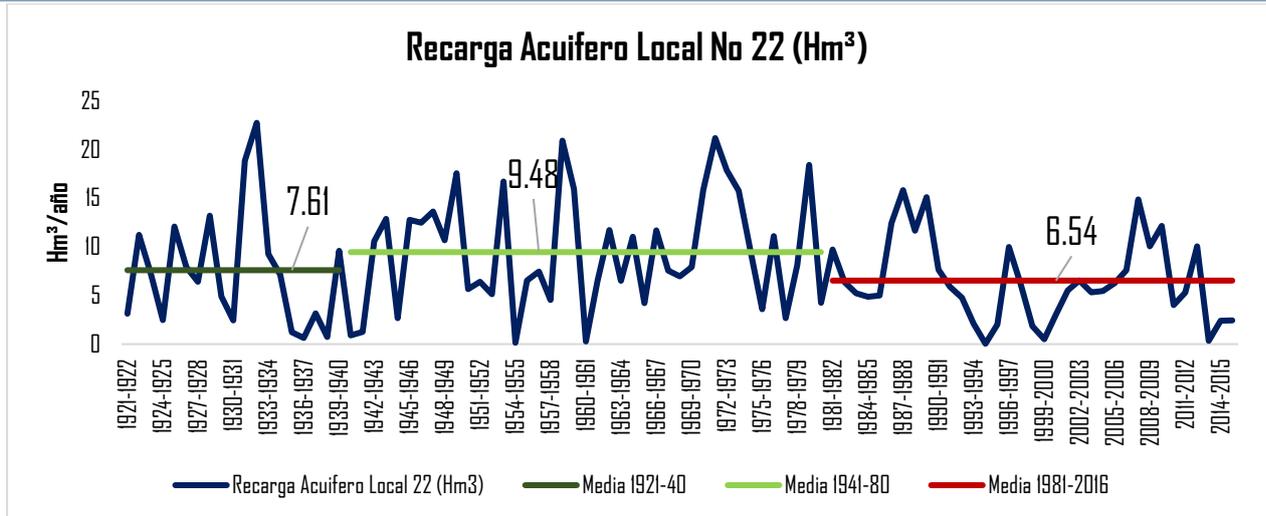


Figura 93. Recarga media anual en Hm³/año Acuífero Local No 22.

Para revisar si la serie de recarga al acuífero Local 22 presenta una tendencia significativa, se aplicó el test de Mann-Kendall para la serie obteniendo los siguientes resultados:

Ho (Hipótesis nula) = No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis alternativa) = Hay una tendencia en la serie.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE TENDENCIA DE MANN-KENDALL			
Tau de Kendall	-0.082642777	valor-p (bilateral)	0.236748379
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.			

Tabla 43 Test de tendencia de Mann-Kendall Recarga Acuífero Local 22 1921-2016.

El resultado del test no permite aceptar la hipótesis de tendencia en la serie; por esta razón se requiere evaluar la significancia de los saltos a partir del test de Wilcoxon, Mann-Whitney.

Ho (Hipótesis nula) = La diferencia de posición entre las muestras es igual a 0.

Ha (Hipótesis alternativa) = La diferencia de posición entre las muestras es diferente de 0.

El criterio para rechazar la hipótesis nula será que el valor p de la prueba sea menor al nivel de significancia mínimo de 0.05 o 5%.

PRUEBA DE SALTO WILCOXON, MANN - WHITNEY.			
CONTRASTE 1921/40 - 1940/81		CONTRASTE 1940/81 - 1981/2016	
valor-p (bilateral)	0.1016	valor-p (bilateral)	0.0098
No se puede rechazar la hipótesis nula Ho.		Se debe rechazar la hipótesis nula Ho y aceptar la hipótesis alternativa Ha de salto significativo en la serie.	

Tabla 44 Test de Salto de Wilcoxon, Mann-Whitney Precipitación Alicante 1921/40-1940/81- 1981/2016

El test de salto sugiere una reducción significativa entre el periodo 1940/81 al periodo 1981/2016; para estudiar más al detalle las implicaciones de este descenso en las recargas y las afectaciones a la relación río-acuífero producto de los aprovechamientos por extracciones, se planteó la modelación del acuífero a partir del modelo de tanque unicelular con dos coeficientes de descarga que se explica en el apartado 8.4.

8.4 Modelo de Tanque unicelular con dos coeficientes de descarga Alfa (α_1 y α_2) por el método de Diferencias Finitas de Euler.

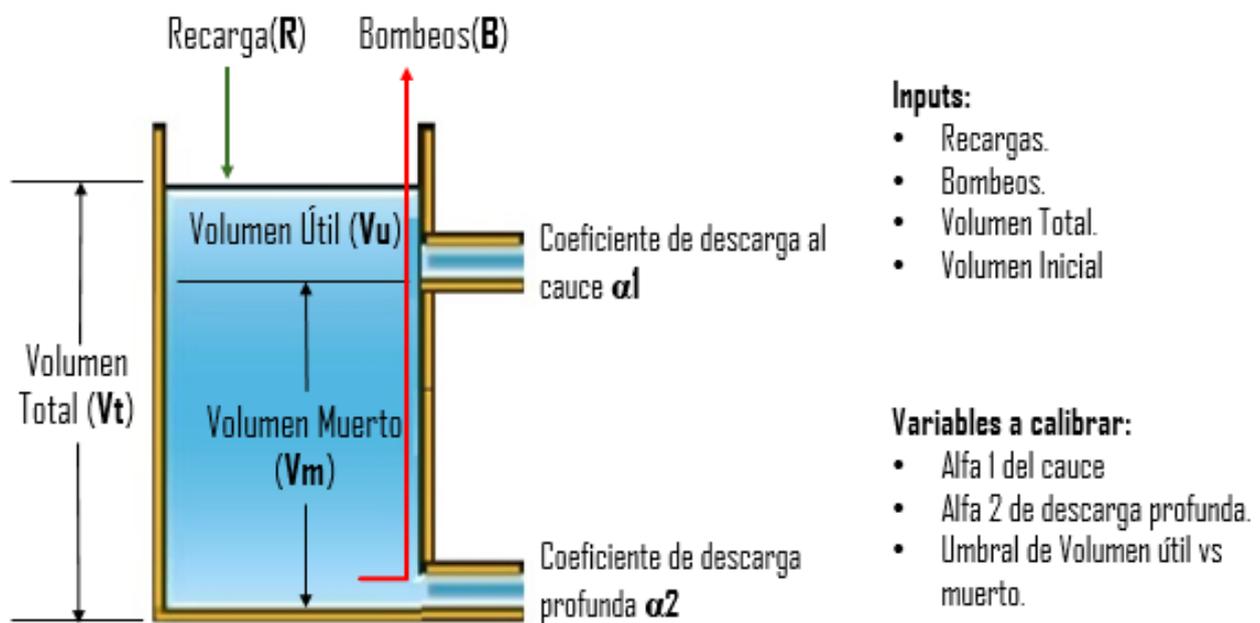


Figura 94. Esquema del modelo de tanque unicelular con dos descargas α_1 y α_2 , inputs y variables del modelo.

El modelo plantea un único tanque para representar el acuífero Local No 22, en este tanque se tiene un volumen muerto (V_m) con su respectivo coeficiente de descarga profunda (α_2), que representa las descargas del acuífero aguas abajo del embalse y que terminan conformando las aportaciones al mar. A partir de un umbral o nivel en el acuífero comienza el volumen útil cuyo coeficiente de descarga (α_1) se relaciona directamente con las aportaciones al cauce. Los flujos de recarga al acuífero son los valores hallados con el modelo TETIS en el apartado anterior, mientras las extracciones son las estimadas en el apartado de demandas 3.6 y 3.7 en $0.65 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y convertidas a escala diaria, iniciando los aprovechamientos subterráneos desde el año 1980. A partir de todos los inputs se obtuvo el balance de materia de la Ecuación 7.

$$\frac{dV}{dt} = \text{Recarga} - \text{Bombeos} - \alpha_1 * V_{\text{util}} - \alpha_2 * V_{\text{total}}$$

Ecuación 7. Balance de materia en el acuífero Local 22.

Al aplicar el método de diferencias finitas o método de Euler se obtiene una ecuación de balance para cada intervalo de tiempo (Δt) que en nuestro caso es la escala diaria del modelo.

$$V(t + 1) = V(t) + (Recargas - Bombeos - \alpha 1 * Vutil(t) - \alpha 2 * V(t)) * \Delta t$$

Ecuación 8. Balance en el acuífero para cada Δt – Método de Euler.

Donde V es el volumen en el tanque para cada intervalo de tiempo, Recargas corresponde a las recargas por percolación desde el modelo TETIS, Bombeos se refiere a las extracciones al acuífero y Volumen Útil es un condicional donde si $V(t)$ es mayor al Umbral será $Vutil = V(t) - Umbral$, en caso contrario será cero (0).

De esta forma, a partir de una calibración manual se obtuvieron los valores de las variables registrados en la Tabla 45 y se fijó el estado inicial del tanque en un 97% de la capacidad total considerando las aportaciones registradas.

Estados Iniciales		Variables de calibrar	
Cap. Tanque (Hm ³)	209.52	Umbral Vol. Muerto	160
Vol. Inicial. Tanque (Hm ³)	203.2344	Alfa 1	0.00022
Δt (día)	1	Alfa 2	0.000125

Tabla 45 Variables calibradas en el modelo de tanque unicelular y estados iniciales.

A partir de estas variables se obtuvo el siguiente ajuste de los caudales mínimos de la estación de aforo del río Amadorio para los caudales bajos en el periodo 1921 – 1930, mejorando considerablemente los flujos simulados de TETIS sin flujo Base, en conjunto con los aportes provenientes del acuífero Local22 simulado con el modelo del Tanque unicelular.

