

Impacto del Cambio climático en los Recursos Hídricos de la cuenca del río Ter en el embalse de Sau



Evaluación del impacto producido por el cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ter en el embalse de Sau.

BALFAGON SOLER, Rebeca
FERNÁNDEZ TOBAR, Paula

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS Y ÁMBITO DE ESTUDIO	5
3. CARÁCTERÍSTICAS DE LA CUENCA	6
4. CALCULO DE LAS APORTACIONES AL EMBALSE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROMETEOROLÓGICO.....	6
4.1. DETERMINACIÓN DE APORTACIONES CON EL MODELO SACRAMENTO ...	6
4.2. DATOS DE PARTIDA	9
4.3. MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ.....	9
4.4. MONTAJE DEL MODELO Y METODOLOGÍA.....	10
4.5. CALIBRACIÓN.....	11
4.5.1. Descripción del proceso.....	11
4.5.2. Resultados obtenidos.....	12
4.5.3. Conclusiones	14
4.6. VALIDACIÓN.....	15
4.7. SIMULACIÓN/RESULTADOS.....	15
5. CÁLCULO DE LAS APORTACIONES CON LAS SERIES DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS.....	17
5.1. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	17
5.1.1. Escenarios del IPCC.....	17
5.1.2. Generación de proyecciones climáticas.....	18
5.2. SERIES DE PROYECCIONES FUTURAS. PROYECTO PRUDENCE.....	19
5.3. SERIES CLIMÁTICAS INTRODUCIDAS EN EL MODELO.....	21
5.3.1. Topología	21
5.3.2. Generación de series climáticas futuras	22
5.4. CALCULO DE APORTACIONES.....	24
5.4.1. Descripción del proceso.....	24
5.4.2. Generación de aportaciones futuras	24
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
6.1. RECURSOS HÍDRICOS	25
6.1.1. Pluviometría.....	25
6.1.2. Temperatura.....	26
6.1.3. Evapotranspiración Potencial.....	26
6.1.4. Aportaciones.....	27
6.1.5. Gráficos.....	28
6.1.6. Conclusiones	35
6.1.6.1. Pluviometría.....	35
6.1.6.2. Temperatura	36
6.1.6.3. ETP.....	36
6.1.6.4. Aportaciones.....	36
6.1.6.5. Análisis de comparación entre escenarios.....	38
6.1.6.6. Resumen de conclusiones.....	38
7. CLASIFICACIÓN DE LAS SERIES DE APORTACIONES	40

7.1.	CLASIFICACIÓN DE CAUDALES POR PERCENTILES.....	40
7.2.	ANÁLISIS DE CAUDALES CON LA APLICACIÓN IAHRIS	41
7.3.	CONCLUSIONES	49
7.3.1.	<i>Resumen</i>	51
8.	SEQUÍAS	51
8.1.	CÁLCULO DE PERIODOS DE SEQUÍA	51
9.	REFERENCIAS	53
9.1.	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	53
9.2.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

ANEJOS

- 1.- Serie 1940/41- 2007/08
- 2.- Series de proyecciones futuras
- 3.- Clasificación de las series de aportaciones

1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2002, la Agencia Catalana del Agua viene realizando estudios sobre la implicación del cambio climático en los recursos hídricos. En dichos trabajos el análisis del impacto producido por el cambio climático ha partido de las hipótesis y conclusiones que el conjunto de expertos de la ONU (IPCC) ha ido publicando a lo largo de estos años.

En el presente documento se analizará la cuenca del río Ter y en concreto las aportaciones al embalse de Sau.

Se exponen en este trabajo las principales conclusiones de los informes de cambio climático realizados por el IPCC, bajo las cuales se han desarrollado los modelos climáticos acoplados océano-atmósfera. Las proyecciones futuras de precipitación y temperatura de estos modelos han sido empleadas para la comparación de futuras aportaciones con respecto a las actuales. Así mismo, se pone de manifiesto la metodología desarrollada para efectuar dicha comparación, así como las conclusiones de todo el trabajo realizado.



Figura 1. Embalse de Sau en 3D

2. OBJETIVOS Y ÁMBITO DE ESTUDIO

El objeto de este estudio es la evaluación del impacto producido por el cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ter en el embalse de Sau. Teniendo en cuenta esta información, se podrán determinar los recursos de la cuenca para su correcta gestión y planificación futura.

La evaluación del impacto causado por el Cambio Climático se determinará a partir del cálculo de los recursos hídricos con el mismo modelo hidrometeorológico con el que se ha simulado la serie 1940/41-2007/08, pero introduciendo como datos las proyecciones futuras de precipitación y temperatura teniendo en cuenta varias hipótesis o escenarios que se consideraron posibles a finales del S. XXI, según los expertos del IPCC. Los resultados obtenidos con el modelo hidrometeorológico fueron comparados con otros estudios realizados con anterioridad para comprobar la fidelidad del mismo.

Una vez estimados los recursos futuros, se comparan estos con los obtenidos para el periodo 1940/41-2007/08 a partir de datos registrados en estaciones climáticas.

La siguiente figura muestra el ámbito de estudio.

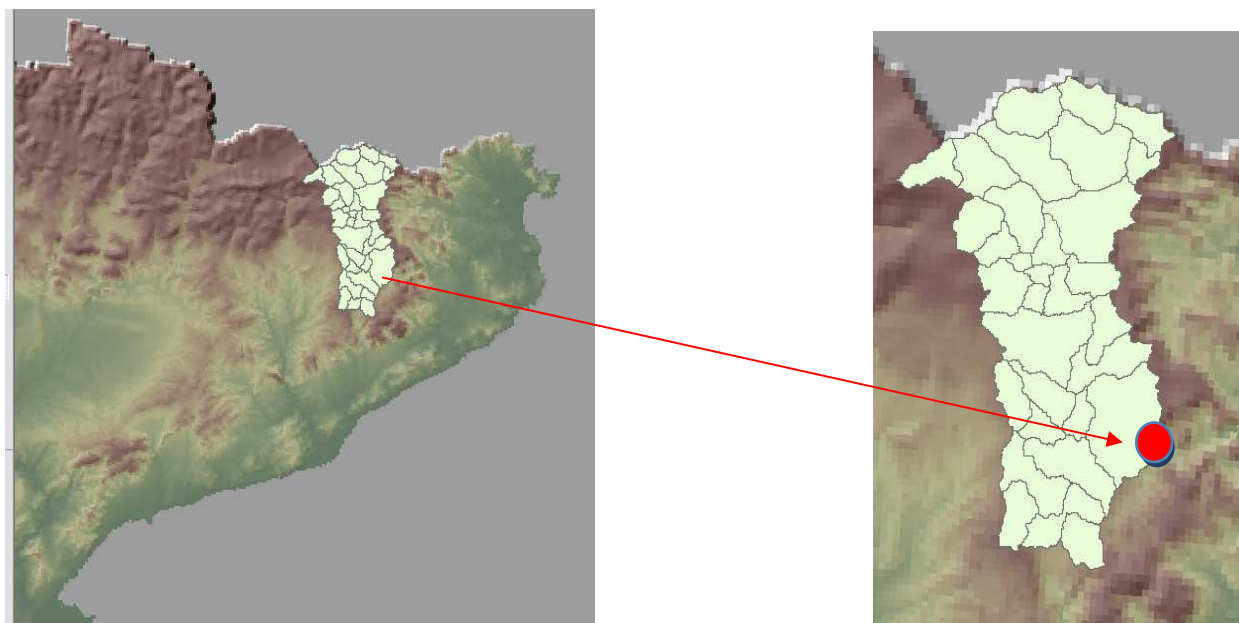


Figura 2. Ámbito de estudio

3. CARÁCTERÍSTICAS DE LA CUENCA

El río Ter nace en Ulldeter en la comarca pirenaica del Ripollès y desemboca en el Mar Mediterráneo, aguas abajo de Torroella de Montgrí.

La zona a estudio es la cuenca del río Ter ubicada en la provincia de Gerona. Las coordenadas del punto de cierre de la cuenca a estudio son X: 451502 Y: 4646663, huso 31, la superficie de la cuenca es de 1528 km² y la longitud del cauce asciende a 208 km. Por último destacar que el río Ter pertenece a las Cuencas Internas Catalanas.

4. CALCULO DE LAS APORTACIONES AL EMBALSE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROMETEOROLÓGICO

Este estudio toma como datos de partida los resultados de otro precedente realizado en la misma cuenca por la Agencia Catalana del Agua (ACA). En dicho estudio se utilizó el modelo A Generalized Streamflow Simulation System, desarrollado conjuntamente por el National Weather Service de Estados Unidos y el Department of Water Resources del estado californiano de Sacramento. En nuestro país ha venido a conocerse con el nombre de SACRAMENTO, y la versión utilizada para el Estudio de Recursos del ACA se completó con una rutina que tiene en cuenta el efecto invernal de retención nival, que el modelo original no contemplaba. Este modelo trabaja a escala diaria y depende de 28 parámetros.

En el estudio realizado el objetivo de la primera fase es reproducir la serie de aportaciones obtenida con el modelo SACRAMENTO a través de un modelo más simple, como es el modelo de Témez.

Para ello se introducen los datos de precipitación y ETP en el modelo de Témez utilizando la aplicación CHAC, del CEDEX, y se calibra hasta obtener una serie de caudales que se ajuste lo máximo posible a la del SACRAMENTO.

4.1. DETERMINACIÓN DE APORTACIONES CON EL MODELO SACRAMENTO

Para montar el modelo Témez se parte de los datos de precipitación, ETP y aportaciones medios mensuales en la cuenca de Ter en el embalse de Sau. Estas series se han calculado mediante un estudio climático y de aportaciones realizado en las 32 subcuencas en las que se dividió la cuenca del Ter en Sau en el estudio realizado por el ACA y cuyos valores se acumularon o agregaron consiguiendo así una serie única para cada variable en la cuenca completa.

El modelo Sacramento intenta determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca determinando los diversos porcentajes que se dedican a retención nival, evaporación, flujo superficial o flujo subterráneo, porcentajes variables en función de los diversos parámetros hidrológicos de la cuenca en cada momento.

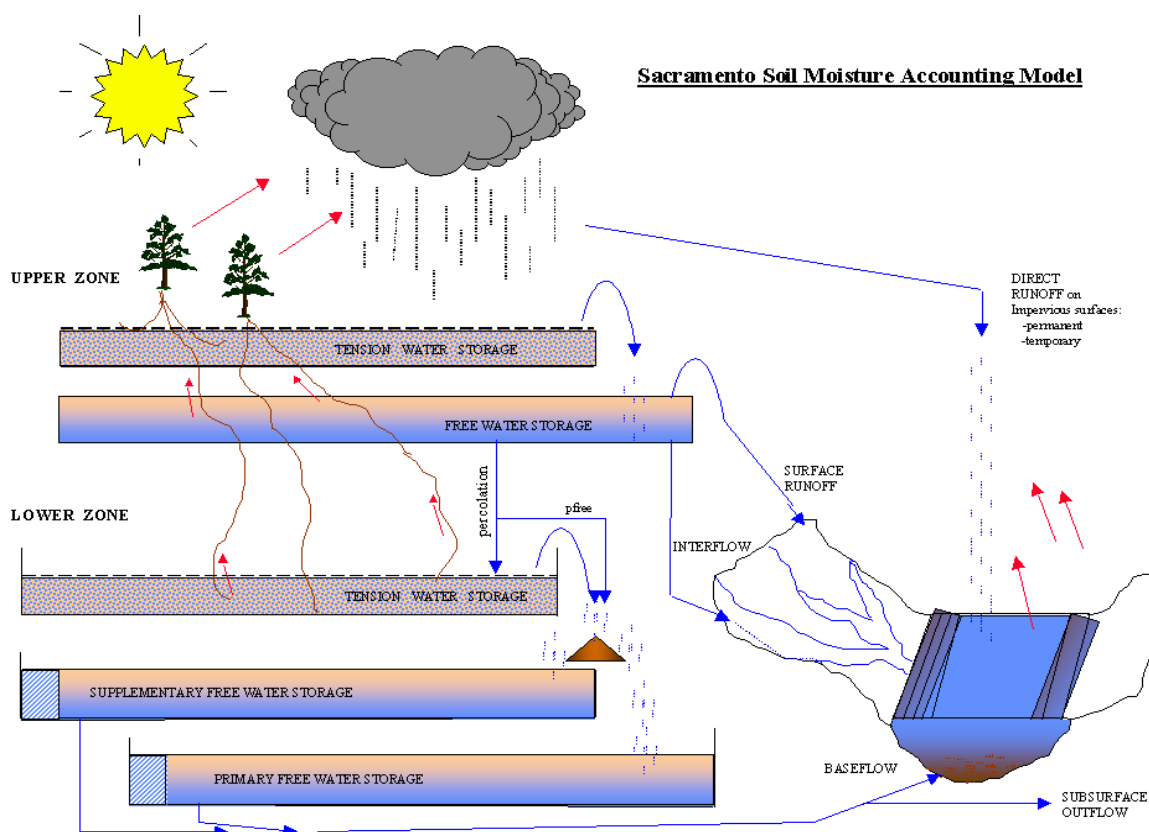


Figura 3. Modelo conceptual del Sacramento

Estos parámetros se determinan a partir de las relaciones entre las cantidades registradas de agua caída y los caudales observados en el río o cauce de desagüe, por lo que siempre es necesario en cada cuenca, un proceso de calibrado que determine los valores constantes de alguno de los parámetros y los coeficientes de las leyes que rigen el comportamiento del resto.

El modelo descompone los recursos brutos que recibe el sistema (series de precipitación diaria), en una colección de series que representan la evolución temporal de cada uno de los elementos del ciclo hidrológico (caudales transferidos y volúmenes almacenados en cada depósito ficticio). Topológicamente, el modelo SSMA descompone las cuencas en los terrenos siguientes:

- impermeables, integrado por los terrenos conectados directamente a la red hidrográfica capaces únicamente de producir escorrentía directa o evaporación (zonas impermeables, masas de agua, etc.)
- permeables (incluyendo terrenos temporalmente impermeables con suelo desarrollado) que además de producir escorrentía pueden infiltrar agua. Estos terrenos se agrupan en las siguientes zonas y depósitos ficticios:

La **zona superior**, que representa el comportamiento regulador del suelo, y está formada por dos compartimentos:

- UZT Agua en tensión que únicamente puede evaporar agua a la atmósfera. Capacidad de almacenamiento del depósito superior de tensión.
- UZF Agua libre que puede infiltrar al depósito inferior o producir escorrentía directa o hipodérmica. Capacidad de almacenamiento del depósito superior de agua libre.
- UZK: Capacidad de vaciado del depósito superior de agua libre.

La **zona inferior**, que simula el comportamiento de los acuíferos, y se descompone a su vez en tres depósitos:

- LZFS Secundario que responde con rapidez a la precipitación en forma de flujo base. Capacidad de almacenamiento del depósito secundario inferior de agua libre
- LZFP Primario, de respuesta más lenta, que representa el drenaje del acuífero a largo plazo en forma de flujo base. Capacidad de almacenamiento del depósito primario inferior de agua libre
- LZT Agua en tensión que da la posibilidad de evaporar recursos en caso de sequías prolongadas. Capacidad de almacenamiento del depósito inferior de agua de tensión
- LZPK: Capacidad de vaciado del depósito inferior primario de agua libre
- LZSK: Capacidad de vaciado del depósito inferior secundario de agua libre

Los intercambios entre depósitos parcialmente llenos se rigen por leyes que consideran los porcentajes de llenado y por tanto sus demandas de agua. Cuando los depósitos alcanzan su capacidad máxima, rebosan y ceden los recursos excedentarios a otros depósitos en función de la demanda de los compartimentos receptores.

Como en otros modelos conceptuales, la filosofía de la simulación es simple, reduciéndose a aplicar en cada intervalo de tiempo una ecuación de balance hídrico a cada depósito de los anteriormente definidos hasta completar el balance de todo el sistema.

Los balances hídricos comienzan por los terrenos impermeables superiores que producen escorrentía directa desde los primeros instantes, la cual es repartida en días sucesivos a través de un hidrograma unitario que define el usuario.

La precipitación restante entra en los terrenos permeables, alimentando en parte el depósito de agua en tensión, que evapora los recursos disponibles en función de la evapotranspiración potencial. La precipitación que resta una vez satisfecha esta demanda alimenta el depósito de agua libre superior, que produce escorrentía directa en las zonas temporalmente impermeables y flujo hipodérmico en las estrictamente permeables.

La cantidad de agua que percola a los depósitos inferiores es proporcional a la relación entre el volumen de agua almacenado en la zona superior y la capacidad máxima de la misma. La ley que regula el intercambio es una transcripción de la ley de Horton que tiene en cuenta el déficit de humedad que origina demanda en los depósitos inferiores. La percolación es máxima en el instante inicial, tiene un valor límite y pierde capacidad con el tiempo siguiendo una curva exponencial.

Los recursos percolados a la zona inferior se reparten entre el depósito de agua en tensión y los dos depósitos libres (primario y secundario). El depósito en tensión únicamente puede evaporar agua, en función de su capacidad, del agua almacenada en los depósitos de tensión y el déficit de evapotranspiración en el intervalo de cálculo, una vez descontadas las pérdidas en la zona superior.

Los depósitos de agua libre de la zona inferior funcionan de forma independiente, cada uno con un conjunto independiente de parámetros que refleja sus propiedades (drenaje lento y rápido). Ambos depósitos superponen sus efectos para componer el flujo base, el cual se suma al hipodérmico y a la escorrentía directa para dar la escorrentía total.

Para tener en cuenta los cambios que se producen en el hidrograma cuando éste se traslada por los cauces, el modelo permite aplicar al hidrograma generado un esquema simplificado de laminación del tipo Muskingum.

Para utilizar el modelo SACRAMENTO en casos prácticos con garantía, es necesario obtener por calibración el valor que los 15 parámetros de la formulación toman en el caso particular.

Para ello, se parte de las series diarias de precipitación/evapotranspiración que produjeron un hidrograma registrado en una estación de aforos. Se necesitan unas series que abarquen la mayor parte posible de sucesos hidrológicos diferentes (sequía prolongada, lluvia importante tras período seco, tren de lluvias importantes, etc.).

Como se ha indicado anteriormente se comprueba que la series obtenida del modelo de Témex, que depende de seis parámetros, a escala mensual y calculada como cuenca única, se ajusta a la serie de aportaciones del modelo SACRAMENTO que depende de 28 parámetros, a escala diaria y agregada a partir de los resultados de 32 subcuencas.

4.2. DATOS DE PARTIDA

El cuadro siguiente muestra los datos a partir de los cuales se realizó la primera fase del estudio. Todos fueron facilitados por la Agencia Catalana.

	Series temporales mensuales	Unidades	Media	Observaciones
Precipitación	1940/41-2007/08	mm	939,7 mm	
ETP	1940/41-2007/08	mm	696,2 mm	
Temperaturas	1940/41-2007/08	°C	11,4°C	
Datos calibración	Aportaciones→1940/41-2007/08	hm ³		Aportaciones→ Sacramento
	Entradas al embalse →1980/81-2007/08	hm ³		Entradas→ ACA

Tabla 1. Datos de partida

4.3. MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ

El modelo hidrológico empleado es el de Témex. Éste es un modelo matemático, determinístico y agregado a escala mensual.