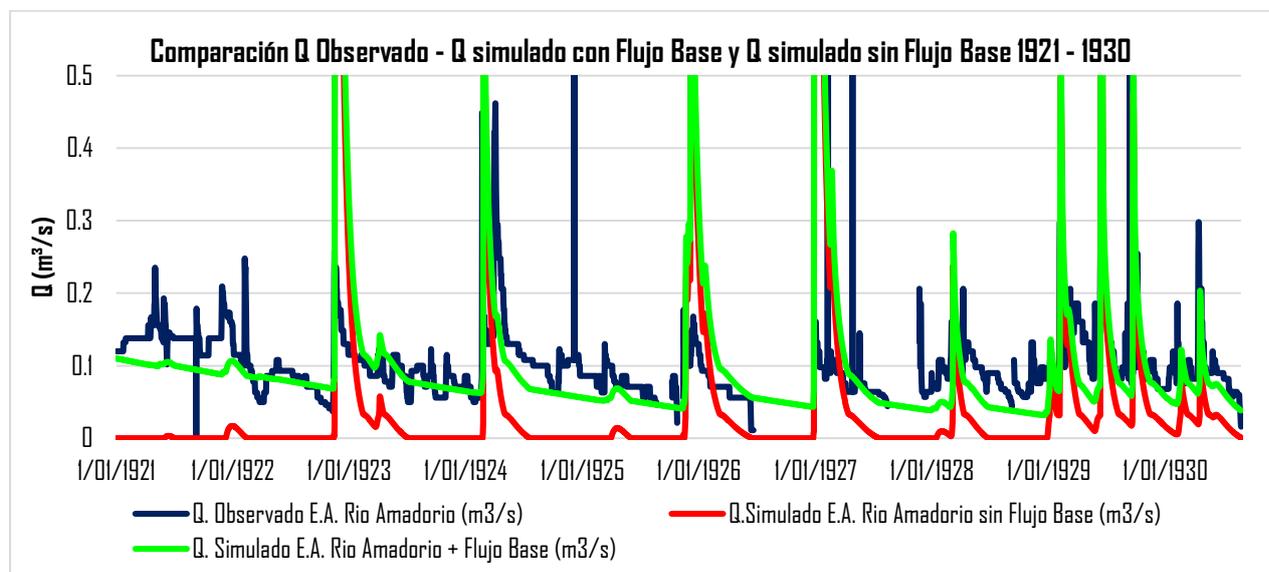


Figura 95 Comparación Q Observado - Q simulado con Flujo Base y Q simulado sin Flujo Base - Periodo 1921 – 1930.

Una vez calibradas las variables se procedió a simular en periodo continuo los niveles piezométricos del acuífero local 22, con y sin extracciones, obteniendo los niveles de la Figura 96.

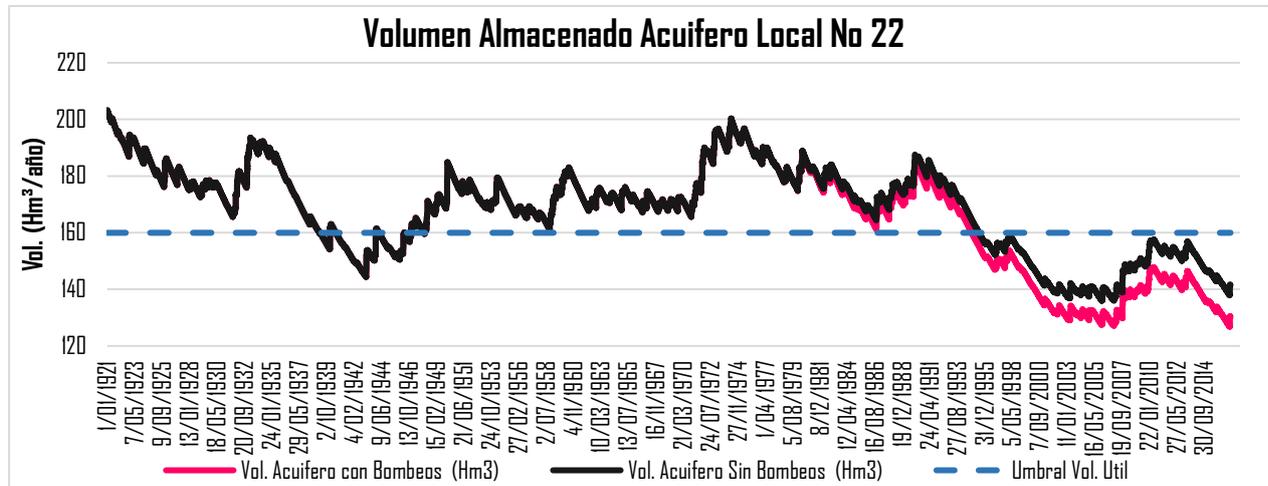


Figura 96 Niveles piezométricos Acuífero Local 22 Periodo 1921 – 1930.

Como se puede observar en la Figura 96, la influencia de las extracciones a los acuíferos, aunque puede ser importante en términos cuantitativos, no es el principal causante de la desconexión entre el acuífero y el cauce; de hecho, en los niveles simulados con el modelo se aprecia, que aunque no se tuvieran extracciones, sería muy complicado recuperar las aportaciones del acuífero al río debido a la reducción en las recargas por percolación desde la superficie; todo esto ligado a la reducción en la precipitación media areal en la cuenca que se detalló en los apartados 7.1 y 8.1 con sus respectivos test de tendencia y de salto en la media.

Al corroborar la modelización del acuífero Local22 se encontró una coincidencia en el descenso de los niveles piezométricos, con lo registrado en el piezómetro El Vicar; como se aprecia en la Figura 97:

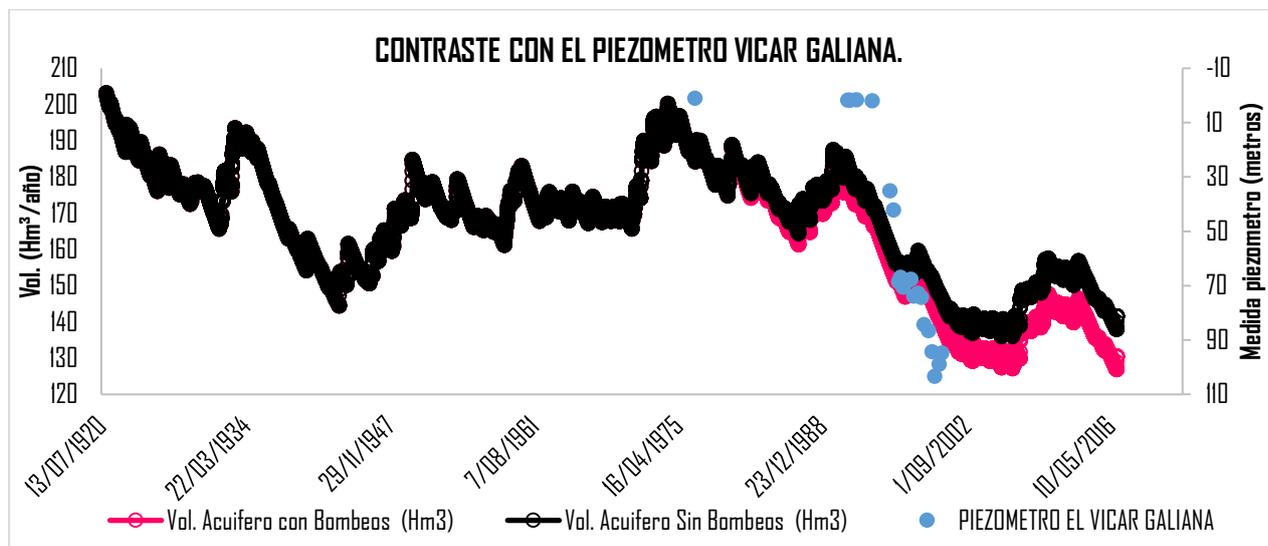


Figura 97 Contraste Niveles piezométricos Acuífero Local 22 y Piezómetro Vicar Galiana.

No obstante, aunque se encuentra similitud entre lo modelado y los niveles del acuífero registrados por el piezómetro; hay una diferencia entre el periodo aproximado de desconexión entre el acuífero y el cauce, por un lado, la E.A. Río Amadorio 8078 registra una aparente desconexión del cauce a partir de los años 60s, con una leve recuperación en el periodo húmedo de los años 70s; el modelo por su parte, registra una disminución de los flujos base en los años 60s, pero el periodo húmedo de los años 70s favorece una recarga del acuífero lo que lleva a una desconexión total a principios de los años 90s.

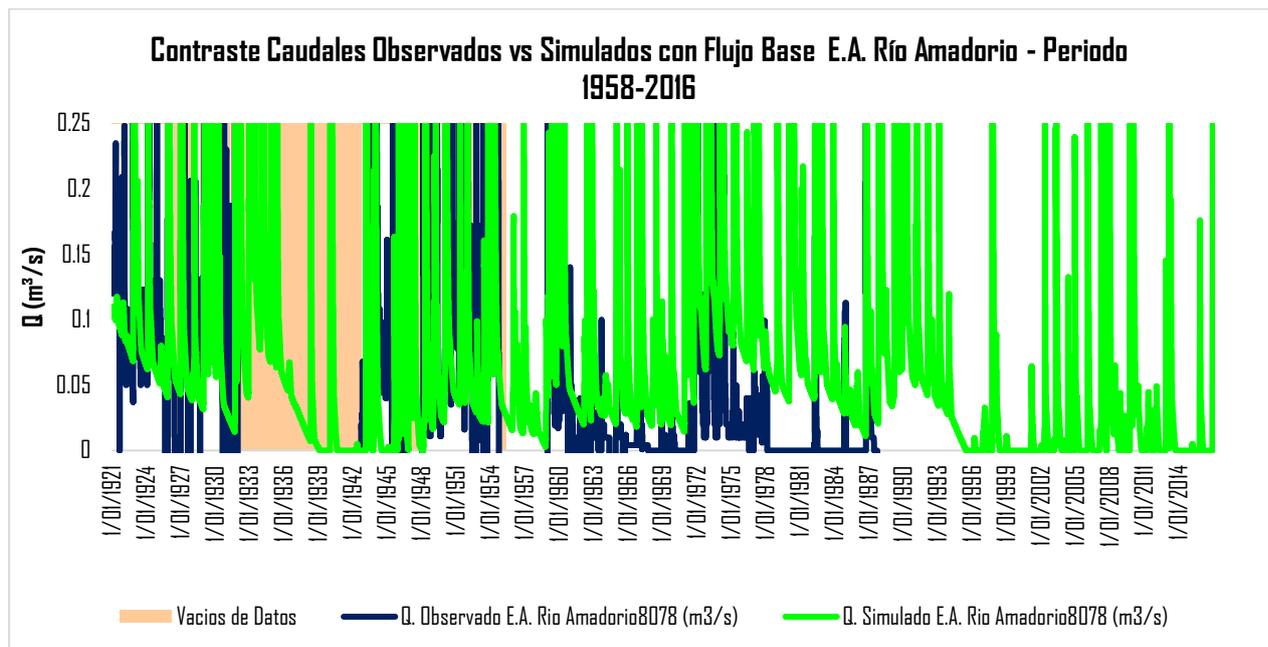


Figura 98 Comparación Q Observado - Q simulado con Flujo Base – E.A. Río Amadorio - Periodo 1921 – 2016.

Existen múltiples explicaciones a esta discrepancia; en principio, se puede atribuir a que, aunque importante y significativo, el uso únicamente del piezómetro Vicar Galiana no es suficiente para determinar de manera exacta el umbral de volumen útil y el piezómetro registro más tarde la reducción en los niveles del acuífero cuando ya no se contaba con flujo base en el cauce. Por otra parte, también se cree, que debido a la incapacidad de la E.A. Río Amadorio 8078 de medir los flujos subsuperficiales, los recursos pudieron no ser registrados en los aforos pero fueron aportados en conjunto en la confluencia del embalse Amadorio aguas debajo de la estación de aforo.

Para corroborar la hipótesis de un flujo subsuperficial que no supero el umbral de aportes a flujo base, pero que fue aportado en la confluencia del embalse Amadorio, se revisaron los caudales simulados y observados del P.O. Embalse Amadorio y se encontró un comportamiento favorable como se aprecia en la Figura 99.

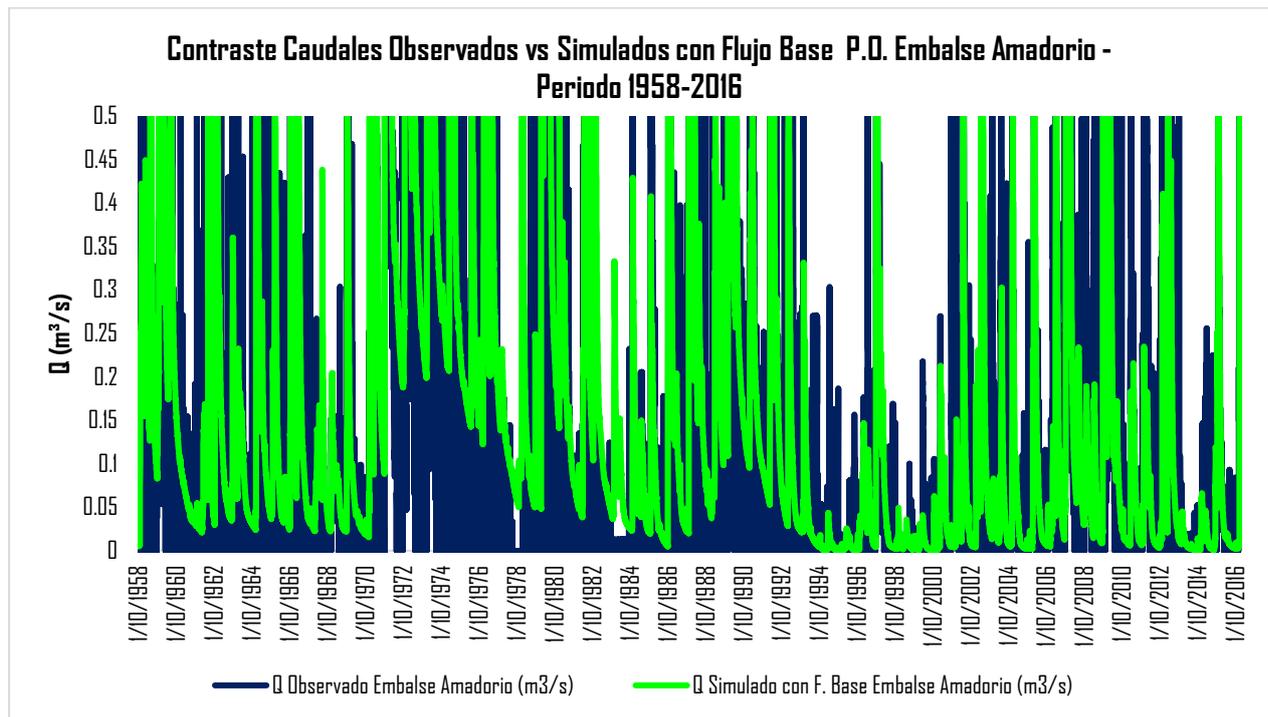


Figura 99 Comparación Q Observado - Q simulado con Flujo Base – P.O. Embalse Amadorio - Periodo 1958-2016.

Por último, con el fin de verificar el grado de afectación de cada una de las variables a la disponibilidad de recursos en el periodo histórico, al igual que en el apartado 7.2 se plantearon distintos escenarios que se explican detalladamente en el siguiente apartado.

8.5 Planteamiento de escenarios para el Largo Plazo.

Se parte de un escenario base que comprende el periodo 01/10/1940-30/09/1981, con la meteorología de este periodo, la regresión de usos del suelo del vuelo de 1956 y sin bombeos al acuífero Local 22 o Sella; para evaluar la influencia de los distintos inputs y cambios en la cuenca se plantearon los siguientes escenarios:

- **Escenario 1 Cambios en los usos del suelo:** Escenario Base con el mapa de usos del suelo de CORINE 2006 y su respectivo mapa de almacenamiento estático Hu.
- **Escenario 2 Aumento en la ETo en la actualidad:** Escenario Base con un aumento de la ETo del +2% para evaluar su incidencia en el periodo actual.
- **Escenario 3 Reducción en la precipitación en la actualidad:** Escenario Base con reducción de 12% en la precipitación que representa el régimen de lluvias actual.
- **Escenario 4 Bombeos al acuífero Local22 y Sella:** Escenario Base con bombeos al acuífero Local22 de 0.68 Hm³/año y Sella de 0.35 Hm³/año a partir de 01/10/1940.

8.5.1 Escenario 1 Efecto de la variación en la cubierta vegetal y usos del suelo.

	Escenario Base	Escenario 1. Usos del Suelo 2006	Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	21.64	21.48	-0.74%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	10.70	10.01	-6.45%
Precipitación (mm/año)	533.22	533.22	0.00%
Evapotranspiración desde Intercepción (mm/año)	83.71	91.40	9.18%
Evapotranspiración (mm/año)	286.24	282.20	-1.41%
Excedente (mm/año)	162.28	158.31	-2.45%
Escurrentía (mm/año)	5.52	5.46	-1.15%
Interflujo (mm/año)	23.01	21.97	-4.52%
Recarga (mm/año)	133.75	130.87	-2.16%
Flujo Base (mm/año)	24.50	22.74	-7.20%
Flujo Subterráneo no conectado (mm/año)	109.25	108.13	-1.03%

Tabla 46. Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario usos del suelo 2006.

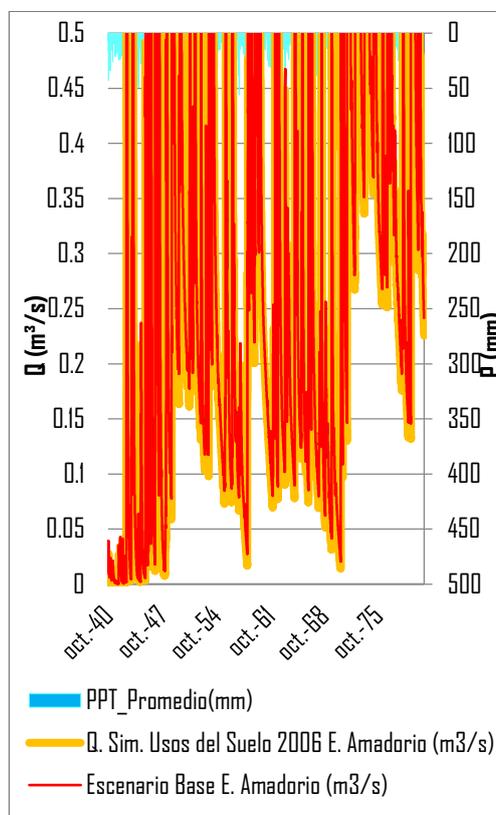


Figura 100 Contraste caudales escenario base y escenario usos del suelo 2006.

En el contraste del escenario 1 se aprecia un leve cambio en los hidrogramas para caudales bajos; en cuanto a los indicadores más importantes se ve un descenso de las aportaciones en -6.45% y se destaca la mayor evapotranspiración por intercepción de +9.18%; también se observa una influencia en otros componentes como el flujo base con una reducción del -7.2% que contribuye a la disminución general de los recursos disponibles en el Amadorio.

8.5.2 Escenario 2 Efecto del aumento de la evapotranspiración de referencia ETo.

El aumento de +2% en la evapotranspiración de referencia resulta menos significativo al analizar el incremento de +0.9 en la evapotranspiración real; esta variación produce una reducción de las aportaciones en -4.0% y del flujo base en -5.8% por mencionar algunos de los componentes del balance hídrico; entre los distintos escenarios el aumento de la ETo presenta una influencia poco significativa, pero clave en la supervisión si se considera que es el flujo de salida más importantes de la cuenca.

	Escenario Base	Escenario 2. Eto +2%	Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	21.64	21.23	-1.9%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	10.70	10.28	-4.0%
Precipitación (mm/año)	533.22	533.22	0.0%
Evapotranspiración desde Intercepción (mm/año)	83.71	84.11	0.5%
Evapotranspiración (mm/año)	286.24	288.90	0.9%
Excedente (mm/año)	162.28	158.92	-2.1%
Escorrentía (mm/año)	5.52	5.34	-3.3%
Interflujo (mm/año)	23.01	22.62	-1.7%
Recarga (mm/año)	133.75	130.95	-2.1%
Flujo Base (mm/año)	24.50	23.07	-5.8%
Flujo Subterráneo no conectado (mm/año)	109.25	107.88	-1.3%

Tabla 47 Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario ETO +2%.

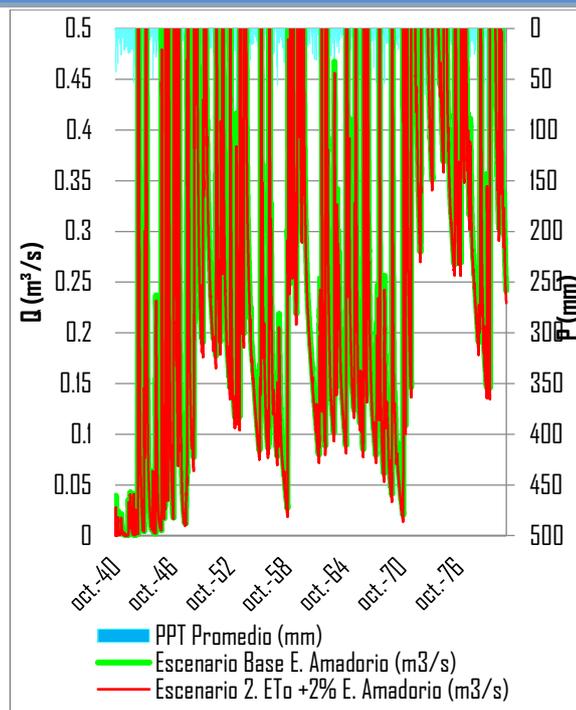


Figura 101 Contraste caudales escenario base y escenario ETO +2%.