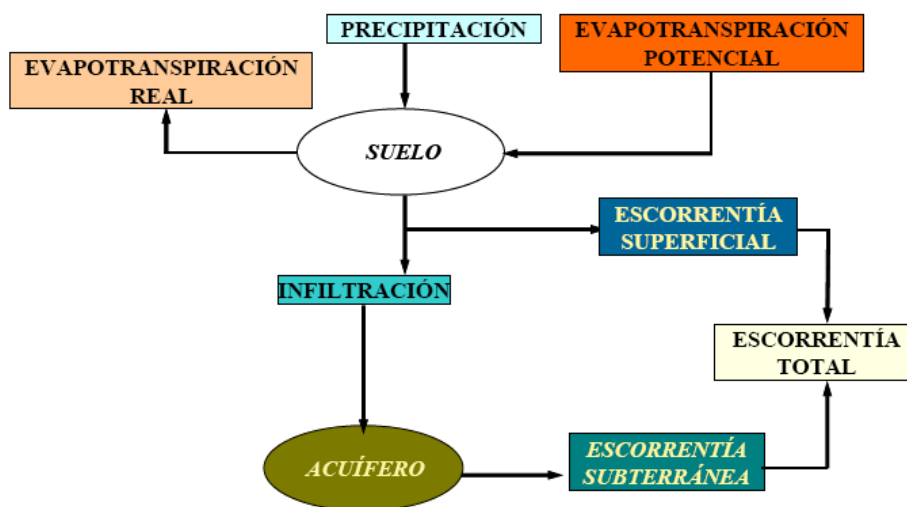


Figura 4. Modelo conceptual de Témex

La aportación total de la cuenca será la suma de la escorrentía superficial (A_{sup}) y la escorrentía subterránea (A_{sub}):

$$AT = A_{sup} + A_{sub}$$

En donde la A_{sup} = excedente – infiltración y A_{sub} = f (infiltración).

Para poder calcular estas aportaciones previamente se han de estimar los cuatro parámetros del modelo:

- $H_{m\acute{a}x}$ = capacidad máxima de almacenamiento en el suelo (mm)
- C = coeficiente de excedente
- $I_{m\acute{a}x}$ = parámetro de infiltración máxima (mm/h)
- a = coeficiente de la rama de descarga del acuífero

La capacidad de cálculo informático ha permitido introducir variantes al modelo:

El modelo permite considerar más de una rama de descarga del acuífero, de manera que por cada rama aumenta a la par el número de variantes. Teniendo en cuenta que para el presente estudio se emplearon dos ramas, el número de variantes aumento en dos, lo cual redundaba en un mejor ajuste del modelo pero conlleva un aumento del número de parámetros, pasando de cuatro a seis.

En este estudio se considera una cuenca única en vez de estudiar cada una de las subcuencas en las que se divide la zona de estudio.

4.4. MONTAJE DEL MODELO Y METODOLOGÍA

Para emplear el modelo de Témez usando la aplicación CHAC es necesario transformar los formatos de las series de partida al formato LEMA, propio del CHAC.

Para ello los datos originales del SACRAMENTO facilitados en ACCESS se pasaron a una hoja de cálculo Excel para transformarlos, ya que el CHAC cuenta con un módulo de intercambio con este programa. Y de ahí importarlos a CHAC.

Además fue necesario obtener los valores anuales de cada una de las variables. Por último a la variable aportación se le aplicó un cambio de unidades, de hm^3/mes a m^3/s (valor medio mensual).

Una vez introducidos los datos en CHAC, tanto las series como los datos de características de la cuenca se procede a calibrar, validar y simular con el modelo Témez.

La serie obtenida se exporta a Excel y se vuelve a cambiar las unidades de m^3/s a hm^3/mes .

La nomenclatura utilizada para los datos obtenidos del estudio realizado con el modelo SACRAMENTO fue SCIC. La nomenclatura utilizada para los datos obtenidos con el modelo de Témez fue CHAC.

Finalmente se compararon los resultados obtenidos del modelo del estudio anterior (SCIC), con los datos de aportaciones de entrada al embalse de Sau a partir del año hidrológico 1980/81 y con la simulación de aportaciones obtenidas de CHAC.

4.5. CALIBRACIÓN

4.5.1. Descripción del proceso

La serie SCIC es la que introduce en el modelo como base de calibración.

Inicialmente se calibró utilizando el módulo propio de CHAC, a partir de los valores medios mensuales de toda la serie con el objetivo de minimizar al máximo los errores. Con esto se consiguió un juego de parámetros como primera aproximación.

Posteriormente se calibró comparando la distribución de la serie completa, año a año. Esto se realiza de forma gráfica dibujando todas las series simultáneamente.

Tras la calibración inicial se comprobó que el caudal base de la serie generada de aportaciones SCIC era menor que la serie CHAC siendo en los primeros años (1940/41-1947/48) mucho más elevado que el resto, pareciendo un problema de la condición inicial.

Es por ello que se optó por reducir la condición inicial para que el caudal base disminuyera en el primer periodo, esto produjo que en los primeros años (1940/41-1947/48) las series SCIC y CHAC correlacionaran algo mejor.

Sin embargo los resultados no eran aceptables. Se optó por variar en sucesivas pasadas:

- la infiltración máxima
- los valores de las ramas de descarga
- disminuir el parámetro de excedencia
- el coeficiente de reparto de descarga

Como el caudal base seguía muy elevado se disminuyó aún más la condición inicial.

Aun así se detectó una desviación tanto en los caudales punta como en los base.

Posteriormente para ajustar las puntas y caudal base se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de los siguientes parámetros: infiltración, el parámetro de excedencia y humedad máxima. Estos cambios fueron:

- Al disminuir la infiltración se acentúan las puntas y disminuye el caudal base.
- Al bajar el parámetro de excedencia disminuyen las puntas.
- Al bajar la humedad máxima se produce un aumento de las puntas.

Con el análisis anteriormente descrito se concluyó que los mejores resultados se obtendrían con una disminución del 50 % de la infiltración, observándose en este caso que en los años iniciales encajaban correctamente con los valores observados de la serie SCIC pero en los años finales se elevaban ligeramente respecto de SCIC.

Los últimos retoques consistieron en unas pequeñas variaciones en infiltración y humedad máxima hasta alcanzar los valores que más se ajustaban a los obtenidos por SACRAMENTO.

Para finalizar se comprobó que ambas series, tanto SCIC como CHAC, eran comparables a las entradas al embalse.

En todas las pasadas de calibración se fueron comprobando que el error medio (para cuadrar caudales medios), el error cuadrático relativo (índice del ajuste en caudales bajos) y el error cuadrático estándar (índice de ajustes en caudales altos) fueran aceptables.

4.5.2. Resultados obtenidos

De las múltiples calibraciones realizadas, solo 33 fueron de utilidad para el presente trabajo, véase [Anejo 1](#). De todas ellas se seleccionó como óptima la número 29, siendo los valores obtenidos:

- Coeficiente de ETP = 1
- Parámetro c de excedencia = 0,3
- Humedad máxima = 110
- Infiltración máxima = 30
- Rama de descarga = 0,01
- Caudal inicial = 3
- Coeficiente de reparto de recarga = 0,01
- Rama de descarga 2 = 0,0016
- Caudal inicial = 3
- Humedad inicial = 3

Las series SCIC y CHAC presentan los siguientes datos estadísticos, a escala mensual:

ESTADÍSTICAS dato mensual	SCIC	CHAC
PROMEDIO	42,20	44,03
SESGO	2,04	2,24
DESV. TIP	0,73	0,95
CURTOSIS	6,15	5,84
Mediana	32,73	25,18
Mínimo	6,71	10,89
Máximo	257,84	313,37
Suma	34434,82	35930,87

Tabla 2. Comparación de estadísticos mensuales entre la serie SCIC y CHAC

La distribución mensual obtenida fue la siguiente:

	SCIC	CHAC
Octubre	43,23	41,36
Noviembre	40,49	36,08
Diciembre	44,57	43,78
Enero	38,47	39,05
Febrero	34,37	31,71
Marzo	41,84	46,51
Abril	46,94	51,81
Mayo	57,66	74,07
Junio	50,99	56,60
Julio	36,39	30,70
Agosto	34,42	39,96
Septiembre	37,19	36,75

Tabla 3. Comparación de medias mensuales entre la serie SCIC y CHAC

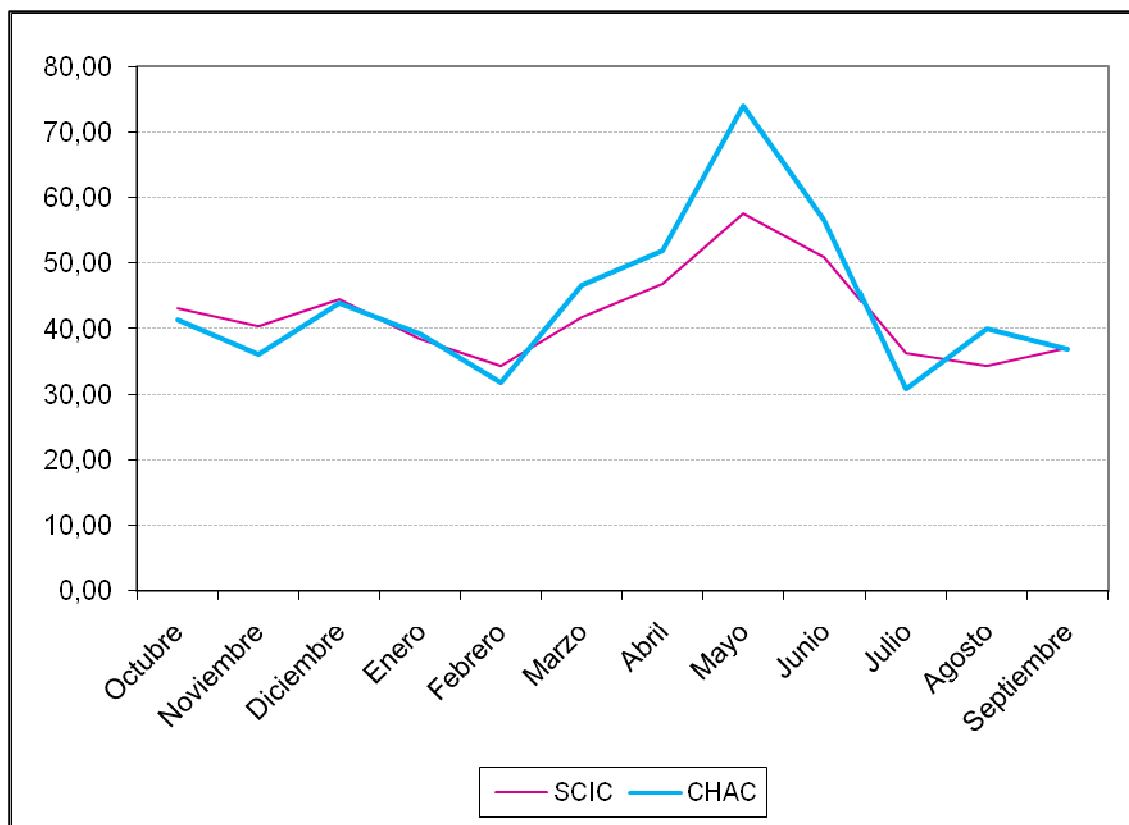


Figura 5. Gráfica de comparación de las medias mensuales entre la serie SCIC y CHAC

El gráfico siguiente muestra la distribución anual de las series SCIC y CHAC, comprobándose que la serie CHAC presenta unos máximos superiores a la serie SCIC, por otro lado, se observa que los caudales base correlacionan bastante bien.

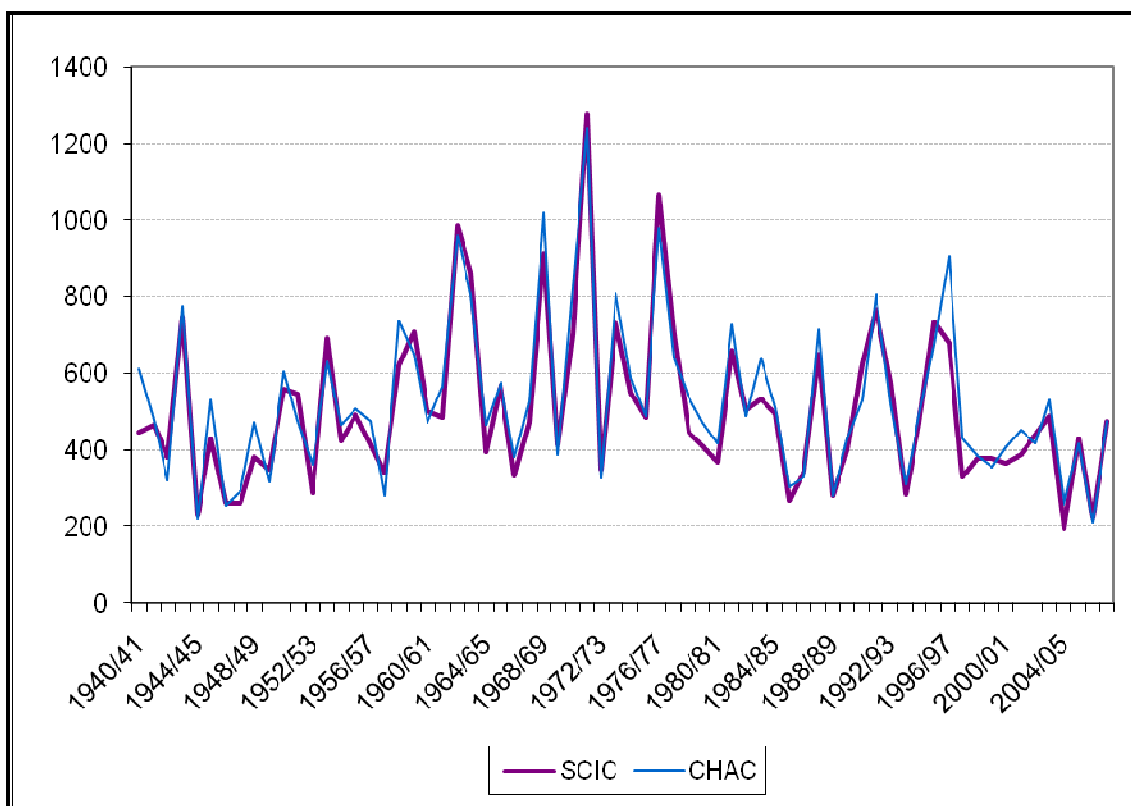


Figura 6. Comparación de las medias anuales entre SCIC Y CHAC

4.5.3. Conclusiones

El caudal base es muy similar entre la serie SCIC y la serie CHAC, siendo los valores máximos en general superiores para el primer caso.

La variación del volumen de CHAC respecto de SCIC es aproximadamente del 4%, por lo que los datos obtenidos se consideran adecuados, ya que una variación mayor implicaría que no correlacionan de una manera fiable.

Los valores del coeficiente de sesgo, desviación típica y la media son muy similares, mientras que existen ligeras diferencias entre los máximos y los mínimos.

Se observa que existen décadas en las que el modelo ajusta muy bien al original, como por ejemplo la década de los sesenta, sin embargo, la década de los setenta son más difíciles de ajustar, por su gran variabilidad.

Se puede apreciar que no se han ajustado bien las puntas lo que se traduce en una sobre-elevación de los meses de abril y mayo, que junto con el otoño son los dos periodos más lluviosos de la cuenca.

La conclusión es que a pesar de que el modelo Témez es más rígido que el SACRAMENTO, ya que no es posible ajustar con la misma precisión debido a la diferencia de parámetros existentes, se ha conseguido reproducir la serie de 68 años de forma sensiblemente semejante a la calculada con el modelo SACRAMENTO. Si la referencia de SACRAMENTO no hubiera existido,

ajustar el modelo con CHAC hubiera sido muy difícil y con mucha variabilidad en los resultados.

4.6. VALIDACIÓN

Lo que interesa en este proyecto es reproducir lo más fidedignamente con el modelo Témez la serie de 68 años calculada con SACRAMENTO. Por este motivo se utiliza la serie completa para calibrar y no se procede a validar.

4.7. SIMULACIÓN/RESULTADOS

En la siguiente tabla se pueden observar un resumen de los valores medios anuales obtenidos por CHAC.

Nombre de la cuenca	Superficie acumulada (km ²)	Serie pluviométricas (mm)	Aportación media anual generada (hm ³)	Coefficiente de escorrentía	ETP	Temperatura (°C)
Ter en Sau	1527,9	925,88	528,40	0,36	685,96	11,26

Tabla 4. Valores medios anuales obtenidos con CHAC

A continuación se presenta una relación de los principales estadísticos (en valores medios anuales) que comparan la serie SCIC con la serie CHAC. Observándose que la desviación típica y el mínimo son bastante similares.

ESTADÍSTICAS dato anual	SCIC	CHAC
PROMEDIO	506,56	528,40
SESGO	1,31	1,05
DESV. TIP	0,41	0,39
CURTOSIS	2,34	1,26
Mediana	468,04	483,89
Mínimo	194,51	209,23
Máximo	1277,53	1239,54
Suma	34446,15	35930,87

Tabla 5. Comparación de los estadísticos anuales entre SCIC Y CHAC

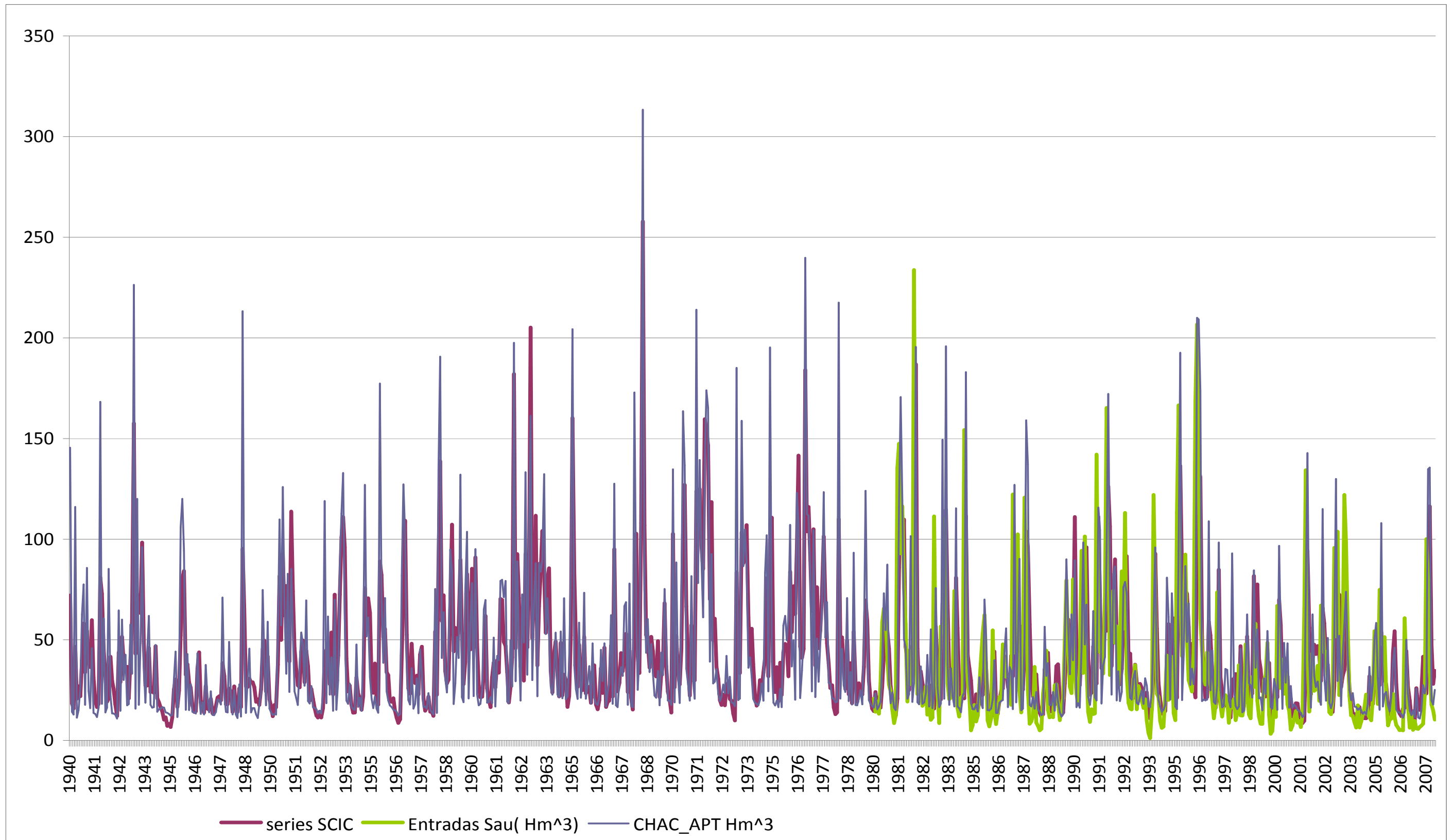


Figura 7. Resultado de la calibración 29 comparada con la serie SCIC y las entradas al embalse.

5. CÁLCULO DE LAS APORTACIONES CON LAS SERIES DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS

5.1. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

5.1.1. Escenarios del IPCC

Para conocer la variación futura del clima los expertos en modelos climáticos parten de varias hipótesis de evolución de los niveles de los Gases de efecto invernadero (GEIs) y aerosoles vertidos a la atmósfera por las distintas actividades humanas.

Esas hipótesis de evolución de las emisiones se recogen en el *“Informe Especial sobre los escenarios de emisiones del IPCC”* (Nakicenovic et al., IPCC 2000) y fueron elaboradas por el *“Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC)”* teniendo en cuenta varias variables como: evoluciones futuras de crecimiento de la población mundial, la demanda de energía, la eficiencia de su consumo o el crecimiento económico global.

Los escenarios de emisiones a partir de los cuales se han obtenido las proyecciones de clima futuro se denominan escenarios SRES (Special Report on Emission Scenarios). Dentro de este informe se contemplan varias hipótesis de las cuales cuatro reflejan cuatro tipo de políticas socioeconómicas extremas.

Conviene señalar que ninguno de los escenarios se corresponde exactamente con los objetivos de emisión marcados en el Protocolo de Kyoto. Los años horizonte varían.

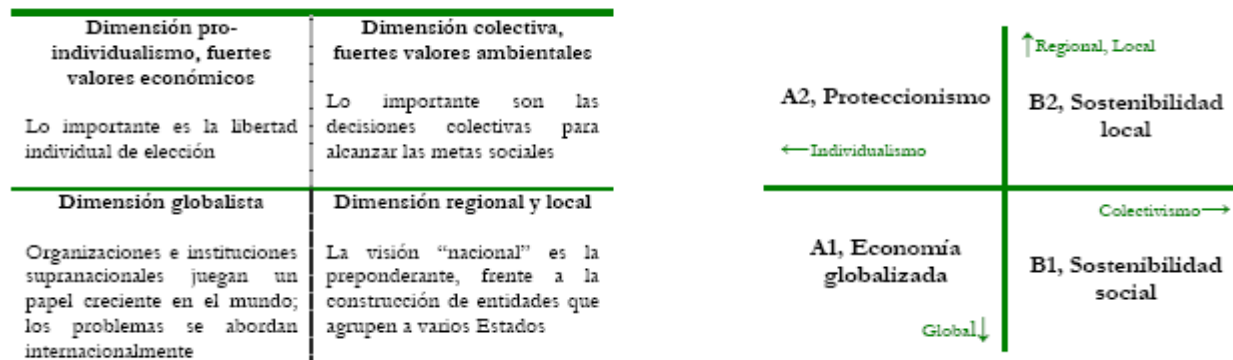
La siguiente figura, obtenida del documento *“Plan Nacional de adaptación al Cambio Climático. Marco para la coordinación entre Administraciones Públicas para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático”*, editado por la Oficina Española de Cambio Climático para la prevención de la contaminación y del Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, se resumen las bases de cada uno de los escenarios.

**SRES: Informe especial sobre los escenarios de emisiones del IPCC
(Nakicenovic et al., IPCC 2000)**

Los escenarios SRES han sido contruidos para explorar la evolución futura de las emisiones de sustancias que pueden ser radiativamente activas (p. ej., gases de efecto invernadero, aerosoles).

Se ha desarrollado 4 líneas narrativas, llamadas A1, A2, B1 y B2, donde se describen las relaciones entre las fuerzas que van a gobernar las emisiones de GEI y aerosoles a lo largo del siglo XXI, para grandes regiones del mundo y para el globo en su conjunto. Cada línea narrativa representa diferentes condiciones demográficas, de desarrollo socioeconómico y de cambios tecnológicos que divergen progresivamente de forma irreversible. Estas 4 familias de escenarios se desarrollan en 40 escenarios de emisiones diferentes, cada uno con su trayectoria de emisiones a lo largo del siglo.

En términos sencillos, las 4 líneas narrativas se estructuran a lo largo de dos ejes divergentes, según se refleja a continuación:



Las líneas narrativas de las distintas familias de escenarios se resumen de la siguiente manera (Nakicenovic et al., 2000):

- ❖ **A1:** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.
- ❖ **A2:** describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- ❖ **B1:** describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
- ❖ **B2:** describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Figura 8. Escenarios SRES. (Fuente: MMARM, Oficina de Cambio Climático)

5.1.2. Generación de proyecciones climáticas

La generación de proyecciones climáticas es un elemento crucial en este proceso y debe ser consistente con el marco general proporcionado por el informe especial sobre escenarios de emisiones elaborado por el IPCC (Special Report on Emission Scenarios (SRES), Nakicenovic et al., 2000). Cronológicamente, lo primero que desarrollaron los expertos del IPCC a raíz del informe del año 2000 fue una cuantificación de las emisiones futuras de GEIs y compuestos de azufre (Tercer Informe del IPCC, 2001. IPCC-TAR, 2001) para cada uno de los escenarios incluidos en el Informe SRES.

La herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM, de las siglas en inglés) que se desarrollan en unos pocos centros internacionales de investigación climática. El tercer informe del IPCC habla de 16 modelos globales AOGCM con los que se han realizado simulaciones

detailladas teniendo en cuenta varios escenarios en un largo periodo de tiempo: de 1960 a 2100. Hasta el año 2000 se han considerado las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero observadas, junto con las calculadas de azufre. A partir del año 2000 se consideran las hipótesis de los distintos escenarios. Los resultados obtenidos de estos 16 modelos climáticos son facilitados por el Centro de Distribución de Datos (DDC) del IPCC.

La mayor parte de estos datos corresponden a valores mensuales de las variables más utilizadas en estudios de impacto del cambio climático en superficie (temperatura, precipitación, presión, etc.), correspondientes a cada una de las celdas de la malla del modelo que cubre toda la atmósfera terrestre.

Modelos globales son:

- CGCM2 (Centro Canadiense del Clima, versión2)
- ECHAM4 (Instituto Max Planck de Meteorología, Alemania)
- HadAM3H (Centro Hadley (RU), modelo atmosférico versión 3)
- HadCM3 (Centro Hadley (RU), modelo acoplado atmósfera-océano versión 3)
- HadCM2SUL (Centro Hadley (RU), modelo acoplado atmósfera-océano versión 2)

Estos modelos globales proporcionan las características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas con escasa resolución espacial (celdas entre 100 y 300 km de lado). Es por ello que se necesita aplicar técnicas de regionalización (downscaling) a las proyecciones generadas por los AOGCMs como paso intermedio antes de ser utilizados por los modelos de impacto.

5.2. SERIES DE PROYECCIONES FUTURAS. PROYECTO PRUDENCE

A partir de los estudios proporcionados por el Tercer Informe del IPCC, el V Programa Marco de la UE financió el proyecto PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects), en el que participaron 10 países, entre ellos España.

Estos modelos regionales, son modelos dinámicos anidados en los modelos globales AOGCM. De todos los escenarios y modelos globales desarrollados a raíz de la publicación del informe SRES, dentro del proyecto PRUDENCE los modelos regionales se anidaron al modelo global HadAM3H y únicamente dos grupos de trabajo (el Instituto Meteorológico de Dinamarca y el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia) anidaron el modelo regional con el ECHAM adicionalmente.

En total 20 grupos de trabajo desarrollaron nueve modelos regionales más uno global, el desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Francia, también incluido dentro del proyecto PRUDENCE.

En cuanto a escenarios, se eligieron el A2 y el B2 como representativos de las tendencias socioeconómicas futuras, en las que no se considera ninguna política intervencionista preventiva del cambio climático. En referencia al periodo de tiempo simulado, en realidad se trabajó con dos series:

- Por un lado el llamado **Experimento "CONTROL"** (clima actual), que refleja la evolución observada del contenido global de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles sulfato (SUL) entre 1961 y 1990.

- **Proyecciones climáticas** en el periodo 2071-2100, simulando los escenarios A2 y B2. Las emisiones previstas en estos dos escenarios se muestran en la siguiente figura:

Escenario	Sustancia	Años			
		2070	2080	2090	2100
SRES-A2	CO2 (ppm)	635	698	771	856
	SUL (TgS)	0.56	0.49	0.47	0.45
SRES-B2	CO2 (ppm)	531	559	589	621
	SUL (TgS)	0.38	0.38	0.37	0.36

Concentraciones globales medias de CO2 (en ppm de C) y de aerosol sulfato SO4 (en Tg de S).

Figura 9. Predicción de emisiones para los escenarios A2-B2 incluidos en el Informe SRES. (Fuente: Página WEB del INM, MMARM)

La elección del periodo 2071-2100 para las proyecciones se debe a que es ese periodo donde la señal muestra claramente la divergencia entre los distintos escenarios. Un periodo de 30 años es considerado por convenio como un periodo representativo climáticamente.

Las simulaciones del proyecto PRUDENCE son la base de las proyecciones para Europa recogidas en el IV Informe del IPCC (París, febrero de 2007. IPCC-AR4, 2007).

Los modelos regionales desarrollados en este proyecto Europeo y sus principales características se muestran en la tabla siguiente. Los datos han sido facilitados por el INM a través de su página WEB.

CENTRO	MODELO GLOBAL AL QUE SE ANIDA	MODELO REGIONAL	RESOLUCIÓN HORIZONTAL Y NÚMERO DE CELDILLAS (NX x NY)	
CNRM (Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas, Francia)	HadAM3H	ARPEGE	50-70km	(sobre Europa)
DMI (Instituto Meteorológico de Dinamarca)	ECHAM	HIRHAM	0.44° (50km)	110x104
	HadAM3H			
ETH (Escuela superior politécnica de Zurich)	HadAM3H	CHRM	0.5° (55 Km)	81 x 91
GKSS (Instituto de Investigaciones Costeras de Alemania)	HadAM3H	CLM	0.5° (55 Km)	101 x 107
HC (Centro Hadley de Reino Unido)	HadAM3H	HadRM	0.44° (50km)	106x111
IIPC (Centro Internacional de Física Teórica de Italia)	HadAM3H	RegCM	50 Km Lambert	119 x 98
KNMI (Instituto Meteorológico de Holanda)	HadAM3H	RACMO	0.44° (50 Km)	94 x 80
MPI (Instituto Max Planck de Alemania)	HadAM3H	REMO	0.5° (55 Km)	97 x 109
SMHI (Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia)	ECHAM	RCAO	0.44° (50 Km)	90 x 86
	HadAM3H			
UCM (Universidad Complutense de Madrid)	HadAM3H	PROMES	50 Km Lambert	112 x 96

Tabla 6. Modelos y características del proyecto PRUDENCE

El esquema de simulaciones del proyecto PRUDENCE se muestra en la siguiente figura obtenida del Extracto obtenido del informe: “Generación de Escenarios Regionales de Cambio Climático para España” que puede consultarse en la página web del INM.

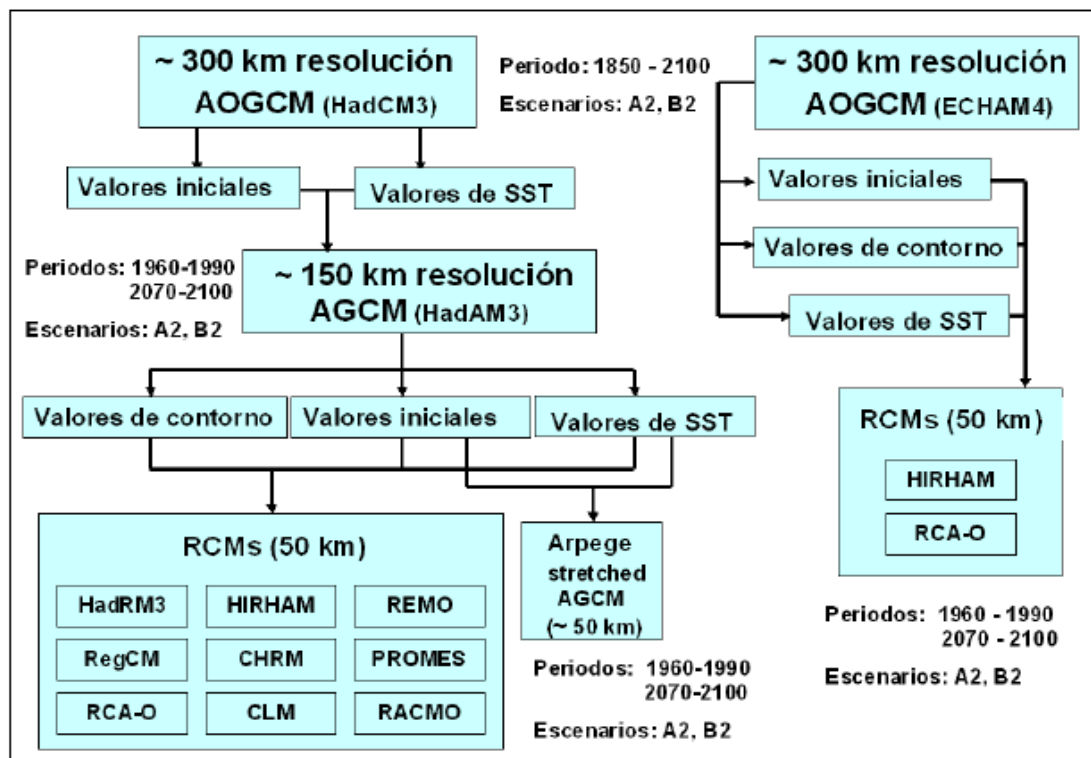


Figura 10. Esquema de simulaciones del proyecto PRUDENCE. (Fuente: Página WEB del INM, MMARM)

Por último, a nivel europeo se está desarrollando un nuevo proyecto llamado ENSEMBLES (Ensemble-based Predictions of Climate Change and their Impacts), integrado en el VI Programa Marco, que también cuenta con participación española. En él se aplica la técnica de predicción por conjuntos (ensemble) en una serie de modelos regionales a una resolución espacial de 25 km. El objetivo es generar escenarios regionales de cambio climático en Europa, teniendo en cuenta las conclusiones del IV Informe sobre Cambio Climático del IPCC (París, febrero de 2007. IPCC-AR4, 2007), con una estimación probabilística asociada a cada resultado. Se espera disponer de este producto para el año 2008-2009.

5.3. SERIES CLIMÁTICAS INTRODUCIDAS EN EL MODELO.

5.3.1. Topología

Para poder calcular aportaciones a partir de los datos de precipitación y temperatura de las proyecciones transformadas se ha montado un esquema topológico por modelo y escenario, para que se pueda generar y gestionar todas las series desde la misma base de datos.

En el estudio antecedente realizado por el ACA se analizaron los resultados de precipitación y temperatura en las cuencas del Francolí en Montblanc y Muga en el embalse de Boadella. Este análisis mostró la gran dispersión de resultados existente dentro del conjunto de modelos climáticos que formaron el Proyecto PRUDENCE. Por este motivo se consultó a los dos expertos españoles que habían estado trabajando en él. En el informe incluido en este estudio se expone la metodología para poder trabajar con las series climáticas utilizando una base comparable. Adicionalmente indicaron cuales, bajo su experiencia, eran los modelos que mejor

se ajustaban en la zona de estudio. Estos son: el modelo italiano (ICTP), el modelo sueco (SMHI) y modelo español (UCM).

- La cuenca del Ter hasta el embalse de Sau se modeliza con 1 subcuenca, creándose seis modelos distintos:

CODIGO_NIVEL1	NOMBRE_DEL_RIO
20A21	TER (A2-ICTP)
20A22	TER (A2-SMHI)
20A23	TER (A2-UCM)
20B21	TER (B2-ICTP)
20B22	TER (B2-SMHI)
20B23	TER (B2-UCM)

5.3.2. Generación de series climáticas futuras

En cuanto a las series climáticas el proceso seguido para la generación de las series de precipitación y temperatura que alimenten al modelo SACRAMENTO y que sean comparables con las series calculadas anteriormente ha sido el siguiente:

- Elección del método de la *transformada directa con escalado, aplicando un filtro gaussiano de 3 meses*. Las fórmulas aplicadas son las siguientes:

$$T_{esc,corr}(a, m, d) = T_{esc}(a, m, d) + [\bar{T}_{obs}(m) - \bar{T}_{cont}(m)]$$

$$P_{esc,corr}(a, m, d) = P_{esc}(a, m, d) \times [\bar{P}_{obs}(m) / \bar{P}_{cont}(m)]$$

En donde:

- T es la temperatura
- P es la precipitación
- esc,corr significa escenario corregido, es decir, dato de la proyección futura transformada
- esc significa escenario, es decir, dato de la proyección futura
- obs significa observada y en este estudio corresponde al dato utilizado la serie SCIC
- cont significa control, es decir, dato resultante de los modelos climáticos en la serie que emplean como control (1960-1990).