8.5.3 Escenario 3 Efecto de la variación en la precipitación.

	Escenario Base	Escenario 3. Precipitación -12%	Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	21.639	14.893	-31.17%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	10.705	4.985	-53.43%
Precipitación (mm/año)	533.216	533.216	0.00%
Evapotranspiración desde Intercepción (mm/año)	83.713	81.543	-2.59%
Evapotranspiración (mm/año)	286.244	271.327	-5.21%
Excedente (mm/año)	162.283	117.741	-27.45%
Escorrentía (mm/año)	5.523	3.171	-42.59%
Interflujo (mm/año)	23.013	15.837	-31.18%
Recarga (mm/año)	133.754	98.726	-26.19%
Flujo Base (mm/año)	24.505	6.786	-72.31%
Flujo Subterráneo no conectado (mm/año)	109.249	91.940	-15.84%

Tabla 48 Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario Precipitación -12%.

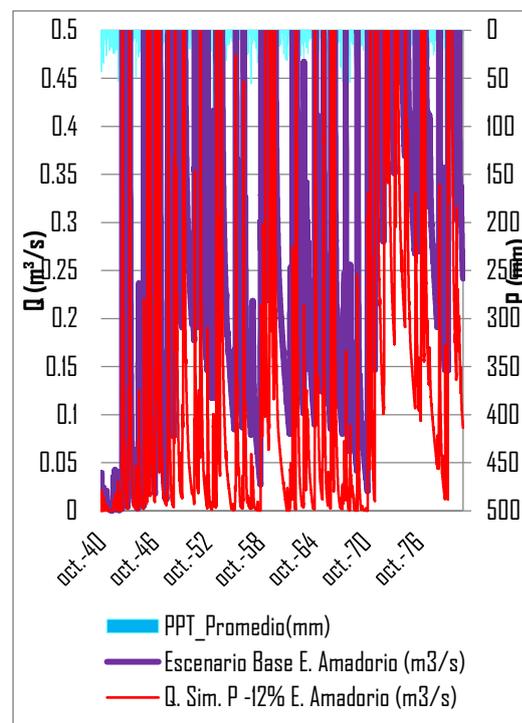


Figura 102 Contraste caudales escenario base y escenario Precipitación -12%.

El escenario 3 presenta el input más influyente del modelo; ya que una disminución de -12% en la precipitación para el modelo, resulta en una reducción de -53.43% de las aportaciones y en sus distintas

componentes como: escorrentía (-42.59%), interflujo (-31.18%) y flujo base (-72.31%); de hecho, el flujo base restante de se produce exclusivamente en el periodo húmedo de los años 70 como se observa en la Figura 102; cabe aclarar, que fue en la década del 70 donde se presentaron los eventos de precipitación más importantes de la serie registrada y por ende las mayores aportaciones.

8.5.4 Escenario 4 Efecto de los bombeos a los acuíferos Local22 y Sella.

	Escenario Base	Escenario4. Bombeos	Variación %
Caudal max. Sim. (m ³ /s)	21.64	21.62	-0.11%
Volumen simulado (Hm ³ /año)	10.70	10.09	-5.79%
Precipitación (mm/año)	533.22	533.22	0.00%
Evapotranspiración desde Intercepción (mm/año)	83.71	83.71	0.00%
Evapotranspiración (mm/año)	286.24	286.24	0.00%
Excedente (mm/año)	162.28	162.28	0.00%
Escorrentía (mm/año)	5.52	5.52	0.00%
Interflujo (mm/año)	23.01	23.01	0.00%
Recarga (mm/año)	133.75	133.75	0.00%
Flujo Base (mm/año)	24.50	21.46	-12.42%
Flujo Subterráneo no conectado (mm/año)	109.25	107.23	-1.85%

Tabla 49 Variaciones más importantes entre el escenario Base y escenario con Bombeos a los acuíferos Local22 y Sella.

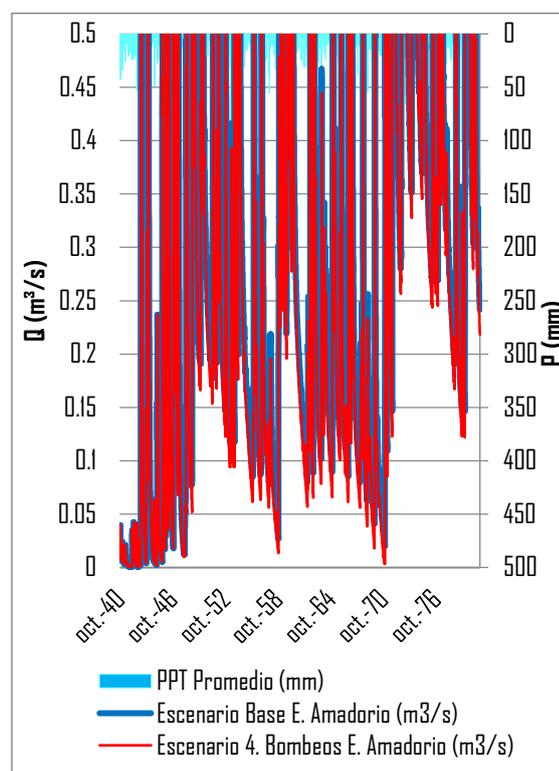


Figura 103 Contraste caudales escenario base y escenario con Bombeos a los acuíferos Local22 y Sella.

Este factor tiene influencia únicamente en los flujos de caudal base y aportaciones totales de la cuenca; en el escenario 4 se simuló el inicio de los bombeos en la cuenca desde el 01/10/1940, una fecha muy temprana si se considera que los primeros registros de los permisos de captaciones se produjeron en los años 80s; sin embargo, en el análisis se observa que aunque el inicio de las extracciones se adelanta su influencia es relativamente baja con una reducción de los volúmenes simulados de -5.79% y -12.42% en el flujo base, que comparado con el -72.31% de disminución por la variación de la precipitación presenta un orden de magnitud de los cambios predominantes en la cuenca en términos de disponibilidad de recursos. La explicación a la poca influencia de los bombeos radica en la diferencia de magnitud entre las extracciones y las recargas; adicionalmente, si se observa el comportamiento de los niveles del acuífero se aprecia que las fluctuaciones corresponden principalmente al aumento o reducción de las recargas más que a las extracciones mismas.

8.5.5 Resumen Escenarios contraste periodo 1940/81 – 1981/2016.

En una síntesis de resultados se observa que la mayor parte de la disminución en las aportaciones y flujo base es atribuible a la reducción de la precipitación, los otros factores, aunque importantes, no resultan determinantes; no obstante, en su conjunto se observa que los distintos cambios son responsables de un 97.73% menos de flujo base, un valor muy cercano al 100% que es lo que en la actualidad se evidencia en la cuenca y en el balance general de recursos para el periodo actual 2000-2016.

RESUMEN DE LA INFLUENCIA DE LOS INPUTS Y PARAMETROS EN LA REDUCCIÓN DE LAS APORTACIONES PERIODO 1940/81 – 1981/2016		
Variable	% Variación en la aportaciones	% Variación en el flujo base
Cambios en los usos del suelo	-6.45%	-7.20%
Aumento de la evapotranspiración	-4%	-5.80%
Reducción de la precipitación	-53.43%	-72.31%
Bombas a los acuíferos Local22 Y Sella.	-5.79%	-12.42%
Total reducción	-69.67%	-97.73%

Tabla 50 Balance de influencia de las variables en la reducción de las aportaciones y el flujo base.



CAPÍTULO 9.

MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE RÍOS TEMPORALES

“En la última década se ha evidenciado un mayor interés en el tema por parte de la comunidad científica, que busca compensar el desinterés histórico en el estudio de esta tipología de cauces” (Datry, 2011)

RIOS TEMPORALES:

Régimen hídrico y caracterización ecológica.

Los ríos temporales se caracterizan por la variabilidad en su caudal circulante e importantes fluctuaciones hidrológicas; estas variaciones a menudo reducen el caudal a pozas aisladas a lo largo del cauce o incluso a la desaparición total de flujo en periodos secos o cálidos (Argyroudi, 2009). De hecho se estima que cerca del 59% de la red fluvial de los Estados Unidos corresponde a este tipo de ríos, excluyendo Alaska (Nadeau, 2007); en el ámbito local, se calcula que la proporción de ríos temporales con respecto al total es de 31% para Cataluña y de 23% para la Demarcación Hidrográfica del Júcar (Vanguardia, 2018).

La importancia del análisis de este tipo de ríos radica en varios factores: a) se prevé un aumento en la aparición de esta tipología de cauces en un futuro cercano debido a los pronósticos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Tooth, 2000), b) el incremento en las demandas de recurso y estrés hídrico favorecen la sobreexplotación de cauces y acuíferos, y la aparición de los mismos, c) fortalecer el conocimiento de los ecosistemas presentes en estos tipos de cauces, d) generar herramientas y conceptos necesarios para aplicar las regulaciones ambientales correspondientes, entre otros. Debido a esto, en la última década se ha evidenciado un mayor interés en el tema por parte de la comunidad científica, que busca compensar el desinterés histórico en el estudio de esta tipología de cauces (Datry, 2011).

Los ríos temporales han sido clasificados hidrológicamente por (Levick, 2008) en términos cualitativos como “intermitentes si existe tramos del cauce con flujo continuo por algunos periodos del año, y efímeros si se evidencia flujo únicamente en respuesta a la precipitación en el mismo instante de tiempo, su lecho se encuentra siempre por encima del nivel freático del acuífero y en la mayor parte del año permanece sin caudal”. No obstante, en países como España se pueden encontrar clasificaciones de tipo cuantitativo tales como “Un río es definido como temporal si cuenta con flujo más de 300 días al año; los ríos intermitentes son aquellos que cuentan con flujo entre 100 y 300 días por año; y se denominan efímeros aquellos que la presencia de flujo está por debajo de los 100 días por año (Magdaleno, 2009).

Por otra parte, Gallart et al. (2012), presentan una descripción del régimen del río basado en una secuencia de “estados acuáticos”. Estos estados resumen el conjunto de mesohabitats que ocurren en momento dado dependiendo de las condiciones hidrológicas del medio. Fueron 6 los estados acuáticos definidos que van en orden de húmedo a seco:

- Hiperreico: Asociado a condiciones de inundación, causa un movimiento importante en los aluviones del lecho del río y la remoción de la mayor parte de la fauna acuática en él ubicada.

Observaciones en ríos temporales sugieren que tales condiciones de inundación causan fuertes perturbaciones, pero de corta duración en las comunidades acuáticas, mientras que su ocurrencia se considera altamente relevante para el bienestar de los sistemas fluviales. En ríos de baja pendiente de áreas secas, las inundaciones excesivas pueden ser periodos de mayor productividad biológica debido a la liberación de nutrientes de sedimentos y detritos en la llanura aluvial.