El filtro gaussiano es una técnica de suavizado en la que a la muestra se le aplica unos coeficientes de ponderación obtenidos a partir de una distribución de Gauss y cuya suma debe ser igual a 1.

Como las distribuciones de las series de control entre los modelos climáticos y la calculada anteriormente son significativamente distintas la comparación debe estar entre cada modelo y su futuro, tomando como base común las series CHAC. Es decir, que se transforman las series futuras de cada modelo a partir de unos coeficientes de transformación obtenidos a escala mensual y que dependen de la serie de control del modelo, los escenarios futuros de cada modelo y la serie calculada. Las ventajas de este método es que se elimina la incertidumbre que

introduce el cambio de modelo empleado sobre la base de que la serie de control es común para todos los futuros y la segunda ventaja es que se pueden generar 68 años futuros.

La transformada se obtiene mediante el cálculo de coeficientes mensuales:

- Para lluvia: los coeficientes de paso mensuales se aplican a los 68 años de las series de precipitación en la unidad que forma la cuenca del Ter en el embalse de Sau. Estos coeficientes se obtienen a partir de cálculo de la serie de control de los modelos climáticos contra los escenarios y de las medias mensuales de precipitación de la serie CHAC. Se calcula un coeficiente para cada serie de control y para cada escenario de cada modelo.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Ab.	Ma.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.
20A21	2.53	2.50	2.36	2.82	4.19	5.21	4.91	5.57	5.07	3.51	3.14.	3.00
20A22	3.01	2.77	2.36	2.59	3.68	4.63	5.82	6.67	4.95	3.78	3.33	3.32
20A23	2.88	2.95	2.80	3.25	4.22	4.91	5.92	5.94	4.70	4.16	3.81	3.49
20B21	1.63	0.93	0.87	1.37	3.01	3.98	3.90	4.14	3.19	1.87	2.23.	4.19
20B22	1.88	1.37	0.96	1.42	2.44	3.75	4.84	5.26	3.39	2.22	2.34	2.06
20B23	2.07	1.81	1.31	2.08	3.66	4.45	5.04	5.04	4.00	3.21	3.07	2.61

Tabla 7. Coeficientes de transformación de las series de precipitación

- Para temperatura: el proceso es el mismo, pero la corrección no se realiza mediante un coeficiente sino en grados centígrados de aumento medio mensuales.

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Ab	Ma	Jun	Jul	Ago	Sept
20A21	0.787	0.867	0.963	0.836	0.609	0.496	0.546	0.861	1.065	1.108	1.010	0.883
20A22	0.980	0.859	0.859	0.818	0.700	0.601	0.481	0.722	1.008	1.114	1.113	1.078
20A23	0.739	0.658	0.807	0.761	0.634	0.544	0.539	0.760	0.939	1.039	1.157	1.148
20B21	1.006	0.990	0.976	0.917	0.753	0.639	0.629	0.855	1.017	1.055	1.016	1.008
20B22	1.078	0.997	1.014	0.958	0.751	0.569	0.476	0.619	0.897	1.051	1.106	1.102
20B23	0.975	0.755	0.765	0.707	0.572	0.527	0.639	0.829	0.983	1.034	1.120	1.222

Tabla 8. Incrementos de °C para la transformación de las series de temperatura

Finalmente se obtienen las series mensuales de la siguiente forma:

- A las series de precipitación se les multiplica por el coeficiente mensual que le corresponda.
- A las series de temperatura se les suma el incremento de grados por mes correspondiente
- Se calcula la ETP mediante la fórmula de Thornthwaite y se desagrega uniformemente a escala mensual.

En resumen, se han introducido en la base de datos, como series de partida:

- las transformadas asociadas a Unidades parciales. Estas corresponden, por variable climática:
 - ✓ 3 modelos climáticos
 - ✓ 2 hipótesis de escenarios futuros (A2 y B2)
 - ✓ 1 unidad (cuenca única)

- 1 unidad original, serie CHAC.

Seguidamente, por variable, se obtuvieron la original (CHAC) más las seis alteradas correspondientes a los “experimentos futuros”. Todas comprenden un periodo de 68 años definido entre 1940/41-2007/08. La base temporal debería ser la misma, aunque las series alteradas sean una proyección de futuro medio del último trienio (2071-2100). El calendario debería ser común, tanto para las proyecciones futuras como las actuales, por lo que la serie temporal utilizada fue 1940/41-2007/08.

5.4. CALCULO DE APORTACIONES

5.4.1. Descripción del proceso

Para poder obtener las aportaciones futuras al embalse de Sau se elaboraron seis hojas EXCEL, una para cada modelo para transformar el formato de partida (ACCESS) a formato LEMA para importar al programa CHAC.

Las series de partida que fueron introducidas en el modelo de Témez son:

- Precipitación y ETP del escenario A2 del modelo ICTP
- Precipitación y ETP del escenario B2 del modelo ICTP
- Precipitación y ETP del escenario A2 del modelo SMHI
- Precipitación y ETP del escenario B2 del modelo SMHI
- Precipitación y ETP del escenario A2 del modelo UCM
- Precipitación y ETP del escenario B2 del modelo UCM

Todas estas series están completas para el periodo (1940/41-2007/08). Estos seis modelos fueron simulados introduciendo los parámetros de la calibración 29 para así poder realizar las proyecciones en base a la variación ocurrida en el pasado. Es decir, es el mismo modelo alimentado con datos climáticos distintos.

Tras obtener las aportaciones futuras para cada uno de los escenarios y modelos, se introdujeron en una única hoja EXCEL para poder analizarlos conjuntamente con la serie CHAC.

5.4.2. Generación de aportaciones futuras

Se han introducido en CHAC tantos modelos por cuenca piloto como hipótesis, es decir, modelo por hipótesis de futuro con datos transformados (uno por modelo climático y escenario, en total, suman seis hipótesis)

En total son siete modelos por cuenca. Esto se ha hecho así para poder conservar todos los cálculos aplicando el mismo esquema a cada serie de datos sin necesidad de ir eliminando con cada pasada los resultados de la hipótesis anterior.

Los resultados son las series de caudales y aportaciones mensuales de cada una de estas seis hipótesis en la cuenca piloto más la obtenida en la fase inicial.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en la cuenca del Ter en Sau se ha realizado aplicando la metodología escrita en el punto anterior. En este apartado se incluyen los resultados más significativos de todos los cálculos realizados, mientras que el resto de tablas y figuras se muestran en el [Anejo 2](#).

6.1. RECURSOS HÍDRICOS

Para evaluar el cambio que podría producirse en los recursos hídricos se han estudiado los valores medios mensuales comparándose las series de precipitación, temperatura, ETP y aportaciones denominadas CHAC obtenidas del estudio realizado en la fase inicial.

6.1.1. Pluviometría

Las siguientes tablas muestran los valores medios de la serie CHAC y de los futuros en los dos escenarios contemplados del informe SRES y de los tres modelos climáticos elegidos:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	86,6	61,6	60,0	43,7	40,0	56,4	74,0	109,1	107,5	80,2	108,6	98,1	925,9
Modelo SMHI.esc A2	95,2	67,8	64,1	42,0	33,6	48,0	60,1	75,3	64,0	37,9	77,4	98,0	763,3
Modelo ICTP.esc A2	94,7	61,5	52,5	33,7	34,0	53,8	61,4	65,5	52,8	43,0	92,3	103,6	748,7
Modelo UCM .esc A2	88,8	70,5	68,2	31,7	25,8	45,1	55,9	68,2	57,9	42,4	81,5	91,3	727,2
Modelo SMHI.esc B2	89,8	67,4	65,5	46,2	39,1	56,7	70,4	80,7	60,6	37,5	66,3	87,2	767,4
Modelo ICTP.esc B2	90,2	61,9	59,9	43,1	38,8	54,5	67,3	81,0	68,0	49,5	91,6	98,9	804,8
Modelo UCM .esc B2	88,4	68,2	72,6	41,8	29,6	42,8	51,9	61,5	56,1	50,3	88,9	95,6	747,6

Tabla 9. Valores medios mensuales de pluviometría (mm) mensuales y anuales

El porcentaje de disminución de la precipitación futura frente a CHAC se muestra en la siguiente tabla, por escenario y modelo:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Modelo SMHI.esc A2	10%	10%	7%	-4%	-16%	-15%	-19%	-31%	-41%	-53%	-29%	0%	-18%
Modelo ICTP.esc A2	9%	0%	-13%	-23%	-15%	-5%	-17%	-40%	-51%	-46%	-15%	6%	-19%
Modelo UCM .esc A2	3%	14%	14%	-28%	-36%	-20%	-24%	-38%	-46%	-47%	-25%	-7%	-21%
Modelo SMHI.esc B2	4%	9%	9%	6%	-2%	0%	-5%	-26%	-44%	-53%	-39%	-11%	-17%
Modelo ICTP.esc B2	4%	0%	0%	-1%	-3%	-3%	-9%	-26%	-37%	-38%	-16%	1%	-13%
Modelo UCM .esc B2	2%	11%	21%	-4%	-26%	-24%	-30%	-44%	-48%	-37%	-18%	-3%	-19%

Tabla 10. Comparación entre la serie real y las proyecciones futuras

6.1.2. Temperatura

La siguiente tabla muestra los valores medios de temperatura mensual de la serie CHAC y las futuras.

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	12,3	6,8	3,7	2,9	4,6	7,5	9,4	13,2	17,2	20,2	20,1	16,9	11,3
Modelo SHMI. Esc A2	16,1	10,2	7,0	5,9	7,3	9,8	12,0	16,9	21,8	26,0	26,7	21,8	15,2
Modelo ICTP. Esc A2	15,8	10,0	4,0	5,4	7,1	9,8	12,2	17,4	22,4	25,1	25,6	21,9	14,8
Modelo UCM. Esc A2	16,4	10,7	7,1	5,8	7,5	10,3	12,7	17,4	22,1	26,1	26,0	21,6	15,3
Modelo SHMI. Esc B2	14,5	9,2	5,7	4,8	5,9	8,4	10,8	15,6	21,0	25,0	25,3	20,2	13,9
Modelo ICTP. Esc B2	14,2	9,1	4,1	4,5	5,5	8,3	10,8	16,2	21,2	24,0	24,2	20,0	13,6
Modelo UCM. Esc B2	15,5	9,9	6,3	5,0	6,4	8,8	11,5	16,8	21,7	25,2	25,1	20,9	14,5

Tabla 11. Valores medios mensuales de temperatura (°C) mensuales y anuales

A continuación se muestran los incrementos de la temperatura media en °C en las hipótesis futuras de todos los modelos frente a la serie CHAC:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Modelo SHMI. Esc A2	3,8	3,3	3,3	3,0	2,8	2,4	2,6	3,7	4,6	5,8	6,7	4,9	3,9
Modelo ICTP. Esc A2	3,5	3,1	0,3	2,5	2,5	2,4	2,8	4,2	5,2	4,9	5,6	5,1	3,5
Modelo UCM. Esc A2	4,2	3,8	3,5	2,9	2,9	2,8	3,2	4,2	4,9	5,9	5,9	4,7	4,1
Modelo SHMI. Esc B2	2,2	2,3	2,1	1,9	1,4	1,0	1,4	2,4	3,7	4,8	5,3	3,4	2,7
Modelo ICTP. Esc B2	1,9	2,2	0,4	1,6	0,9	0,9	1,4	3,0	4,0	3,9	4,1	3,2	2,3
Modelo UCM. Esc B2	3,2	3,1	2,6	2,1	1,8	1,3	2,1	3,7	4,4	5,0	5,0	4,0	3,2

Tabla 12. Comparación entre la serie real y las proyecciones futuras

6.1.3. Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial ha sido calculada en todas las hipótesis mediante la fórmula de Thornwaite, la hipótesis real con los datos calculados a partir de series CHAC y los futuros a partir de las series transformadas de los modelos climáticos. La siguiente tabla muestra los valores medios mensuales:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	50,2	22,0	11,0	9,6	13,8	30,0	42,7	74,5	104,5	128,0	117,5	82,2	686,0
Modelo SHMI. Esc A2	57,8	24,1	12,9	10,4	14,8	28,8	42,9	82,8	125,9	167,1	162,6	102,9	833,0
Modelo ICTP. Esc A2	57,2	24,2	5,8	9,6	14,6	29,8	45,4	88,1	132,0	158,2	152,3	104,4	821,6
Modelo UCM. Esc A2	59,5	25,6	13,1	9,8	15,1	30,4	46,2	86,5	128,1	168,1	155,5	100,7	838,7
Modelo SHMI. Esc B2	53,0	23,4	11,4	9,2	12,8	26,1	40,8	78,4	121,6	158,5	150,2	94,6	780,1
Modelo ICTP. Esc B2	52,2	23,9	7,5	9,1	12,1	26,6	41,8	84,0	124,5	150,4	141,0	94,2	767,2
Modelo UCM. Esc B2	56,8	24,9	12,1	9,0	13,2	26,1	42,6	85,5	126,2	159,9	147,8	97,6	801,7

Tabla 13. Valores medios mensuales de ETP (mm) mensuales y anuales

Para poder comparar unos modelos y unos escenarios con otros de forma más sencilla se adjunta la siguiente tabla en la que se han incluido los porcentajes de aumento de la ETP de las series futuras respecto de la denominada CHAC:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Modelo SHMI. Esc A2	15%	10%	17%	8%	7%	-4%	1%	11%	21%	31%	38%	25%	18%
Modelo ICTP. Esc A2	14%	10%	-48%	0%	6%	-1%	6%	18%	26%	24%	30%	27%	16%
Modelo UCM. Esc A2	19%	16%	19%	2%	9%	1%	8%	16%	23%	31%	32%	22%	18%
Modelo SHMI. Esc B2	6%	6%	4%	-4%	-7%	-13%	-4%	5%	16%	24%	28%	15%	11%
Modelo ICTP. Esc B2	4%	8%	-32%	-6%	-12%	-11%	-2%	13%	19%	17%	20%	15%	10%
Modelo UCM. Esc B2	13%	13%	10%	-7%	-4%	-13%	0%	15%	21%	25%	26%	19%	14%

Tabla 14. Comparación entre la serie real y las proyecciones futuras

6.1.4. Aportaciones

Por último, se adjuntan los resultados del modelo hidrometeorológico en los que la cuenca simuladas es idéntica en todos los modelos, variando únicamente los valores de los datos de partida, es decir las series de precipitación y temperatura.

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	41,4	36,1	43,8	39,0	31,7	46,5	51,8	74,1	56,6	30,7	40,0	36,8	528,4
Modelo SMHI.esc A2	40,8	35,3	42,3	33,2	23,0	34,1	34,7	35,7	19,9	13,3	18,6	29,9	360,9
Modelo ICTP.esc A2	40,2	30,5	32,6	25,8	22,6	38,5	35,0	27,6	15,2	13,0	23,8	32,6	337,3
Modelo UCM .esc A2	34,6	35,3	44,2	23,2	16,5	28,6	28,2	27,1	15,6	12,1	18,7	25,3	309,4
Modelo SMHI.esc B2	38,1	35,8	44,8	38,7	29,0	45,9	48,0	44,7	20,9	14,3	16,9	25,7	402,9
Modelo ICTP.esc B2	39,8	32,8	41,0	36,6	29,5	44,3	45,1	43,6	23,6	16,1	26,1	32,7	411,3
Modelo UCM .esc B2	35,7	34,9	49,9	33,6	20,7	30,5	28,7	25,6	16,1	13,8	22,6	28,7	340,8

Tabla 15. Valores medios mensuales de aportación (hm³) mensuales y anuales

En la siguiente tabla se muestra la variación de recurso hídrico, calculada como porcentaje de disminución de los hm³ de las series futuras respecto la denominada CHAC.

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Modelo SMHI.esc A2	-1%	-2%	-3%	-15%	-27%	-27%	-33%	-52%	-65%	-57%	-53%	-19%	-32%
Modelo ICTP.esc A2	-3%	-16%	-26%	-34%	-29%	-17%	-32%	-63%	-73%	-58%	-40%	-11%	-36%
Modelo UCM .esc A2	-16%	-2%	1%	-41%	-48%	-39%	-46%	-63%	-72%	-60%	-53%	-31%	-41%
Modelo SMHI.esc B2	-8%	-1%	2%	-1%	-9%	-1%	-7%	-40%	-63%	-53%	-58%	-30%	-24%
Modelo ICTP.esc B2	-4%	-9%	-6%	-6%	-7%	-5%	-13%	-41%	-58%	-48%	-35%	-11%	-22%
Modelo UCM .esc B2	-14%	-3%	14%	-14%	-35%	-34%	-45%	-65%	-72%	-55%	-43%	-22%	-36%

Tabla 16. Comparación entre la serie real y las proyecciones futuras

6.1.5. Gráficos

Por último, se incluyen una serie de gráficos con la evolución mensual de la precipitación, ETP y aportaciones de cada escenario comparando los tres modelos. Hay que recordar que con la metodología aplicada la distribución de precipitación y T (y en consecuencia ETP) es similar ya que la base de la transformación son los 68 años registrados. En el **Anejo 2** se adjunta toda la colección de gráficos (organizados por modelo y escenarios).

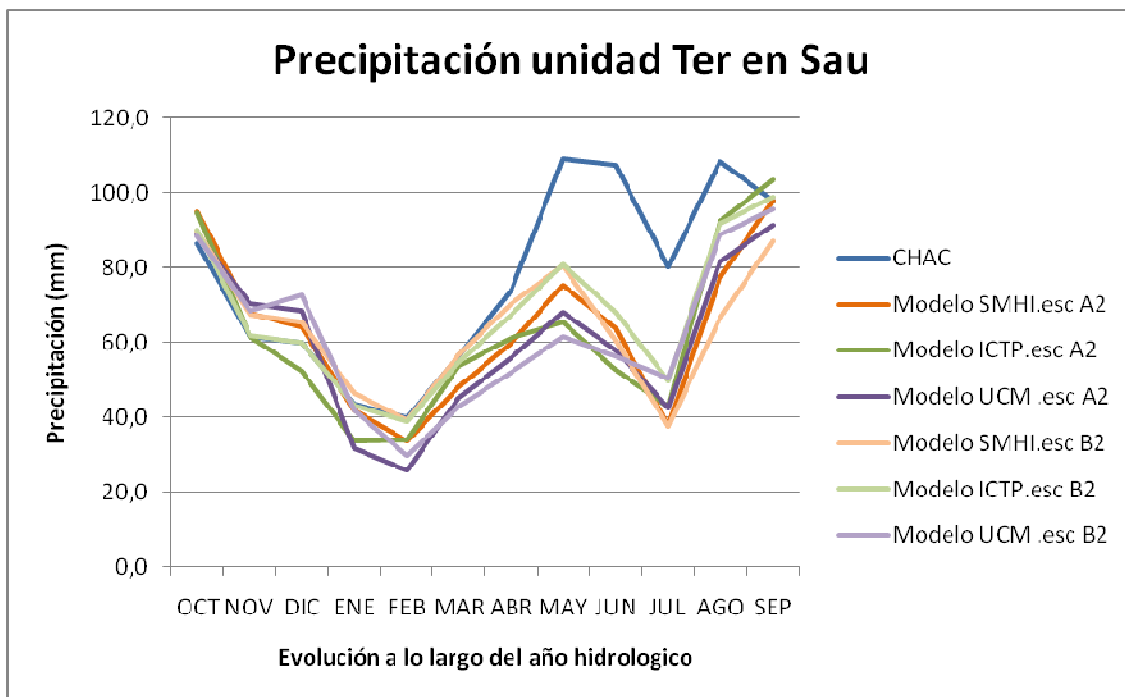


Figura 11. Evolución de la precipitación de la serie CHAC y de la serie en los escenarios A2 y B2 en los tres modelos estudiados

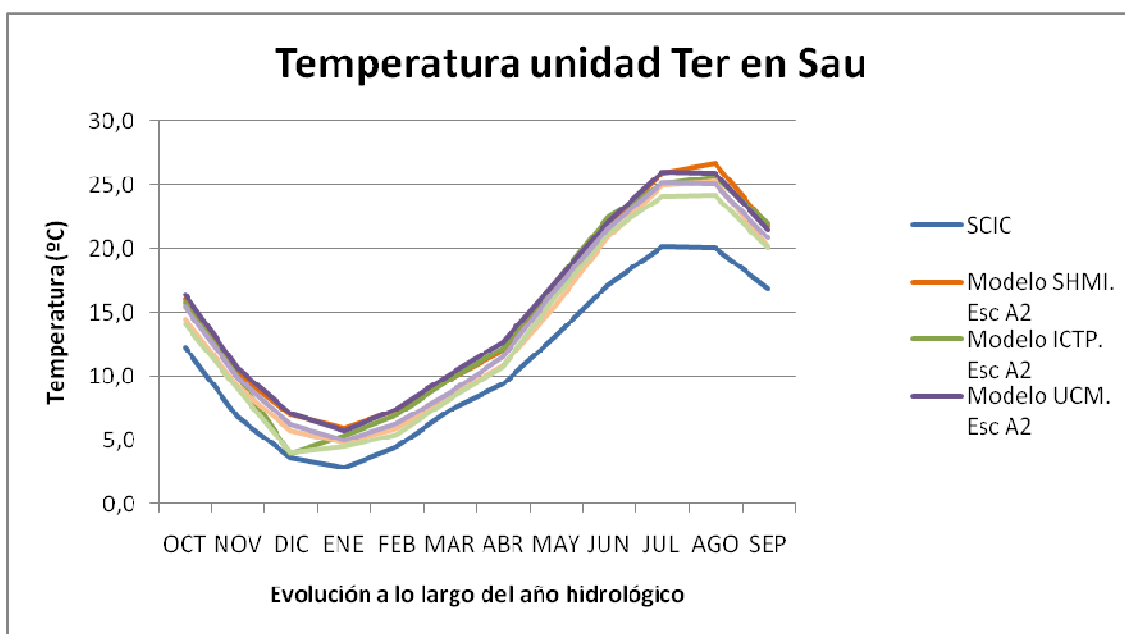


Figura 12. Evolución de la temperatura de la serie CHAC y de la serie en los escenarios A2 y B2 en los tres modelos estudiados

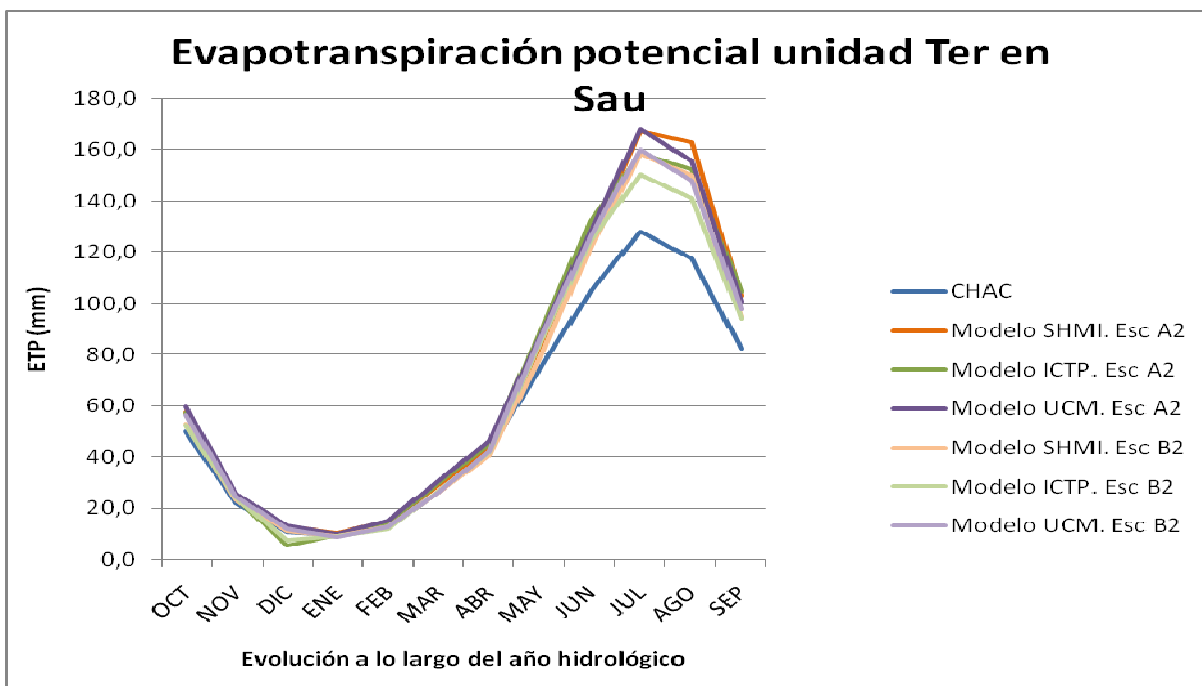


Figura 13. Evolución de la ETP de la serie CHAC y de la serie en los escenarios A2 y B2 en los tres modelos estudiados

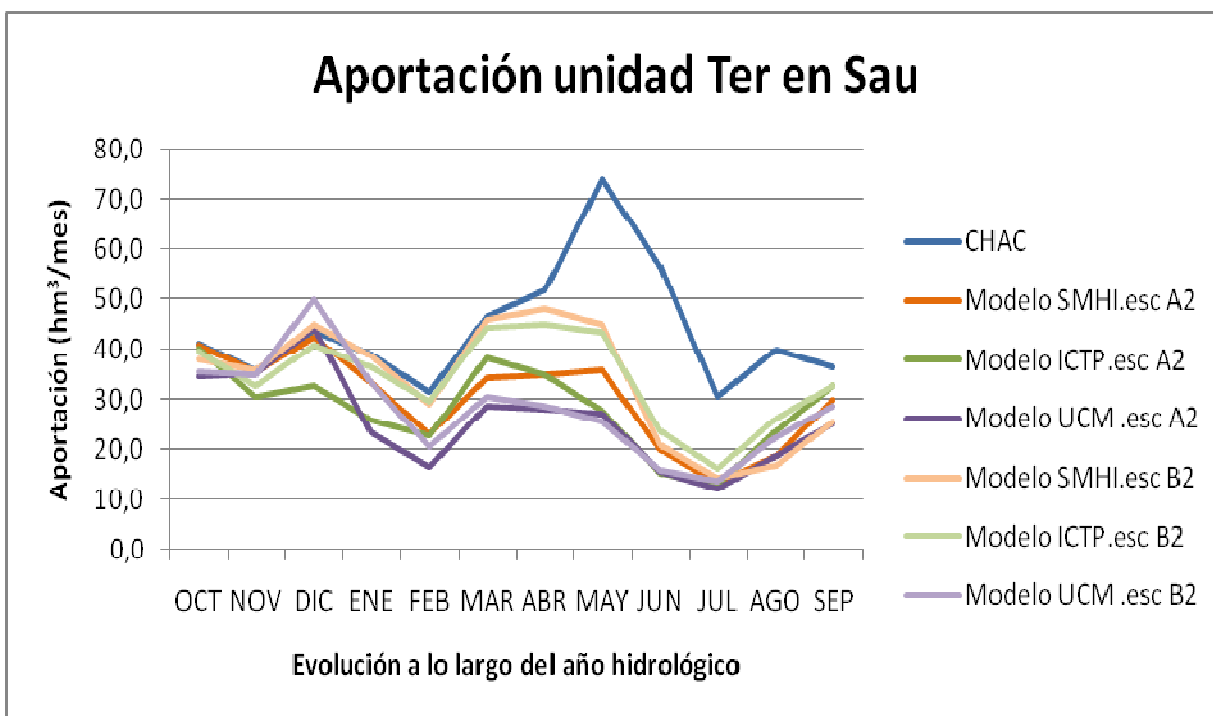


Figura 14. Evolución de las aportaciones de la serie CHAC y de la serie en los escenarios A2 y B2 en los tres modelos estudiados

A continuación se observan los diagramas de barras que muestran las diferencias entre la serie CHAC y las futuras, por variable y porcentaje.

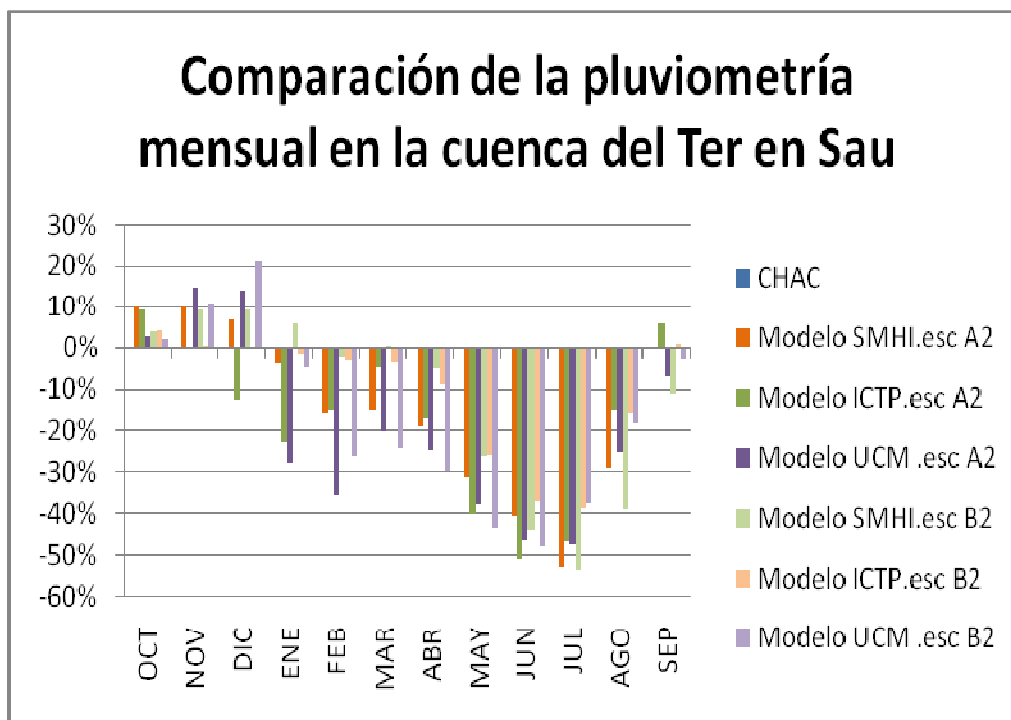


Figura 15. *Porcentaje de la disminución de pluviometría entre la serie CHAC y las series futuras*

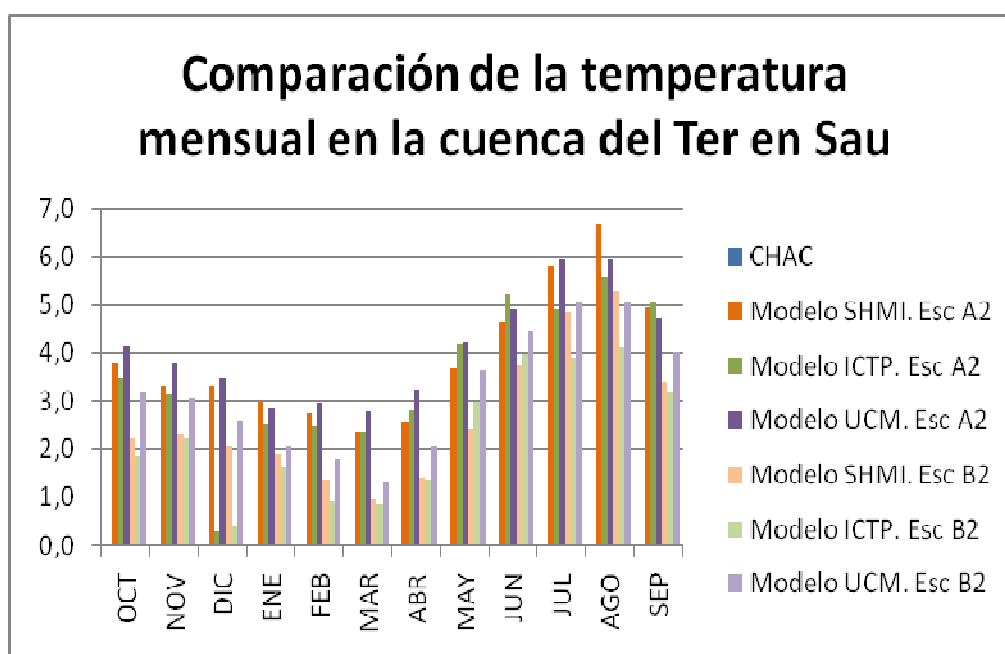


Figura 16. *Incremento de la temperatura media mensual (°C) entre la serie CHAC y las series futuras.*

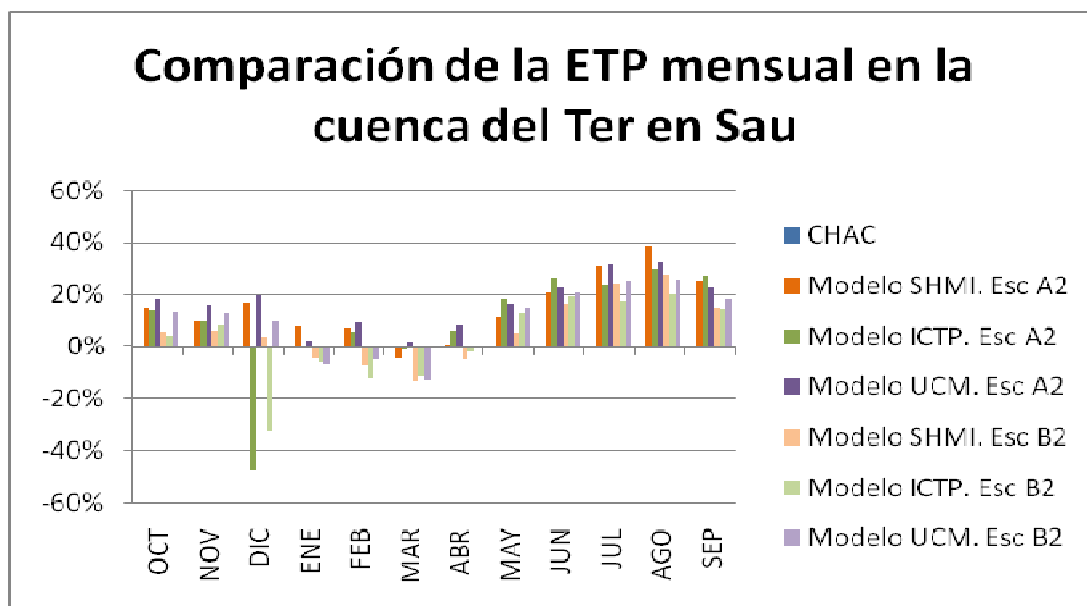


Figura 17. Porcentaje de aumento de la ETP entre la serie CHAC y las series futuras

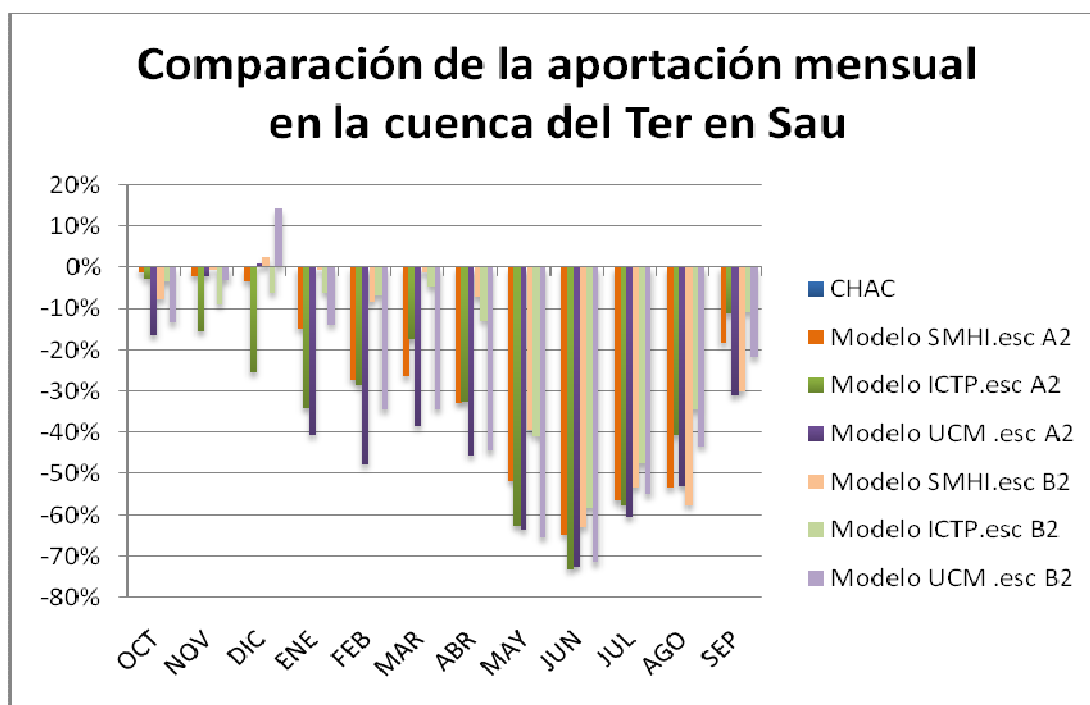


Figura 18. Porcentaje de disminución de las aportaciones entre la serie CHAC y las series futuras