- Eurreico: la descarga de agua es lo suficientemente alta como para permitir la aparición de todos los hábitats acuáticos disponibles al alcance, y una conectividad hidráulica óptima entre los diversos hábitats. Este es el estado habitual en las corrientes permanentes y el que cuenta con mayor disponibilidad de microhábitats.
- Oligorreico: en este estado acuático la descarga de agua es baja pero suficiente para conectar la mayoría de pozas a través de riachuelos; comunidad de macroinvertebrados puede seguir siendo efectiva para la bio-monitorización, pero termina asemejándose a las comunidades de rivera debido a la disminución del flujo y el aumento de hábitats lenticos.
- Arreico: el flujo superficial es nulo o cercano a cero, pero varias pozas de agua permanecen en el cauce. Se puede tener flujo subsuperficial y por ende conectividad subterránea del agua, lo que permite la preservación de la calidad fisicoquímica del agua en las pozas durante un mayor tiempo. Si el lecho del cauce es impermeable, las pozas tienden a presentar deterioro en su calidad y tras varias semanas las pozas tienden a desaparecer por evaporación. La importancia del análisis de la existencia de pozas se debe a que juegan un papel fundamental en la ecología de ríos como refugio de muchas especies durante largos periodos entre eventos de flujo.
- Hiporreico: Ausencia total de agua de agua superficial, aunque los aluviones del lecho permanecen húmedos lo cual permite la existencia de ciertos organismos en este medio. Su importancia radica en que sirve como refugio para muchos animales cuando no hay agua superficial, por lo cual debe ser considerado también un mesohábitat acuático.
- Edáfico: no se evidencia agua ni en la superficie ni en los aluviones del lecho del cauce. La vida activa en los aluviones es similar a la vida edáfica en los suelos interfluviales. Solo se observa fauna terrestre y si este estado persiste por semanas, el lecho del río puede ser invadido por plantas terrestres, creando un ecosistema diferente.

A pesar de los esfuerzos de distintos investigadores en clasificar de manera adecuada los ríos de acuerdo a su temporalidad, hasta hace poco no se contaba con metodologías que permitieran caracterizar de forma adecuada la intermitencia de flujo, el régimen de caudales, grado de alteración y correlacionar de los ecosistemas y las especies presentes para el ámbito de los ríos temporales. Recientemente, se han

desarrollado dos metodologías para ríos temporales mediterráneos que proveen alternativas para gestores y académicos interesados en el área:

9.1 Patrones de flujo en ríos temporales: un enfoque metodológico aplicado al sur de Iberia (J. Delso, 2017).

Esta metodología desarrollada en conjunto por la Universidad de Aalborg de Dinamarca, el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) y la Universidad Politécnica de Madrid ha sido aplicada a doce ríos en la cuenca Guadiana (diez en España y dos en Portugal), y su proceso se divide en tres fases:

- a) Un análisis de los aforos de caudal de los ríos en estudio, para posteriormente establecer un umbral de escorrentía por debajo del cual las mediciones se considerarán prácticamente cero (0). Con esto se busca generar una uniformidad y comparabilidad entre los distintos puntos de medición de flujo; por otra parte, aunque algunas estaciones de aforo logran medir caudales muy bajos, estos no tienen una gran relevancia en términos ecológicos. Distintos umbrales han sido usados por entidades gestoras e investigadores, por ejemplo, valores de 1 o 2 Lt/s han sido usados por algunas agencias españolas (CHG, 2015), mientras otros autores han aplicado valores por encima de los 5 Lt/s (Gustard, 1992); en esta metodología se busca establecer los umbrales entre 0 – 10 Lt /s de acuerdo a los criterios de los gestores y las características de la cuenca en estudio.
- b) Se proponen tres parámetros de intermitencia, designados como P1, P2 y P3; estos parámetros podrían considerarse como indicadores de frecuencia, duración y magnitud de los periodos sin flujo, los parámetros se describen como:
 - P1: número de años sin flujo diario en mes i ($NQ = 0$), como indicador de frecuencia de los periodos de interrupción de caudal.
 - P2: número medio de días sin flujo en el mes i , como indicador de la duración del periodo sin flujo.
 - P3: volúmenes mensuales medios que fluyen a través de la estación de medición (V_m) como un indicador de la magnitud de tales periodos de ausencia de caudal.

Estos indicadores permiten analizar la variación intra-anual e inter-anual a escala mensual; se selecciona esta escala por resultar más práctica y común entre los organismos gestores de cuenca.

- c) Para caracterizar el patrón de flujo de los ríos temporales se proponen en primera medida analizar los resultados de las ponderaciones de los parámetros de intermitencia P1, P2 y P3. Por

ejemplo, en el porcentaje de P1 se revisará el número de años sin flujo comparado con el número total de años de la muestra, todo a escala mensual como se mencionó anteriormente; para el porcentaje de P2 será el número total de días sin flujo comparado con el número total de días del respectivo mes en estudio y por último el porcentaje de P3 será el volumen medio del mes en estudio comparado con la media mensual para todos los años de la muestra.

Finalmente, para estudiar la variabilidad interanual de los periodos sin flujo, se implementa el software IAHRIS (Indicadores de Alteración Hidrológica en Ríos) (Martínez, 2008). Entre otros resultados, este software clasifica series de flujo en años húmedos, normales y secos. Con los resultados para cada categoría, la variabilidad interanual puede ser analizada y patrones comunes en el comportamiento de los periodos sin flujo pueden ser categorizados para cada tipo de año.

9.2 Project LIFE+TRivers: TREHS a tool to assess Temporary Rivers` Ecological and Hydrological Status (F.E.M., 2015).

El proyecto LIFE+ TRivers (Implementing the Water Framework Directive to temporary rivers: tools for the assessment of their ecological status) cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea y coordinado por el grupo de investigación F.E.M. de la Universidad de Barcelona, parte de los estados acuáticos definidos por Gallart et al. en el 2012 y presenta algunas alternativas importantes a la gestión de ríos temporales (F. Gallart, 2016).

La información hidrológica para evaluar el régimen de ríos temporales es a menudo escasa o inexistente; la escasez de datos de aforo imposibilita la caracterización del régimen hidrológico de los ríos temporales y, en consecuencia, la selección de los periodos y métodos correctos para determinar su estado ecológico. Para ello, esta metodología permite la incorporación de información de tipo cualitativa además de la cuantitativa obtenida por los aforos y los modelos de simulación hidrológica; la primera alternativa son entrevistas a habitantes de la zona de estudio o en contacto con el cauce, este tipo de información permite recopilar datos del régimen hidrológico del río, así como datos que no se registran en las estaciones de aforo como son la existencia de pozas en ausencia de flujo. La segunda alternativa consiste en el análisis de fotografías aéreas de alta resolución y libre acceso con proveedores globales como Google Earth o locales como el Instituto Geográfico Nacional (IGN) o el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC) con las cuales se puede estimar el régimen acuático de los ríos; aunque en ocasiones la vegetación densa puede impedir la inspección del canal (F. Gallart, 2016).

Esta metodología se basa en 4 niveles mediante los cuales se establecen métricas descriptivas del cauce en estudio (nivel 1 y 2), se caracteriza un hidrotipo a partir de los umbrales de caracterización hidrológica (nivel3); por último, se asigna un ecotipo (nivel 4) que nos presenta los indicadores de calidad biológica,

fisicoquímica y hidromorfológica aplicables a la masa según el hidrotipo en el que se clasifica en el nivel 3, así como su calendario óptimo de muestreo.

Nivel 1 Grafica de Frecuencia de los Estados Acuáticos (ASFG): Esta figura resume los patrones estacionales de los estados acuáticos en forma de frecuencias mensuales de ocurrencia durante un año hidrológico. La es un ejemplo de un cauce mediterráneo en la cuenca de Celone at San Vincenzo y su ASFG:

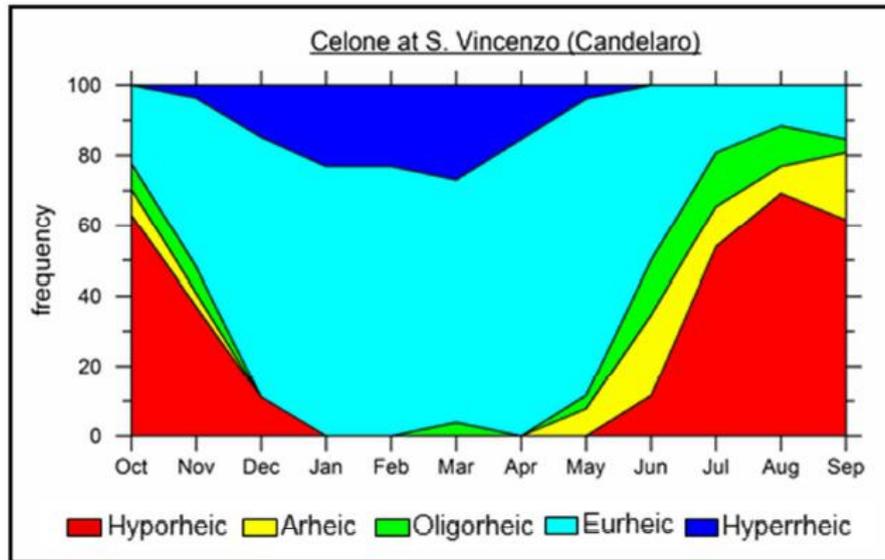


Figura 104. Grafica de Frecuencia de los Estados Acuáticos – Celone at San Vincenzo.

Nivel 2 Métricas del Régimen Temporal: Las dos métricas principales de esta metodología son:

1. *Permanencia de Flujo, Pozas y seco (Mf, Mp y Md):* se basa en una media anual de los meses con flujo, con pozas y secos respecto a los meses totales, este índice puede tomar valores entre 0 y 1.
2. *Predictibilidad Semestral de periodos secos (Sd6):*

$$Sd_6 = 1 - \left(\frac{\sum_1^6 Fd_i}{\sum_1^6 Fd_j} \right)$$

Ecuación 9. Predictibilidad semestral de periodos secos.

Donde Fdi representa la frecuencia multianual de ausencia de flujo para los 6 meses continuos más húmedos del año; por otra parte, Fdj representa la frecuencia multianual de ausencia de flujo para los 6 meses continuos más secos. Esta variable es adimensional y toma el valor de 0 cuando la ausencia de flujo ocurre por igual a lo largo del año en el largo plazo y 1 cuando la ausencia de flujo tiende a ocurrir en el mismo período de 6 meses cada año.

Nivel 3 Clasificación de los hidrotipos a partir de la pirámide FDP: Las métricas obtenidas en el nivel 2 pueden ser mejor interpretadas a partir del esquema FDP; este nos permite identificar el hidrotipo en el que se ubica el río en estudio, para ello se han definido 8 hidrotipos en el esquema piramidal: Cuasi-perenne (Qp); Alternado fluyente (AF); Flujo estancado (FS); Estancado (St); Alternado estancado (AI); Ocasional (Oc) y Episódico (Ep).