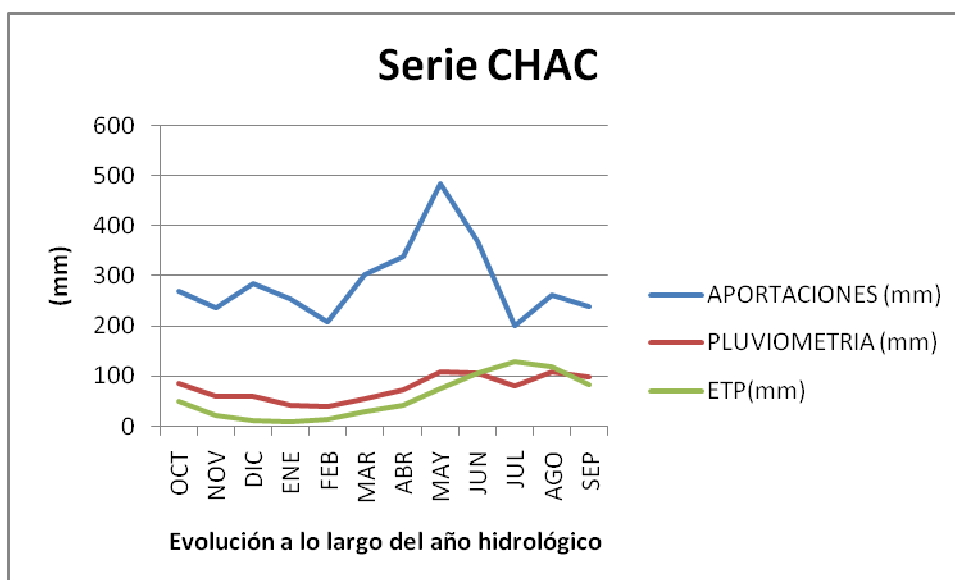


Figura 19. Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP de la serie CHAC

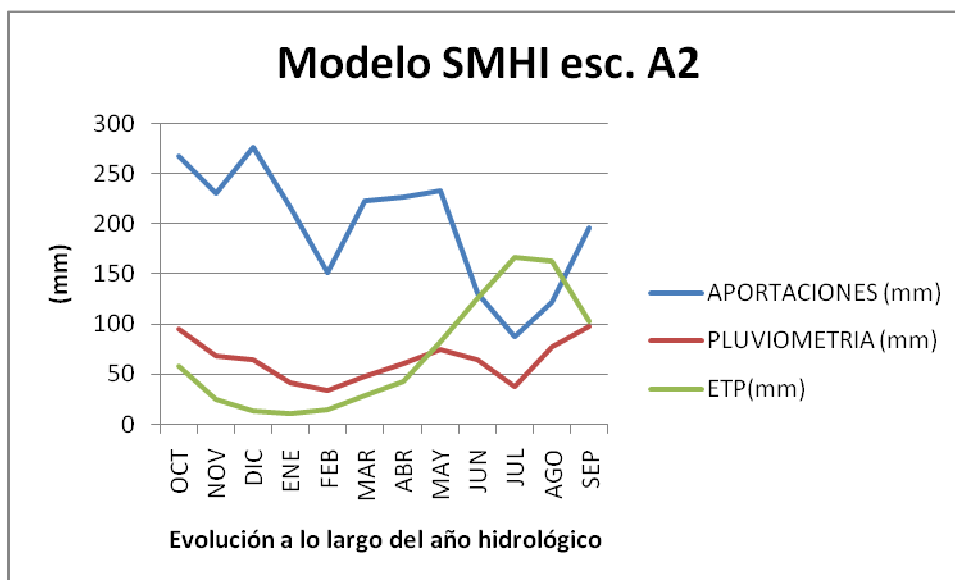


Figura 20. Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP del modelo SMHI en el escenario A2

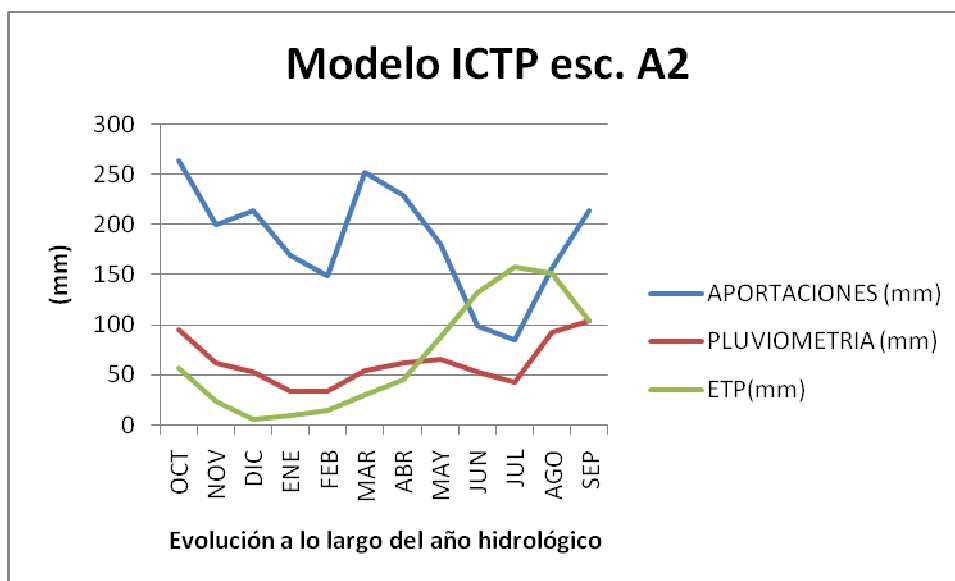


Figura 21. Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP del modelo ICTP en el escenario A2

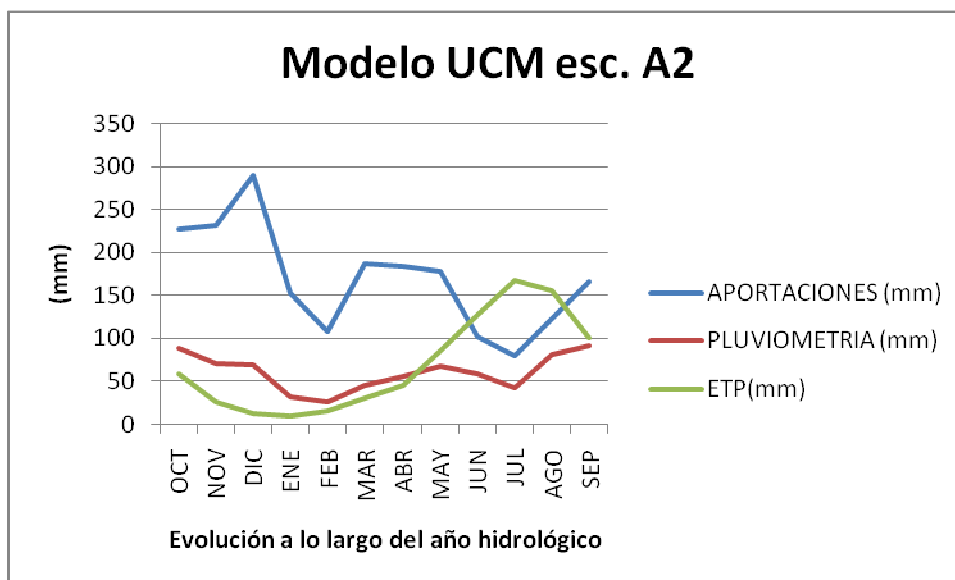


Figura 22. Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP del modelo UCM en el escenario A2

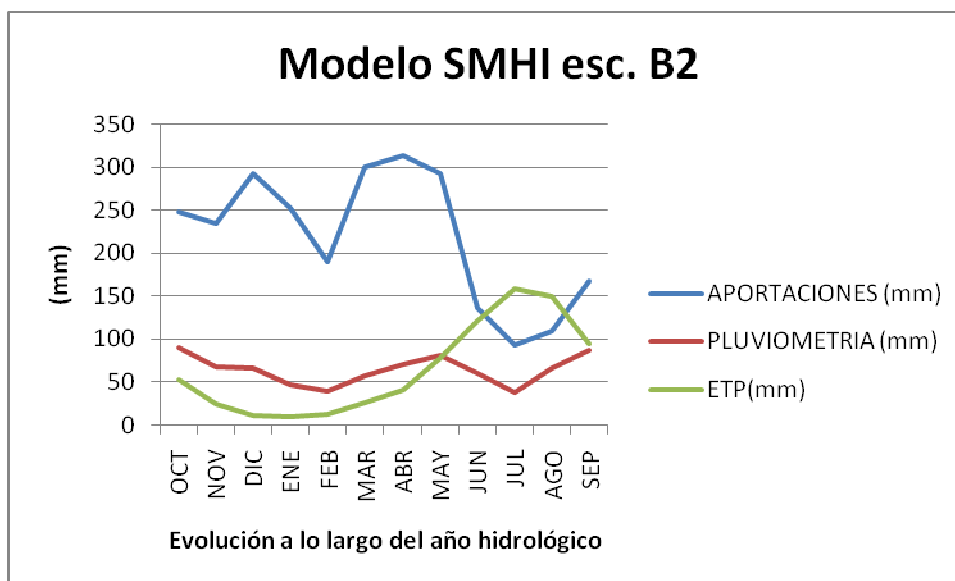


Figura 23. Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP del modelo SMHI en el escenario B2

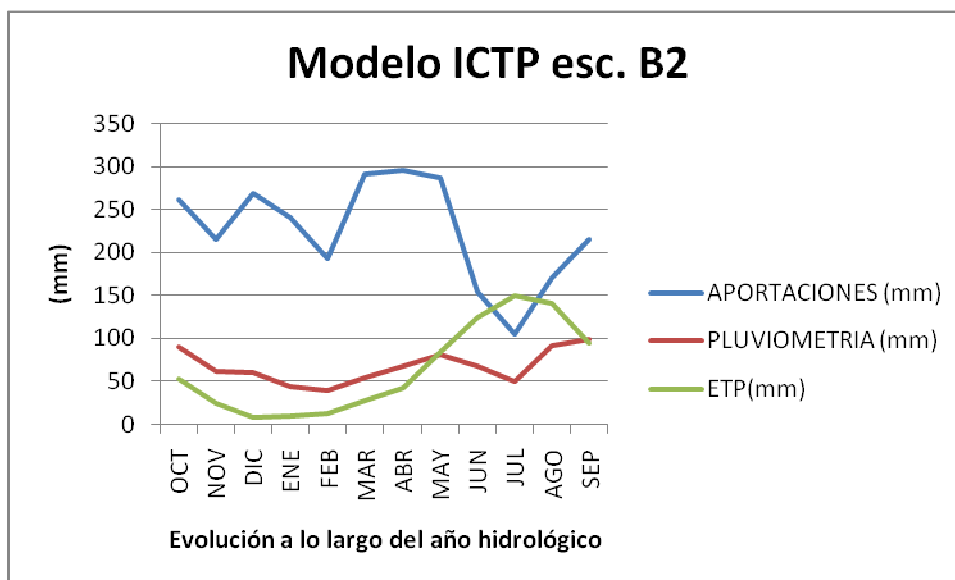


Figura 24. Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP del modelo ICTP en el escenario B2

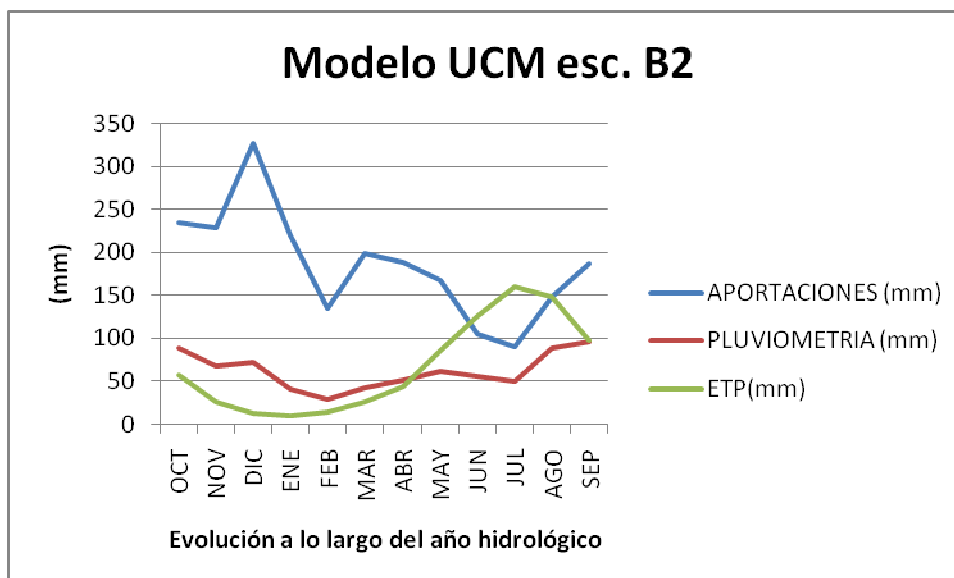


Figura 25. *Distribución mensual de las aportaciones, pluviometría y ETP del modelo UCM en el escenario B2*

6.1.6. Conclusiones

Puesto que las aportaciones dependen de otros factores como son ETP, Temperatura, y Pluviometría, su variabilidad es mucho mayor que los parámetros que solo dependen de un solo factor, por lo que la proyección a futuro es mucho más difícil de determinar de una manera fiable. Por todo esto, se procede a analizar por modelo y escenario, mientras que en el resto de las variables se analizan de manera conjunta.

6.1.6.1. Pluviometría

Se puede observar como en general los valores mensuales no presentan grandes diferencias respecto de la serie CHAC, sin embargo, el valor anual sí que presenta un valor significativamente mayor al observado en cada uno de los escenarios, oscilando esta diferencia entre 120 y 200 mm. A su vez, los valores mínimos son los obtenidos según el modelo español (UCM). También se podría destacar la gran disminución de valores que se produce en los meses de mayo, junio y julio para todos los escenarios.

Los valores de CHAC presentan picos en mayo y junio, a partir del cual se produce una brusca disminución siendo en julio su valor mínimo recuperando hasta alcanzar un máximo relativo en agosto, a continuación disminuye en los meses de invierno hasta alcanzar el mínimo absoluto en febrero.

Los diferentes modelos en los meses de noviembre, menos ICTP B2, se dan mayores precipitaciones que en CHAC. En febrero (mes con menor lluvia) exceptuando SMHI B2, llueve menos que en CHAC. El máximo se presenta en Mayo en la serie CHAC pero en el resto de modelos el valor es significativamente menor trasladándose el valor máximo a septiembre.

En general se puede observar como las precipitaciones aumentan hasta un 20% los meses de otoño, lo que podría suponer un aumento de las lluvias torrenciales, como es la gota fría, debido a la zona en la que nos encontramos.

A partir de enero, estas precipitaciones disminuyen considerablemente, llegando a alcanzar una disminución del 50% en los meses de verano.

6.1.6.2. Temperatura

Se puede observar como en general los valores mensuales no presentan variaciones extremas respecto de la serie CHAC. La variación anual oscila entre 0,5° y 4 C. A su vez, los valores máximos de temperatura se obtienen en julio y agosto en el modelo sueco (SMHI). También es reseñable que el incremento general de temperaturas entre el escenario A2 y el B2 es de 1°C.

Los incrementos de temperatura son máximos en los meses de julio y agosto, observándose que es el modelo sueco el que presenta unos valores de aumento superiores, pero sin embargo es el español el que presenta esos incrementos significativos durante un número mayor de meses al año.

Se puede observar como la temperatura sigue la misma tendencia en CHAC y las series futuras. La diferencia más significativa en las series futuras de temperatura es un aumento de 6.7 °C, observándose esa diferencia en agosto. La diferencia mínima en invierno es de 0.3°C.

Por otro lado, en el modelo ICTP, tanto en el escenario A2 como en el B2, de noviembre a diciembre se produce una brusca disminución de la temperatura, igualándose al valor de diciembre de la serie CHAC.

De forma general, la temperatura sufre de forma media un incremento entre 2y 4 °C, siendo menor este incremento en los meses de invierno y en verano el incremento llega hasta unos 6°C.

6.1.6.3. ETP

Se puede observar como en general los valores mensuales presentan grandes diferencias respecto de la serie CHAC (entre -48 y 38%), sin embargo, esta diferencia se centra en el valor anual ya que varía entre el 10 y el 20%, oscilando esta diferencia entre 110 y 150 mm. A su vez, los valores máximos de ETP se observan en agosto en el modelo sueco (SMHI).

La ETP es máxima en los meses de verano, observándose que es el modelo sueco el que presenta unos valores de aumento superiores, pero sin embargo es el italiano el que presenta los valores más extremos.

En general, en invierno los escenarios son muy similares a CHAC, sin embargo en diciembre el modelo ICTP presenta un valor menor al resto de modelos incluido CHAC.

En los meses de verano aumenta considerablemente en comparación a CHAC, siendo el mayor SMHI A2 seguido por UCM A2,

Como cabe esperar al aumentar la temperatura, la ETP aumenta de forma general todos los meses, con excepción de los meses entre enero y marzo, que disminuye un 10%. El aumento de ETP alcanza un valor de hasta un 40% en los meses de verano.

Es de destacar el modelo italiano en el mes de diciembre, ya que se produce una disminución de la ETP de hasta un 50%.

En general, el valor medio anual en el escenario A2 presenta un aumento entorno al 18% y en el escenario B2 en torno al 12%.

6.1.6.4. Aportaciones

Se puede observar como en general los valores mensuales presentan grandes diferencias respecto de la serie CHAC, sin embargo, el valor anual presenta un valor significativamente menor pero más centrado al observado en cada uno de los escenarios, oscilando esta diferencia entre 100 y 200 hm³. A su vez, los valores mínimos son los obtenidos según el modelo español (UCM). También es destacable la gran disminución de valores que se produce en los meses de estío para todos los escenarios.

Los porcentajes de disminución de las aportaciones son máximos en los meses de junio y julio, observándose que es el modelo español el que obtiene unos valores de disminución superiores al resto.

La disminución de aportaciones en el escenario A2 es aproximadamente de un 35% y en el B2 de un 27%. El valor máximo se da en el junio (73%).

ICTP A2

La aportación disminuye significativamente, sobre todo en los meses de verano. El caudal punta que antes se encontraba en mayo se desplaza a marzo. El caudal mínimo en CHAC estaba entre julio y agosto y en este escenario se desplaza hasta junio y julio, produciéndose en agosto un aumento de las aportaciones.

ICTP B2

El caudal punta no presenta un pico para este modelo a su vez desplazada hacia la izquierda entre marzo y mayo. En general las aportaciones son menores, excepto en el mes de marzo en el que las aportaciones son mayores a la serie CHAC.

En verano el valle era más suave y actualmente el descenso es mucho más pronunciado y significativo produciéndose en julio.

SMHI A2

Se produce un descenso en las aportaciones en febrero bastante acusado, no existe un pico, existe una meseta desplazada hacia la izquierda entre marzo y mayo.

El valle es mucho más pronunciado en los meses de estío.

SHMI B2

En general las aportaciones son menores, excepto en el mes de marzo en el que las aportaciones son mayores a la serie CHAC.

Entre diciembre y enero las aportaciones son muy similares a las de la serie CHAC.

El valle es mucho más pronunciado en los meses de estío.

El pico está desplazado a abril.

La disminución de aportación en febrero es mucho más acusada que en la serie CHAC.

UCM A2

El máximo coincide con la aportación de la serie CHAC del mes de diciembre, cuando en la serie original se produce en mayo.

Los mínimos correlacionan con la serie original pero son menores.

Existe una meseta entre marzo y mayo, en lugar de un pico de aportaciones.