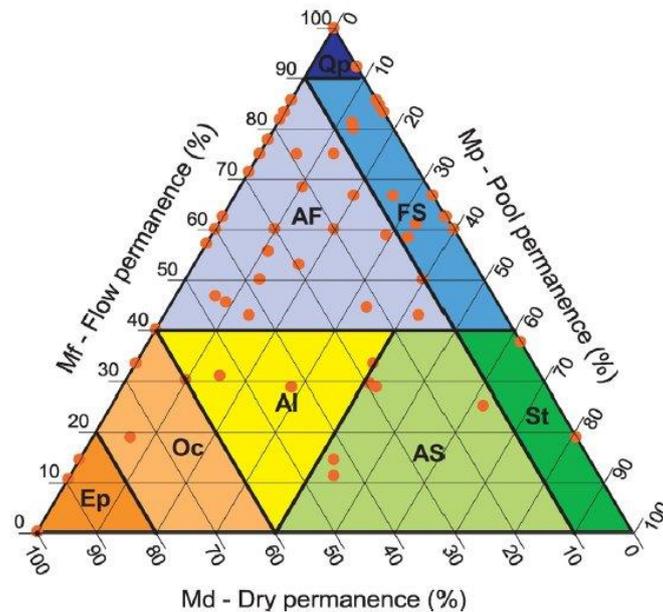


Figura 105. Esquema FDP Clasificación de los hidrotipos.

Nivel 4 Clasificación de los ecotipos: Este último nivel se centra en categorizar los hidrotipos en tres ecotipos a partir de los cuales se aplicarán los protocolos de indicadores biológicos, físico-químicos e hidromorfológicos que en cada caso correspondan; el esquema

- | | | |
|---|---|---|
| <p>Qp Cuasi-permanente.
AF Alternado fluyente.
FS Flujo estancado.</p> | } | <p>ECOTIPO 1: La tipología del cauce es similar a la de los ríos perennes, pero se deben ajustar los parámetros con umbrales inferiores por las características de los mismos. Índices aplicables: Calidad biológica, físico-</p> |
| <p>St Estancado.
AS Alternado</p> | } | <p>ECOTIPO 2: Este ecotipo se asemeja más a las características de los lagos y estanques; la alternativa a evaluar es la de los parámetros de calidad que en la IPH se aplica para lagos con algunos ajustes. Índices aplicables: Calidad biológica, físico-química e hidromorfológica.</p> |
| <p>AI Alternado.
Oc Ocasional
Ep Episódico</p> | } | <p>ECOTIPO 3: Este último ecotipo se asemeja al de los ríos efímeros y ramblas, por la ausencia de caudal en la mayoría de casos a lo largo del año solo es posible la aplicación del protocolo hidromorfológico sin posibilidad de evaluación de la calidad biológica y físico-química.</p> |

Agencia Catalana del Agua (ACA) y la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) han implementado proyectos aplicando esta metodología en conjunto con modelación hidrológica y ambiental; todo en busca de caracterizar esta tipología de cauces tan abundante en el Mediterráneo, pero a su vez tan desconocida.



CAPÍTULO 10.

APLICACIÓN AL MODELO TREHS.

TREHS ha permitido conocer el régimen hidrológico real y clasificar de nuevo las masas temporales, y a partir de esta información, rehacer las rutinas de muestreo y de evaluación” (Sola, 2018)

CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA DE LAS MASAS EN LA CUENCA DEL EMBALSE AMADORIO CON TREHS.

A partir del modelo calibrado y validado en el capítulo 6 se generaron las series de caudales en régimen natural para cada una de las masas de la cuenca del E. Amadorio; aplicando la metodología del proyecto TRivers con la herramienta TREHS se obtuvo los siguientes resultados:

10.1 Río Amadorio aguas arriba del embalse.

Para representar el comportamiento hidrológico del río se tomó como punto de referencia la estación de aforo Río Amadorio con código 8078 que fue validada en el modelo; al analizar el régimen natural del periodo reciente en el modelo a escala diaria, se encontró una permanencia de caudal cercana al 36.4% como se observa en la Figura 106.

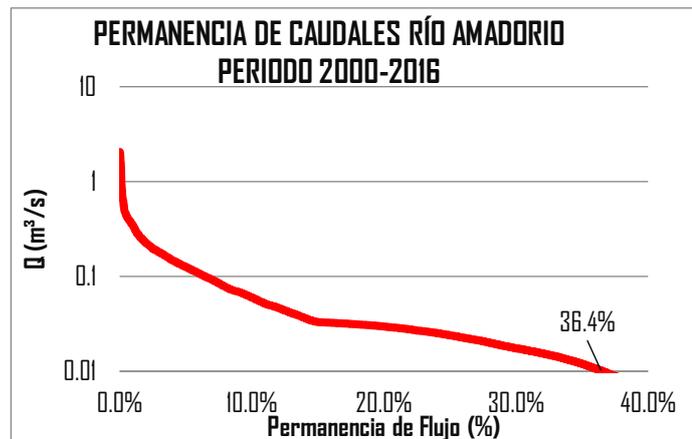


Figura 106 Permanencia de caudal en el río Amadorio en el periodo 2000-2016.

La herramienta TREHS implementa los valores medios diarios en m^3/s a escala mensual; por ello, fue necesaria la agrupación de las series obtenidas para los distintos meses en estudio, a partir de las simulaciones se obtuvo el gráfico de frecuencia de los estados acuáticos observado en la Figura 107, en él se aprecia una mayor predominio del estado hiperreico; no obstante, existe un área correspondiente al flujo eurreico muy importante.

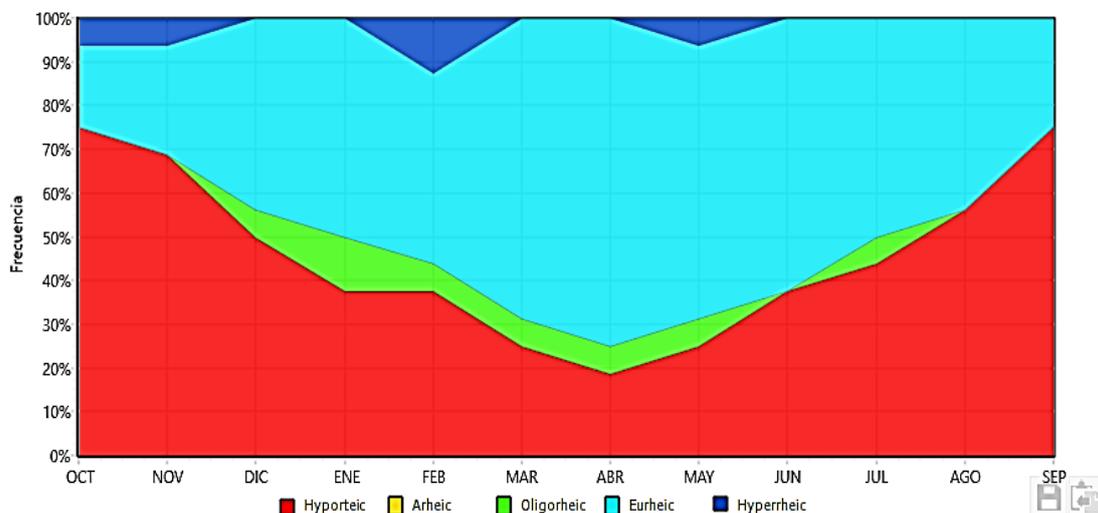


Figura 107 Gráfica de Frecuencia de los estados acuáticos Río Amadorio (ASFG) Periodo 2000-2016.

TREHS también integra dentro de su análisis la permanencia de caudal, que como se puede observar en la Figura 108 se sitúa cercana al 40%; valor que corresponde con lo registrado en la Figura 106, a partir de los valores observados, y aplicándolo a la gráfica FDP se encontró que la masa Amadorio se puede clasificar dentro de los hidrotipos como un río Ocasional dada permanencia de flujo M_f de cercana a 0.4 y su M_d permanencia sin flujo de 0.6.

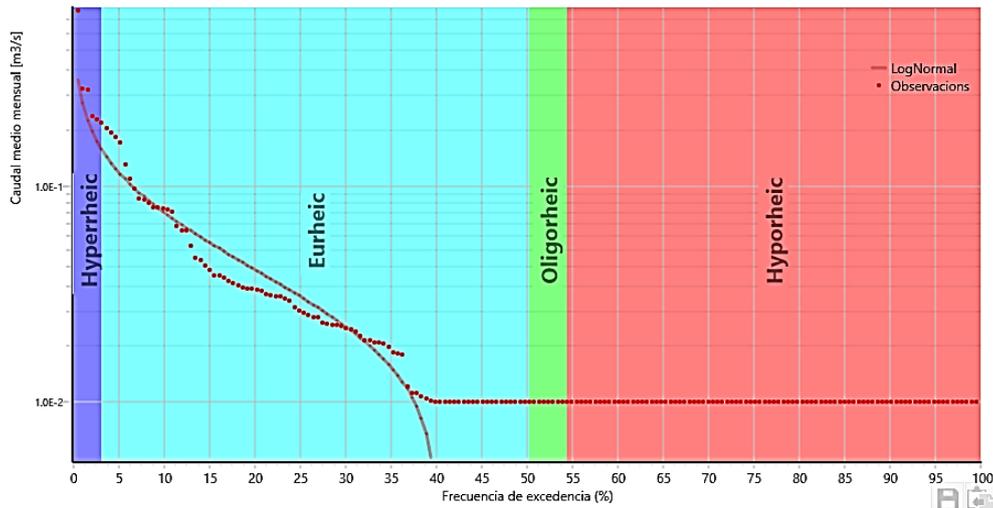


Figura 108 Permanencia de flujo TREHS Río Amadorio Periodo 2000-2016.

Con el fin de corroborar lo estudiado y obtener más conocimiento de la zona de estudio el pasado 27/02/2018 se realizó una visita técnica a la zona de estudio, donde se encontró para la vertiente del río Amadorio antes de la entrada al embalse el comportamiento típico de un río efímero, sin vegetación en el lecho del cauce y con escasa vegetación de ribera; la fotografía de la Figura 109 muestra el canal del Amadorio antes de la entrada al embalse.



Figura 109 Visita técnica 27/02/2018 Río Amadorio antes de la entrada al embalse.