UCM B2

El máximo se encuentra en diciembre y supera en valor a las aportaciones de la serie CHAC, a partir de este mes se produce una disminución muy significativa hasta febrero.

El tercer máximo se encuentra en marzo, a su vez disminuye progresivamente hasta mayo, a partir del cual se produce una disminución brusca de las aportaciones para posteriormente volver a incrementarse en agosto.

Las aportaciones disminuyen de forma radical durante todos los meses, alcanzando una disminución de hasta un 70% en los meses de verano.

6.1.6.5. Análisis de comparación entre escenarios

Seguidamente, se describe la diferencia de aportaciones de cada uno de los modelos entre sus diferentes escenarios (véase 6.1.5 gráficos):

MODELO SMHI

En el escenario A2 se puede observar que el máximo de aportación se alcanza en el mes de diciembre, con un valor de aproximadamente 250 mm, mientras que el valor mínimo se consigue en el mes de julio con una aportación de 90 mm, aproximadamente.

En el escenario B2 la aportación es mucho más elevada que en el escenario anterior. El máximo se alcanza en el mes de abril con un valor superior a los 300 mm. El valor mínimo se alcanza en julio, con un valor de 100 mm.

MODELO ICTP

En el escenario A2 se puede observar que el máximo de aportación se alcanza en el mes de octubre, con un valor de aproximadamente 260 mm, mientras que el valor mínimo se consigue en el mes de julio con una aportación de 85 mm, aproximadamente.

En el escenario B2 la aportación es mucho más elevada que en el escenario anterior. El máximo se alcanza en el mes de abril con un valor aproximado de 300 mm. El valor mínimo se alcanza en julio, con un valor de 100 mm.

MODELO UCM

En el escenario A2 se puede observar que el máximo de aportación se alcanza en el mes de diciembre, con un valor de aproximadamente 300 mm, mientras que el valor mínimo se consigue en el mes de julio con una aportación de 90 mm, aproximadamente.

En el escenario B2 la aportación sigue la misma tendencia que en el escenario anterior. El máximo se alcanza en el mes de diciembre con un valor superior a 300 mm. El valor mínimo se alcanza en julio, con un valor de 100 mm, aproximadamente.

6.1.6.6. Resumen de conclusiones

Para realizar una evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos hay varios puntos clave dentro del análisis. Estos son:

- El modelo hidrológico empleado para el cálculo de los recursos hídricos y sus limitaciones
- En caso de no realizar un estudio global, la cuenca elegida como representativa para realizar el análisis.
- Los datos climáticos de entrada al modelo hidrológico, ya que de la bondad de éstos depende el resultado.

El modelo hidrológico empleado es el modelo de Témez. Este modelo calcula a escala mensual. Este es un modelo continuo con el que se obtienen valores medios mensuales no siendo posible modelizar caudales máximos instantáneos ya que para esto es necesario un modelo que trabaje en una escala temporal menor.

La elección del embalse de Sau en el río Ter se ha efectuado basándose en la carencia de estudios similares sobre cambio climático en dicha cuenca. Se calibró el estudio de Recursos Hídricos, periodo 1940/41-2007/08, con el modelo Sacramento.

Para realizar la comparación entre la serie CHAC (1940/41-2007/08) y las proyecciones futuras (2071-2100) el modelo utilizado es el mismo y la caracterización paramétrica de la cuenca es la misma. De este modo se establece la misma base comparativa para que las limitaciones del modelo afecten de forma homogénea a los resultados.

Por último, comentar, que si bien los datos meteorológicos empleados en la evaluación del impacto en los recursos hídricos no son los apropiados para la escala del trabajo, la indiscutible ventaja es que en la medida que ha sido posible se ha realizado un análisis que incorpora los resultados de la aplicación de las conclusiones del grupo de expertos del IPCC publicadas en su tercer informe aunque esta aplicación se halle limitada a los escenarios A2 y B2 en el periodo 2071-2100.

De todos los modelos con dato disponible de precipitación y temperatura se eligieron aquellos que mejor encajaban a nivel local con las series de precipitación y temperatura generadas en el estudio de Recursos pero también que respondieran bien a nivel regional dentro del proyecto PRUDENCE.

De los tres modelos climáticos de los que se han utilizado los datos de precipitación y temperatura para generar las series de aportaciones, los modelos PROMES de la UCM (Universidad Complutense de Madrid), el RegCM del ICTP (Centro Internacional de Física Teórica de Italia) y el RCAO del SMHI (Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia), ninguno destaca respecto de los otros de forma global como para concluir analizando los resultados del mismo, por lo que las conclusiones se han realizado empleando medias o rangos calculadas con los datos y resultados de todas las hipótesis, que por otro lado es lo lógico cuando el escenario horizonte se sitúa a partir del año 2070.

Se ha estudiado el impacto en los recursos hídricos desde varias perspectivas, por un lado comparando valores medios y por otro su distribución temporal, evolución de las sequías y el posible aumento de los valores máximos.

El cambio en la **precipitación** se produce de forma estacional, aumentando en algunos meses (entre septiembre y diciembre) en todas las proyecciones futuras y disminuye drásticamente en verano, en torno al 50%, presentando también reducciones muy acusadas en enero y febrero. Los mínimos se presentan en los meses de julio y agosto y febrero. En cuanto a los periodos más lluviosos se sitúan de nuevo en septiembre y octubre. El máximo relativo que en la actualidad se presenta en mayo se adelanta al mes de abril. Esto hace que el periodo seco de enero a marzo se acorte un mes mientras que el de verano aumenta en casi 2.

En cuanto a la **temperatura** los resultados de todos los modelos son mucho más uniformes. En el escenario más pesimista (A2) el aumento previsto es de 3,8° C mientras que en el más favorable (B2) este aumento es de 2.7° C en valores medios anuales. Estas conclusiones se obtienen del análisis de promedios de las series de proyecciones transformadas de precipitación y temperatura al periodo 1940/41-2007/08 comparadas con las series CHAC

La **ETP**, calculada a partir de la temperatura mediante el mismo método en las series CHAC y en las proyecciones futuras, también se incrementa. Dicho aumento puede situarse en torno al 18% en el escenario A2 y el 12% en el B2.

Por último, en cuanto a las **aportaciones** calculadas con el programa CHAC, todos los modelos presentan mayores reducciones en el escenario A2, la diferencia entre escenarios es sensiblemente parecida y de todos los modelos el de la UCM es el que mayor reducción de aportaciones presenta.

7. CLASIFICACIÓN DE LAS SERIES DE APORTACIONES

7.1. CLASIFICACIÓN DE CAUDALES POR PERCENTILES

Se han clasificado los caudales según percentiles de 0 a 1. En la siguiente tabla se muestra como resumen, los valores que marcan los caudales que se sitúan en los percentiles 0.25, 0.50 y 0.75 (probabilidad de no excedencia) de las series anuales en el periodo común de 68 años:

HIPÓTESIS	Aportación media anual (hm ³)		
	Percentil	Percentil	Percentil
	0.25	0.50	0.75
CHAC	386,79	483,89	632,20
Modelo SMHI. Esc A2	228,45	327,19	450,47
Modelo ICTP. Esc A2	220,76	308,37	433,62
Modelo UCM. Esc A2	194,48	273,50	395,09
Modelo SMHI. Esc B2	265,93	370,65	495,21
Modelo ICTP. Esc B2	277,67	377,74	506,35
Modelo UCM. Esc B2	213,09	305,72	414,36

Tabla 17. Valores representativos de las series

El siguiente gráfico muestra esa misma tabla, en la que se observa de forma más simple el descenso del valor del percentil 0.50 de las series futuras respecto de la calculada en el estudio de Recursos, CHAC.

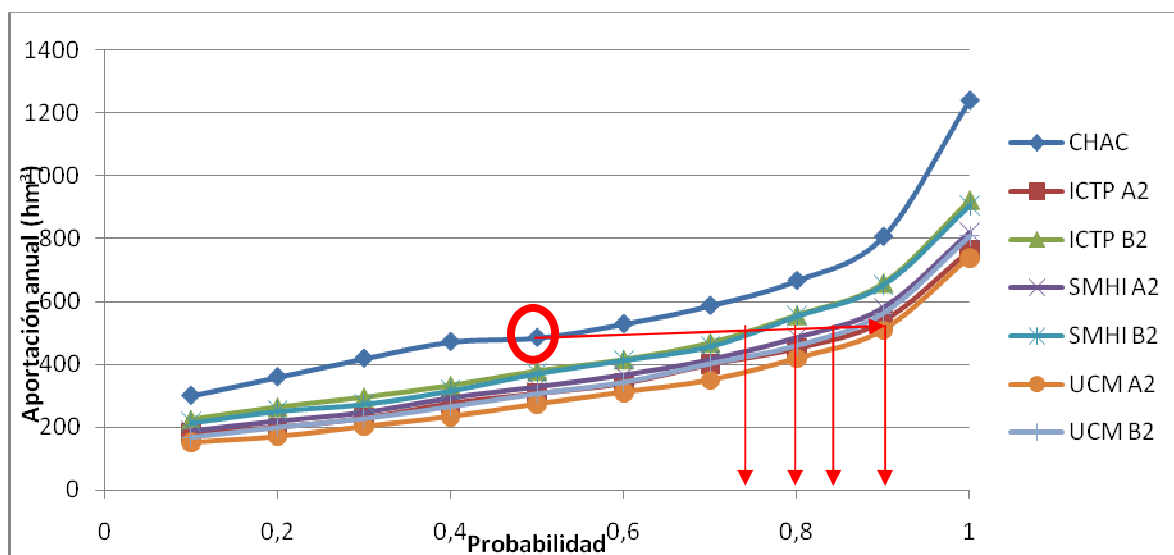


Figura 26. Gráficos de probabilidad de las series de aportación real y futuras. Cuenca del Ter en el embalse de Sau

La conclusión al analizar esta clasificación que el valor del caudal del percentil del 0.5, que se puede asemejar al caudal tipo de un año medio a futuro el mismo valor estaría clasificado entre los percentiles 0.7 y 0.9, es decir pasaría a ser un caudal tipo año húmedo. Esta conclusión tiene una gran repercusión en la vida piscícola y la vegetación de ribera.

7.2. ANÁLISIS DE CAUDALES CON LA APLICACIÓN IAHRIS

Adicionalmente se ha realizado un ajuste utilizando el programa IAHRIS (índices de alteración hidrológica en ríos) a la serie anual de aportaciones medias.

Esta aplicación informática permite obtener:

- Parámetros con los que caracterizar el régimen hidrológico, tanto natural como alterado, en un punto de un río. Estos parámetros valoran aspectos hidrológicos del régimen con marcada trascendencia ambiental (duración de las sequías, estacionalidad de las avenidas...).
- Facilitando datos de los dos regímenes, natural y alterado, la aplicación, además, calcula unos índices que permiten valorar el grado de alteración del régimen hidrológico en aquellos aspectos de mayor significación ambiental.

Los valores de las clasificaciones de las series de aportaciones, se adjuntan en el [Anejo nº 3](#) a esta memoria.

Para este proyecto se considera régimen natural a toda la cuenca a estudio ya que como se observa en el punto 2, el punto de cierre se encuentra aguas arriba del embalse de Sau.

A continuación se muestran la caracterización de la variabilidad interanual, las aportaciones mensuales, en este caso en régimen natural, para el modelo CHAC y los diferentes escenarios asociados al mismo. Este análisis se llevó a cabo con el programa IAHRIS.

CHAC

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	637,173		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	637,173	y >	384,267
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	384,267		

Tabla 18. Caracterización de la variabilidad interanual

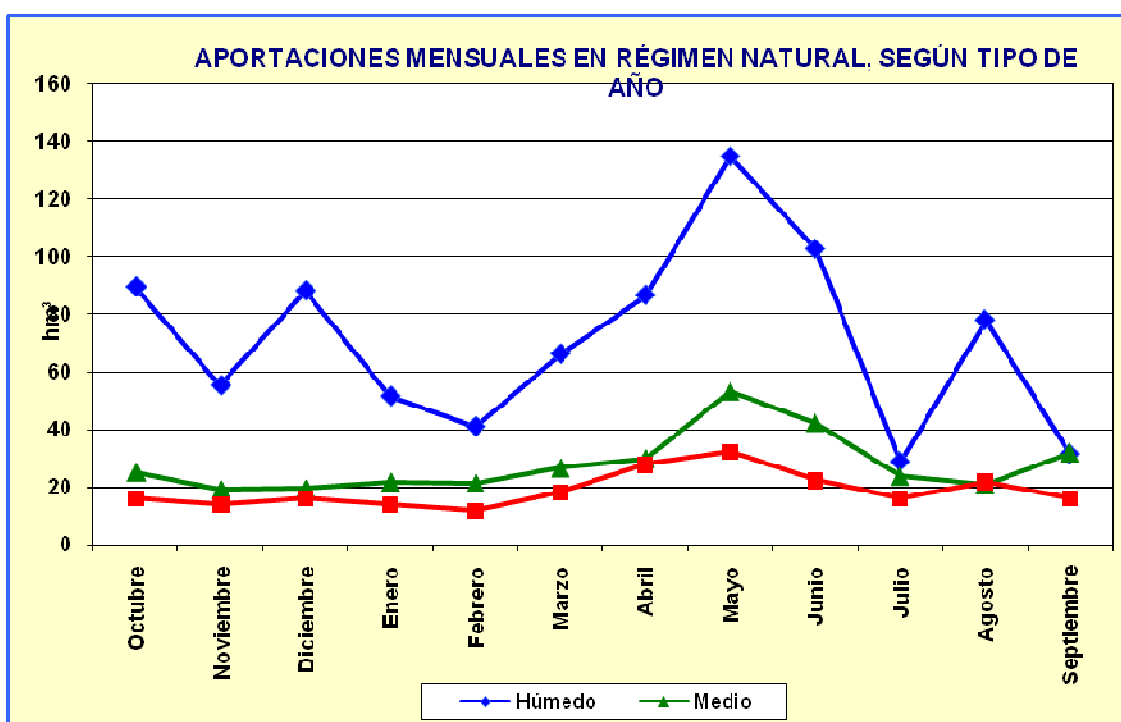


Figura 27. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo CHAC

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL	ASPECTO	PARÁMETRO		
		DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)	
VALORES HABITUALES	Aportaciones anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 818,32
				Año medio: 495,36
				Año seco: 304,54
				Año ponderado: 528,40
	Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año		Año húmedo: 171,49
				Año medio: 114,06
				Año seco: 48,03
				Año ponderado: 111,91

Tabla 19. Parámetros habituales para la caracterización del régimen

SMHI A2

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	460,480		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	460,480	y >	227,470
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	227,470		

Tabla 20. Caracterización de la variabilidad interanual

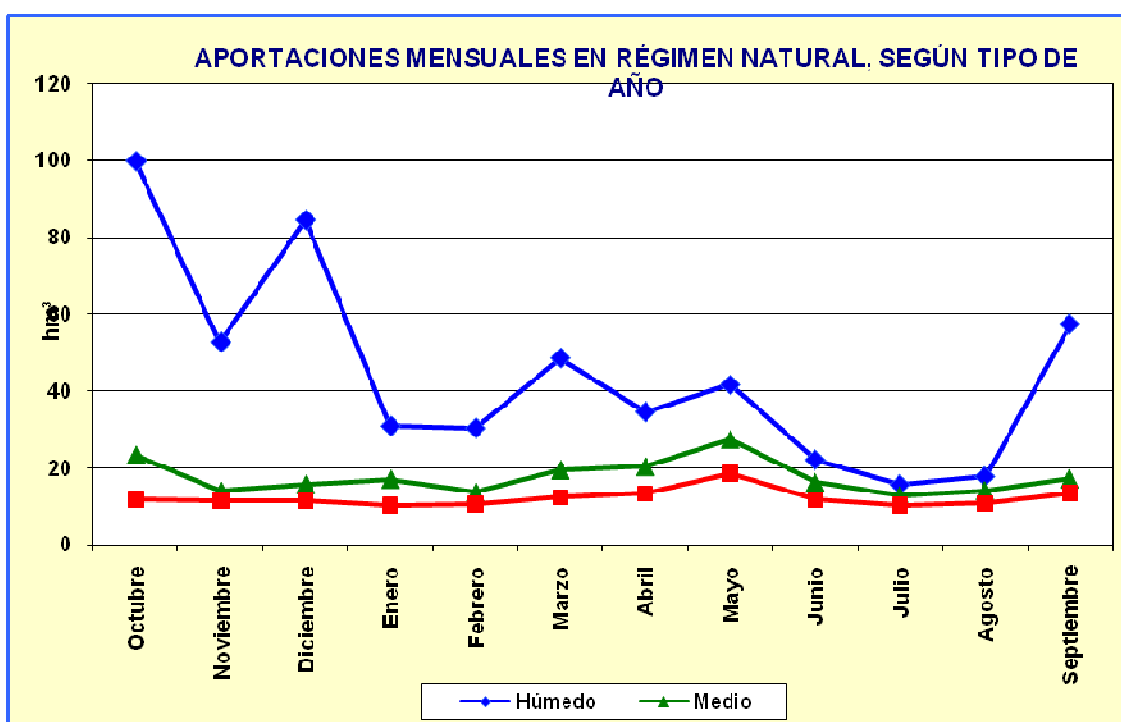


Figura 28. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo SMHI y el escenario A2

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL	ASPECTO	PARÁMETRO		
		DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)	
VALORES HABITUALES	Aportaciones anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 598,19
				Año medio: 327,59
				Año seco: 190,20
				Año ponderado: 360,89
	Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año húmedo: 157,34	
			Año medio: 83,34	
		Año seco: 29,85		
		Año ponderado: 88,47		

Figura 29. Parámetros habituales para la caracterización del régimen para el modelo SMHI y el escenario A2

ICTP A2

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	435,618		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	435,618	y >	214,078
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	214,078		