En contraste a lo observado en la actualidad se aplicó la herramienta TREHS a la serie 1921-1980y se obtuvieron los siguientes resultados:

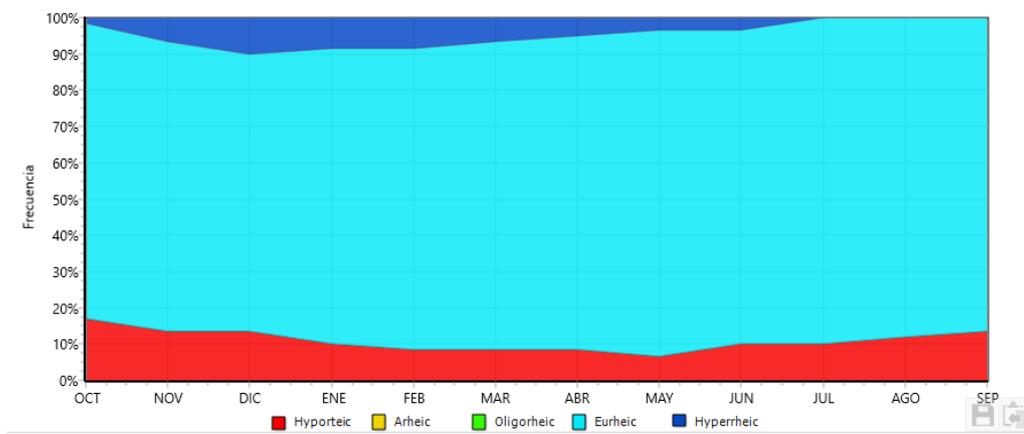


Figura 110 Grafica de Frecuencia de los estados acuáticos Río Amadorio (ASFG) Periodo 1921-1980.

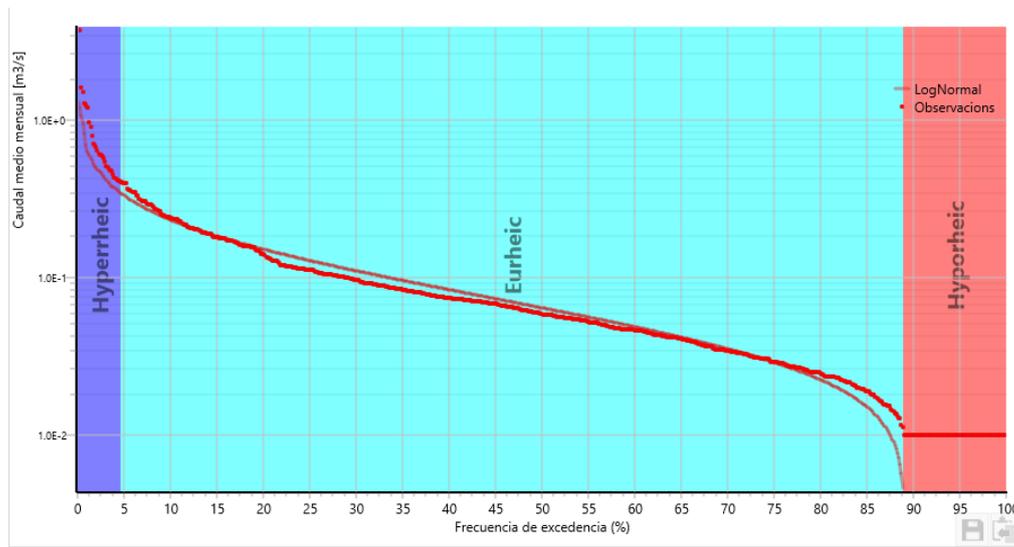


Figura 111 Permanencia de flujo TREHS Río Amadorio Periodo 1921-1980.

Como se puede apreciar en la Figura 112 y en la Figura 113, en el periodo histórico entre 1921 y 1980 el río Amadorio aguas arriba del embalse respondía a un hidrotipo alternado fluyente con una permanencia cercana al 90% y un estado acuático eurreico predominante; situación muy diferente a la actual donde la reducción de la precipitación como ya se ha observado, ha ocasionado la desconexión del río y el acuífero.

10.2 Río Sella.

Para el río Sella se analizaron las aportaciones simuladas en la E.A. 8024, al estudiar el periodo 2000-2016 se encontró una permanencia de cerca del 66% como se indica en la Figura 112.

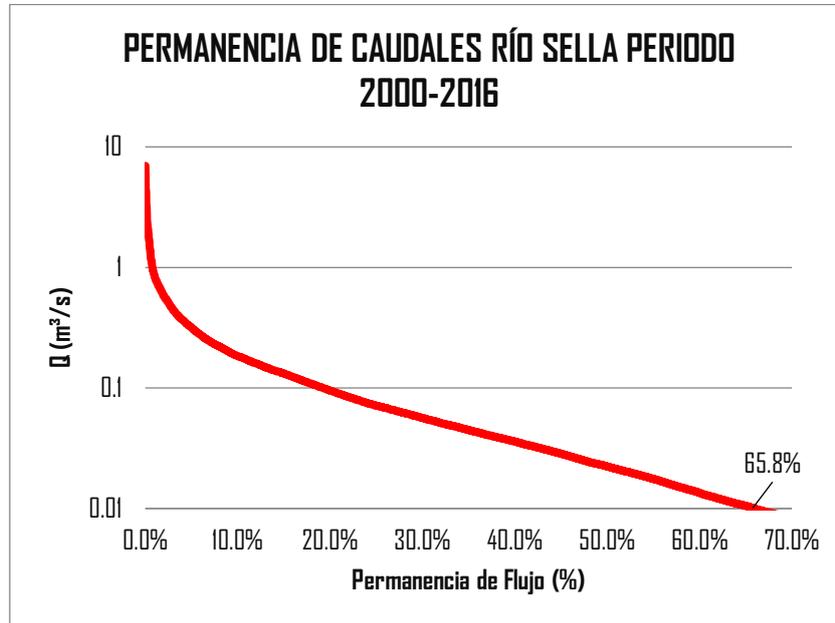


Figura 112 Permanencia de caudal en el río Sella en el periodo 2000-2016.

Al igual que en el río Amadorio, para el Sella se aplicó la herramienta TREHS para caracterizar hidrológicamente la masa a partir de los hidrogramas simulados con el modelo hidrológico TETIS; el primer output es la conocida grafica de frecuencia de estados acuáticos que nos muestra un predominio del flujo eurreico y la primavera como periodo ideal para toma de muestras con una probabilidad de cerca del 90%.

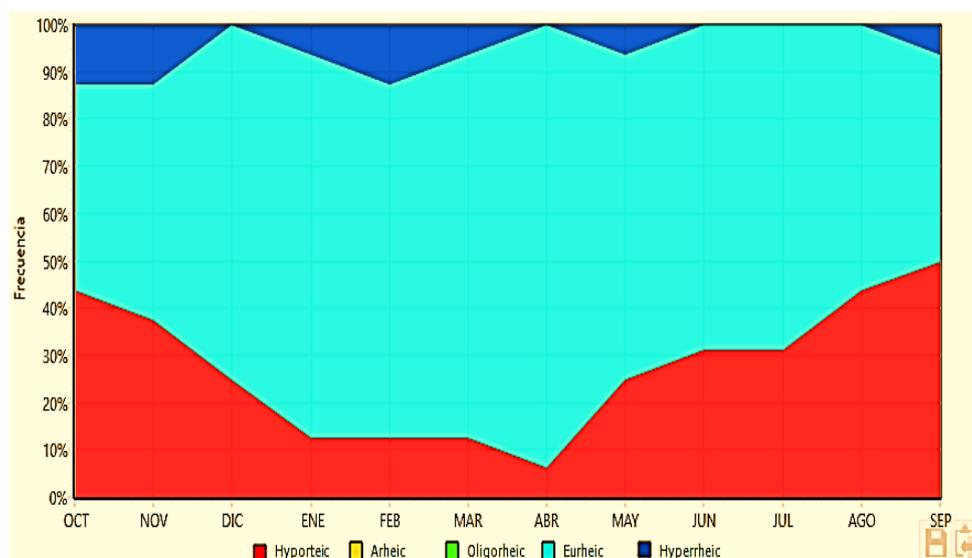


Figura 113 Gráfica de Frecuencia de los estados acuáticos Río Sella (ASFG).

La grafica de permanencia de caudal generada por TREHS coincide de manera cercana con lo observado en la Figura 112 situando su valor en cerca del 70%; a partir de los distintos indicadores de permanencia de flujo y los distintos estados acuáticos se clasifico el hidrotipo de la masa Sella como Alternado fluvente.

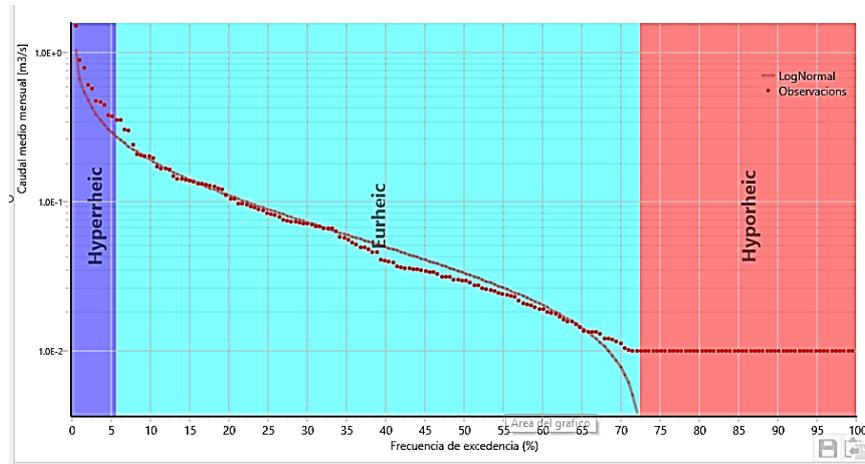


Figura 114 Permanencia de flujo TREHS Río Sella Periodo 2000-2016

Como parte de la visita técnica del 27/02/2018 en la fotografía de la Figura 115 se muestra el río Sella antes de la entrada al embalse; aunque con poco caudal, se observa el comportamiento de un río temporal con una importante presencia de caudal, también se aprecia vegetación en la ribera y en el lecho del cauce; por ello, uno de los énfasis del presente estudio está en promover el cuidado y protección de este cauce que sirve de ecosistema para muchos organismos en la cuenca, así como alentar a los gestores y a la ciudadanía en general de la importancia de la aplicación de un caudal ecológico estacional aguas abajo del embalse Amadorio entre los meses de diciembre y junio para conservar el régimen hidrológico natural del cauce y el buen estado ecológico del mismo.



Figura 115 Visita técnica 27/02/2018 Río Sella antes de la entrada al embalse.



CAPÍTULO 11.

CONCLUSIONES.

“Porque no puede haber certeza de la última conclusión sin que la haya de todas las afirmaciones sobre las que estuvo basada y de las que fue inferida” (Hobbes, 1651)

CONCLUSIONES

Los ríos temporales en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, y en especial la cuenca del Embalse Amadorio son una zona de especial interés entre los distintos usuarios; los recursos desembalsados para cumplir el caudal ecológico marcado por la ley son un punto de controversia entre los distintos gestores y operadores; no obstante, para analizar la temporalidad en régimen natural de los cauces aguas arriba del embalse es necesario, en primera medida, estudiar los distintos cambios en la cuenca y como han podido influir en la producción de recursos; por ello, se planteó como eje de esta investigación dos interrogantes relacionados con el régimen hidrológico histórico de la cuenca:

- 1) ¿Que ha causado la reducción de aportaciones al embalse Amadorio observada a partir de los 80s?
- 2) ¿Qué factores han afectado el régimen hídrico natural de los ríos Amadorio y Sella en el periodo histórico y como tales cambios han influido en la conexión del río y el acuífero de los cauces?

Para resolver estos interrogantes se desarrolló el modelo hidrológico de la cuenca con la herramienta TETIS, para su elaboración se recopiló información distribuida de distintas fuentes como el IGME, ESDB, IGN, AEMET y la CHJ; a partir de estos datos se generaron mapas con información espacial a escala de cuenca que pueden ser aplicables a nuevos proyectos en la demarcación.

El modelo calibrado representó adecuadamente las aportaciones de la cuenca a escala diaria y anual, presentando un índice de Nash muy bueno (0.7343), si se consideran las distintas fuentes de incertidumbre; en la validación temporal los caudales simulados por el modelo conservaron un comportamiento cercano al real en la cuenca con un índice de Nash de 0.5449. La validación temporal y espacial, aunque con índices de eficiencia por debajo del esperado, presento unos hidrogramas que muestran congruencia entre lo modelado y lo observado, reproduciendo de gran manera la permanencia de caudal para los distintos cauces; es por estos resultados favorables que el modelo se dio por válido para aplicarlo a distintos escenarios y evaluar su incidencia en la producción de recursos.

La fase de evaluación de los factores más influyentes en el régimen de los cauces se ejecutó en dos etapas: En la primera etapa entre 1970-2016 se encontró que una tendencia negativa en la precipitación sería la responsable de la reducción de recursos en aproximadamente un 47%, seguida de los cambios en la cubierta vegetal con un 7.6% y el aumento de la ETo en 5.1%. Sin embargo, al estudiar un periodo más amplio en la segunda etapa entre 1921-2016, aplicando una interpolación de información meteorológica desde otra cuenca para superar el déficit de datos en la zona de estudio, se encontró que un salto en la precipitación en los años 80s y no una tendencia negativa era la principal responsable de

la reducción de recursos y de la desaparición del flujo base de los cauces observado a principios del siglo XX; por otra parte, los cambios en los usos del suelo, los bombeos y el aumento de la ETo, aunque influyentes, no resultan determinantes en la reducción de recursos y en el cambio en la relación río acuífero en el Amadorio y Sella.

Finalmente, una vez se determinó que la disminución de aportaciones y cambios en el régimen del cauce eran atribuibles especialmente a un cambio climático histórico (efecto 80), se procedió a aplicar los caudales simulados por el modelo en régimen natural a la metodología del proyecto TRivers con su herramienta TREHS; a partir de esta, se corroboró que el río Amadorio antes del embalse, presenta para el periodo actual, un comportamiento similar al de un río efímero u ocasional como lo indica el hidrotipo de TREHS, con una permanencia de caudal cercana al 40%; por otra parte, el río Sella con una permanencia de cerca del 70% fue catalogado como un río temporal o alternado fluyente como lo indica su hidrotipo, esto sugiere que aunque no es permanente, su régimen permite la existencia de distintos organismos macroinvertebrados y desarrollo de ecosistemas en torno al cauce; por esta razón se sugiere mantener un caudal ecológico como mínimo entre los meses de diciembre a junio aguas abajo del embalse Amadorio, así como promover el cuidado y protección del cauce y de los distintos ecosistemas que de él dependen aguas arriba del embalse.



CAPÍTULO 12.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

“Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes” (Newton, 1687)

BIBLIOGRAFÍA

- Agroptima. (Junio de 2018). Obtenido de www.agroptima.com
- Argyroudi, A. e. (2009). Do intermittent and ephemeral Mediterranean rivers belong to the same river type? *Aquatic Ecology*, 43, 465-476.
- CHG. (2015). *Revisión del Plan Hidrológico de la Parte Española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Climent Brotons, J. F., Salgot de Marçay, M., & Soler, M. (22 de Marzo de 2017). *RelleuPantano.blogspot.com.es*. Obtenido de Evaluacion del Estado de la Antigua Presa de Relleu, Perspectivas Futuras: relleupantano.blogspot.com.es/2017/04/20170317-evaluacion-del-estado-de-la.html
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2017). Base de Datos GESHIDROLAN. Valencia, Valencia, España.
- Datry, T. A. (2011). Recent perspectives on temporary river ecology. *Aquatic Science*, 453-457.
- DMA. (2000). *Directiva Marco del Agua 2000/60/CE*.
- Duan, Q. S. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. . *Journal of Hydrology*, Vol. 158, p. 265-284.
- Eckhardt, K. y. (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. . *Journal of Hydrology*, Technical note, Vol. 251, p. 103-109.
- F. Gallart, P. L. (2016). Validating alternative methodologies to estimate the regime of temporary rivers when flow data are unavailable. *Science Direct*.
- F.E.M. (2015). *Deliverable 9: The TREHS manual*. Barcelona: Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, UB.
- FAO56. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
- Gallart, F. P.-R. (2012). A novel approach to analyzing the regimes of temporary streams in relation to their controls on the composition and structure of aquatic biota. *Hydrology Earth Syst. Science*.

- GIMHA. (2018). *Descripción Del Modelo Conceptual Distribuido De Simulación Hidrológica Tetis V.9*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- GIMHA. (21 de 05 de 2018). *GIMHA - Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental*. Obtenido de <http://lluvia.dihma.upv.es/ES/software/software.html>
- Grayson, R. B., & McMahon, I. D. (1992). *Physically based hydrologic modeling. 1. Terrain-based Model for investigative purposes*. . Water Resources Research Vol 28, no 10, p 2639-2658.
- Gustard, A. B. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*. Wallingford: Institute of Hydrology.
- Hobbes, T. (1651). *Leviatán*.
- ICV. (2017). *Instituto Cartografico Valenciano*. Obtenido de <http://www.icv.gva.es/ca/inicio;jsessionid=B100B25F0E6FFA01070FB85974BFEDD6>
- IGME. (2011). *informe sobre la caracterización Básica De Las Masas De Agua Subterránea De La Confederación Hidrográfica Del Júcar*. Instituto Minero y Geológico de España.
- IVIA. (2017). *Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias IVIA*. Obtenido de <http://www.ivia.gva.es/>
- J. Delso, F. M.-Y. (2017). Flow patterns in temporary rivers: a methodological approach applied to southern Iberia. *Hydrological Sciences Journal*.
- Levick, L. e. (2008). *The ecological and hydrological significance of ephemeral and intermittent streams in the arid and semi-arid*. Washington,DC: SouthwestWatershed.: Research Center: U.S. Environmental Protection Agency and USDA/ARS.
- Magdaleno, F. (2009). *Manual técnico de cálculo de caudales ambientales*. Madrid.: Colegio de Ingenieros de Caminos, canales y puertos.
- Martinez, C. e. (2008). *IAHRIS: new software to assess hydrologic alteration*. . Venice: European Centre for River Restoration.
- Meulen, L. T. (18 de 04 de 2016). Piden que "cese el desembalse de caudales" del Amadorio y Guadalest. *EL MUNDO*.
- Miguel A. Pérez-Martín, W. T. (2012). Cambios en las series hidrológicas de los últimos 30 años y sus causas. *El Efecto 80*. . *Universitat Politècnica de Valencia, Confederación Hidrográfica del Júcar*.

- Museo de Relleu. (2008). Estudios sobre agua, construccions hidràuliques. Homenatge al Reg Major, etc. *Revista semestral del Museo Histórico-Etnológico*, 4.
- Nadeau, T. R. (2007). Hydrological connectivity of headwaters to downstream waters: Introduction to the featured collection. *Water Resources*, 43, 1.
- Newton, I. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*.
- Pacheco, R. R. (2017). *Análisis de la implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS en el ámbito regional de la demarcación hidrográfica del Júcar utilizando información estándar*. Valencia.
- RETEMA. (21 de 05 de 2018). *RETEMA*. Obtenido de <https://www.retema.es/noticia/ya-disponible-la-version-9-0-del-modelo-hidrológico-distribuido-tetis-8n5B9>
- Samani, Z. (1998). *Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation)*. Nuevo Mexico: New Mexico State University.
- Santander Meteorology Group. (2017). *Metereo.Unican*. Obtenido de <http://www.meteo.unican.es/en/main>
- Singh, V. P. (1989). *Hydrologic Systems. Vol II. Watershed Modeling*. New Jersey 320 p.: Prentice Hall.
- Sola, C. (Mayo de 2018). Investigadores y representantes de la Administración proponen una nueva tipología de los ríos temporales para poder garantizar su conservación. (N. d. tecnología., Entrevistador)
- Teodoro Estrela Monreal, F. C.-R. (1999). *Libro Blanco del Agua*. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos. Centro-de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Tooth, S. (2000). Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. *Earth Science*, 67-107.
- Vanguardia, L. (05 de 05 de 2018). Proponen nueva tipología de ríos efímeros, los que se secan cuando no llueve. *La Vanguardia*.
- Vélez, Q. y. (2004). La cuenta física del agua mediante modelación hidrológica distribuida. *Gestión y Ambiente*.
- Vicente, A. (12 de 03 de 2018). Ecologistas y regantes de Altea y Benidorm, en contra del desembalse del Amadorio. *Diario Informacion*.



- Vicente, A. (27 de 02 de 2018). El Amadorio vuelve a verter agua al mar y provoca las quejas de Consorcio y regantes. *Diario Información*.
- Vicente, A. (13 de 03 de 2018). La Confederación del Júcar cede a la presión y deja de desembalsar agua en Amadorio y Guadalest. *Diario Información*.
- Vicente, A. (01 de 03 de 2018). Los hoteleros se suman al consorcio y regantes contra el desembalse del Amadorio en la Vila Joiosa. *Diario Información*.
- Vicente, A. (01 de 03 de 2018). Los hoteleros se suman al consorcio y regantes contra el desembalse del Amadorio en la Vila Joiosa. *Diario Información*.
- Wosten, J. (2006). *Hypres Database of Hydraulic Properties of European Soils* . Netherlands: DLO Winand Staring Centre for Integrated Land Soil and Water Research.