Tabla 21. Caracterización de la variabilidad interanual

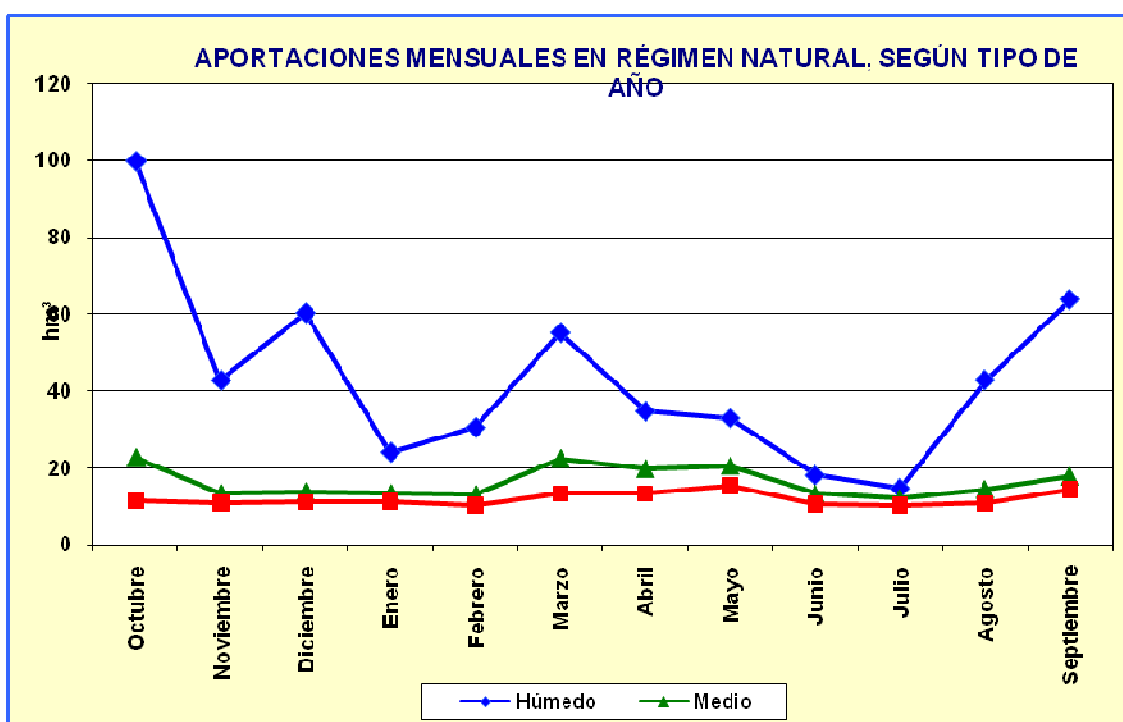


Figura 30. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo ICTP y el escenario A2

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL	ASPECTO	PARÁMETRO	
		DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)
VALORES HABITUALES	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 547,03
			Año medio: 311,25
			Año seco: 179,72
	Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año húmedo: 140,06
			Año medio: 79,83
			Año seco: 27,88
		Año ponderado: 81,90	

Tabla 22. Parámetros habituales para la caracterización del régimen para el modelo ICTP y el escenario A2

UCM A2

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	400,045		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	400,045	y >	190,827
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	190,827		

Tabla 23. Caracterización de la variabilidad interanual

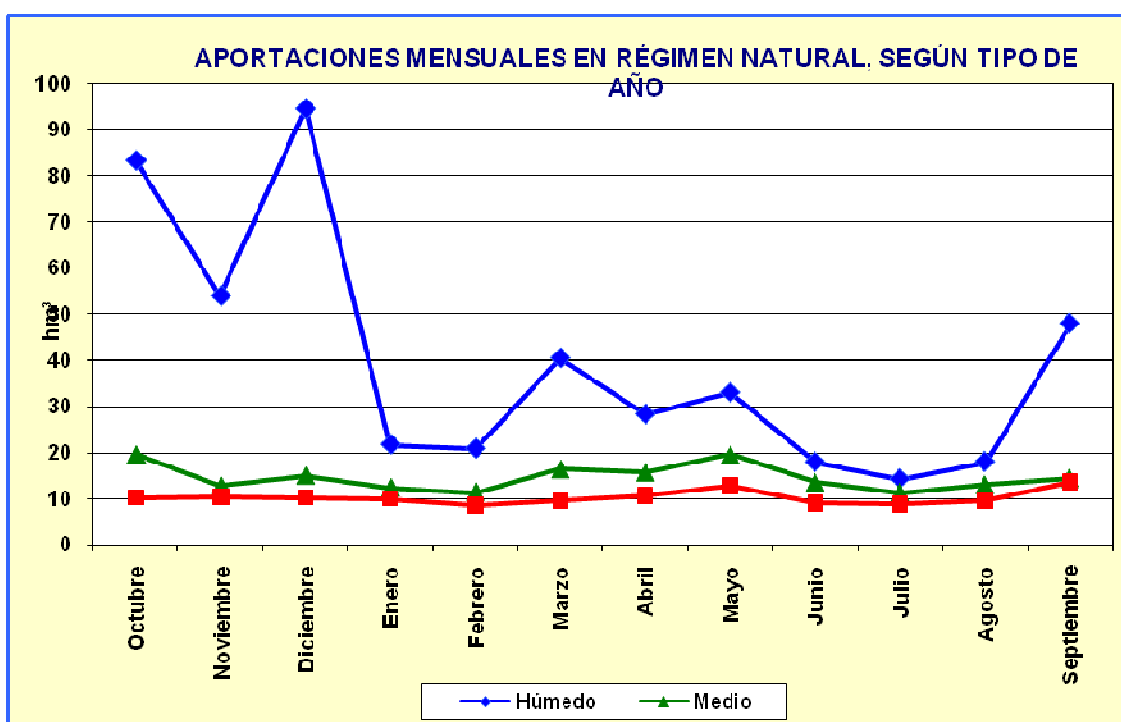


Figura 31. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo UCM y el escenario A2

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL		ASPECTO	PARÁMETRO	
			DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)
VALORES HABITUALES	Aportaciones anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 525,28
				Año medio: 279,08
				Año seco: 154,09
		Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año húmedo: 147,65
				Año medio: 72,84
				Año seco: 22,10
		Año ponderado: 78,86		

Tabla 24. Parámetros habituales para la caracterización del régimen para el modelo UCM y el escenario A2

SMHI B2

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	514,907		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	514,907	y >	265,177
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	265,177		

Tabla 25. Caracterización de la variabilidad interanual

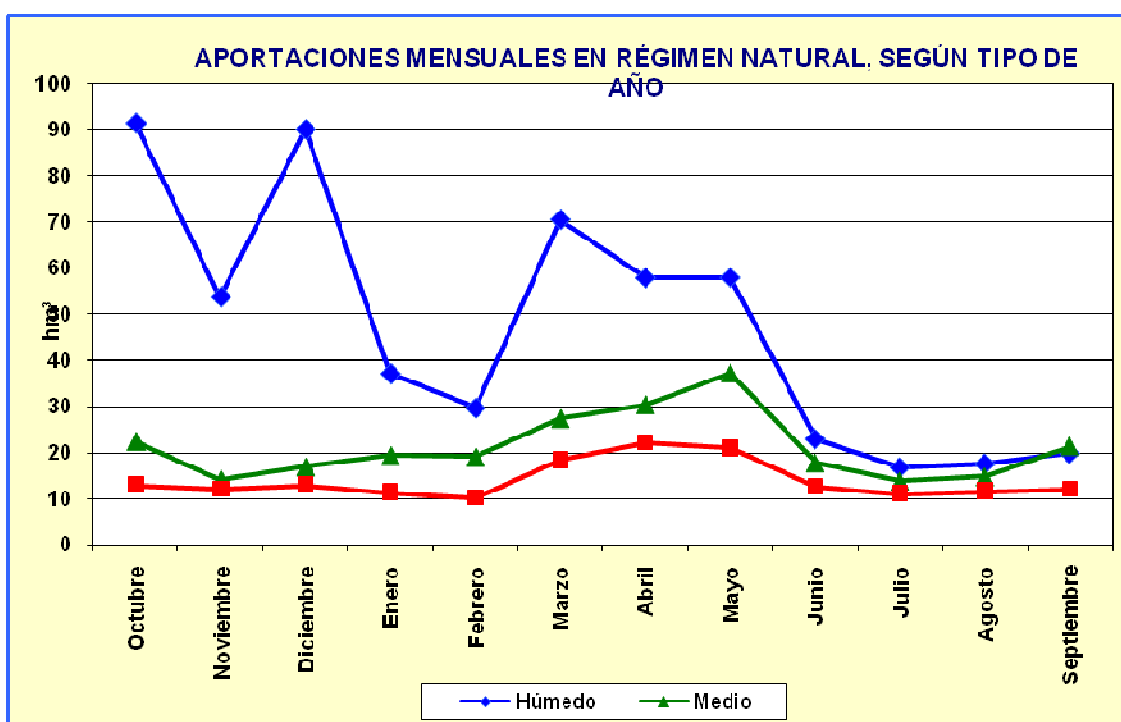


Figura 32. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo SMHI y el escenario B2

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL	ASPECTO	PARÁMETRO	
		DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)
VALORES HABITUALES	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 663,45
			Año medio: 365,70
			Año seco: 216,86
	Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año ponderado: 402,93
			Año húmedo: 166,39
			Año medio: 96,36
			Año seco: 36,66
			Año ponderado: 98,94

Tabla 26. Parámetros habituales para la caracterización del régimen para el modelo SMHI y el escenario B2

ICTP B2

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	513,320		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	513,320	y >	276,783
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	276,783		

Tabla 27. Caracterización de la variabilidad interanual

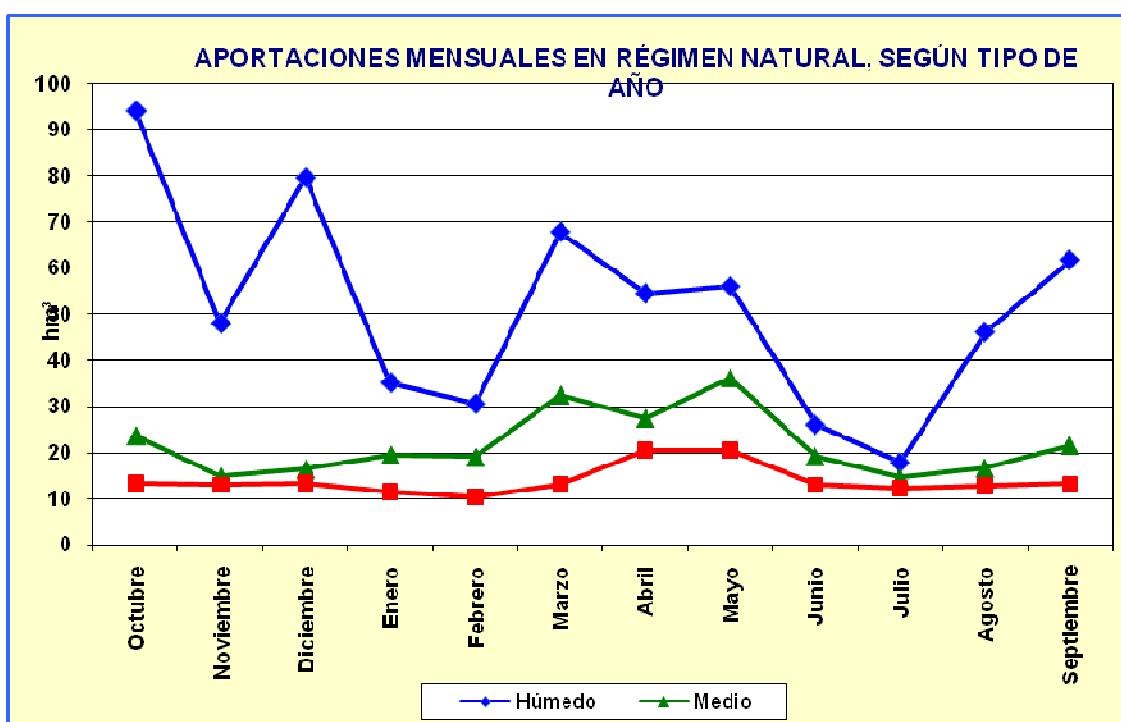


Figura 33. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo ICTP y el escenario B2

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL	ASPECTO	PARÁMETRO	
		DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)
VALORES HABITUALES	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 661,24
			Año medio: 377,79
			Año seco: 228,56
	Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año húmedo: 152,98
			Año medio: 94,08
			Año seco: 36,68
		Año ponderado: 94,46	

Tabla 28. Parámetros habituales para la caracterización del régimen para el modelo ICTP y el escenario B2

UCM B2

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL			
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	415,918		
Año medio si aportación anual (hm ³) <	415,918	y >	212,462
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	212,462		

Tabla 29. Caracterización de la variabilidad interanual

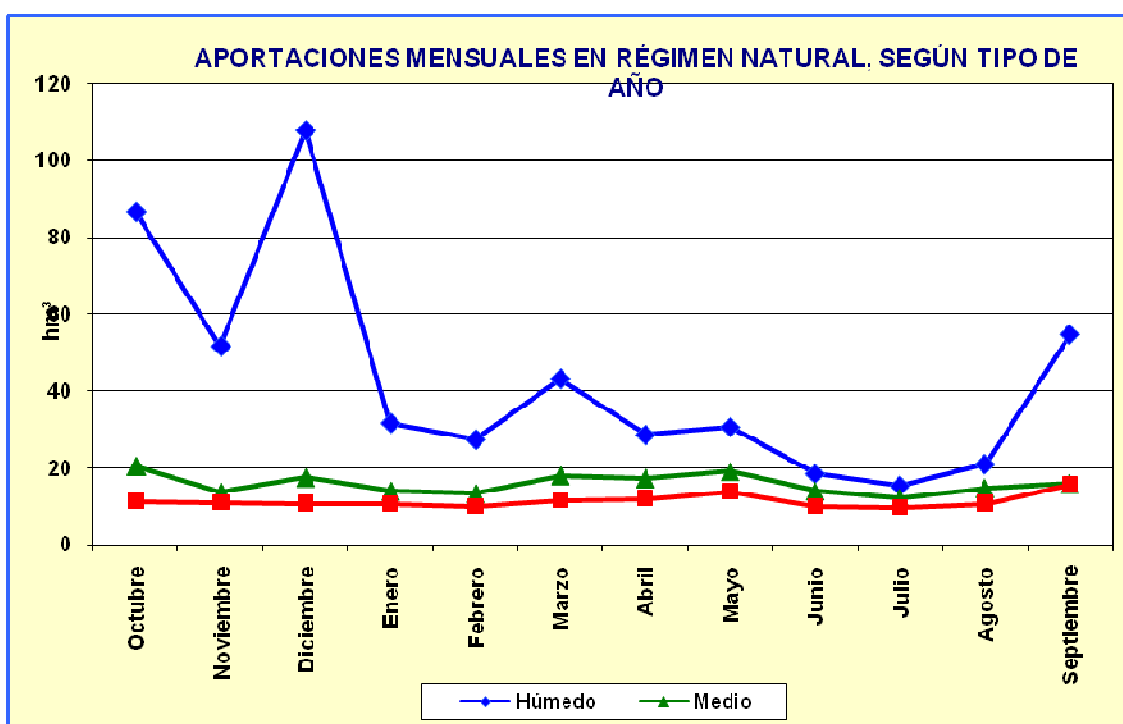


Figura 34. Aportaciones mensuales en régimen natural según tipo de año para el modelo UCM y el escenario B2

COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL	ASPECTO	PARÁMETRO			
		DESCRIPCIÓN	VALOR (hm ³)		
VALORES HABITUALES	Aportaciones anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo: 575,44 Año medio: 307,58 Año seco: 172,53 Año ponderado: 340,78	
			Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año húmedo: 159,79 Año medio: 78,89 Año seco: 25,24 Año ponderado: 85,70

Tabla 30. Parámetros habituales para la caracterización del régimen para el modelo UCM y el escenario B2

7.3. CONCLUSIONES

Con el programa IHARIS se procedió a evaluar cada uno de los modelos y los escenarios, obteniéndose para cada uno de ellos la caracterización de la variabilidad interanual, es decir, la clasificación de los años en húmedos, medios y secos, así mismo también se obtuvieron los valores medios mensuales para cada uno de los tres tipos de años existentes en la clasificación (húmedo, medio y seco). Se observa también diferentes aspectos de las aportaciones para cada uno de los modelos y escenarios, valorándose la magnitud y variabilidad de los datos obtenidos.

CHAC

Para la serie CHAC se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 637,17 hm³ y seco si la aportación era menor a 384,27 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 130 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 25 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 47 hm³ y el mínimo en noviembre con un valor aproximado de 20 hm³.

En los años secos el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 27 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 10 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

ICTP A2

Para la serie ICTP A2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 435,62 hm³ y seco si la aportación era menor a 214,08 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 100 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de marzo, con un valor aproximado de 20 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 15 y 19 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

SMHI A2

Para la serie SMHI A2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 460,48 hm³ y seco si la aportación era menor a 227,47 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 100 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 30 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 15 y 19 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

UCM A2

Para la serie UCM A2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 400,04 hm³ y seco si la aportación era menor a 190,83 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de diciembre, con un valor aproximado de 95 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 20 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 8 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 10 y 13 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

ICTP B2

Para la serie ICTP B2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 513,32 hm³ y seco si la aportación era menor a 276,78 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 95 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 37 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos el máximo se da en el mes de abril-mayo, con un valor aproximado de 21 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 10 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

SMHI B2

Para la serie SMHI B2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 514,91 hm³ y seco si la aportación era menor a 265,18 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 92 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 38 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos el máximo se da en el mes de abril, con un valor aproximado de 22 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 10 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos

UCM B2

Para la serie UCM B2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 415,92 hm³ y seco si la aportación era menor a 212,46 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de diciembre, con un valor aproximado de 115 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 20 hm³ y el mínimo en febrero-julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 10 y 15 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

7.3.1. Resumen

Finalmente para poder cuantificar de alguna manera el comportamiento de las series de recursos se **clasificaron** aplicando el programa IAHRIS, las series de aportaciones medias anuales en años medios, secos y húmedos.

El modelo del SMHI y el del ICTP presentan series semejantes en los meses invernales, mientras que el de la UCM baja la frecuencia mucho más, es decir, la serie se vuelve mucho más “seca” en todo el periodo.

La variación temporal de caudales en la zona a estudio, puede provocar que las diferentes especies presentes en la zona vean afectadas su ciclo biológico. El principal problema aparece por el cambio en la época de los periodos de sequía, ya que las especies piscícolas no están adaptadas. Las principales especies piscícolas presentes en la zona son: Carpa (*Carassius Auratus*), Cacho (*Leuciscus cephalus.*), Trucha (*Salmo trutta*), Trucha Arco Iris (*Salmo iridea*), Lucio (*Esox lucius*), Bermejuela (*Leuciscus cephalus.*), Black Bass (*Micropterus salmoides*), entre otros.

A su vez, el aumento de la temperatura producirá en el agua un aumento de la solubilidad de los gases por lo tanto se producirá un descenso de la concentración de oxígeno disponible por la fauna de la zona.

8. SEQUÍAS

8.1. CÁLCULO DE PERIODOS DE SEQUÍA

Para la evaluación de sequías se ha partido de las mismas series de aportaciones que se han analizado en el punto anterior.

Se ha calculado el valor acumulado de 4 meses de la serie de aportaciones mensuales, periodo 1940/41-2007/08 de la cuenca del Ter en el embalse de Sau, generada en el estudio de Recursos precedente y denominada CHAC. Se toma el valor acumulado de 4 meses ya que se considera un periodo representativo de la capacidad de la regulación de los recursos en las Cuencas Internas. El percentil del 0.20 de esta serie se fija como el umbral de sequía. Esto significa que en 1 de cada 5 periodos de 4 meses acumulados no se abastecen las necesidades hídricas y se considera sequía. Este umbral corresponde a 93,02 hm³. Se considera periodo deficitario aquel que no supera este valor. Estos criterios han sido facilitados por la Agencia Catalana del Agua.

A continuación se calcularon los déficits acumulados a escala mensual, considerando únicamente los periodos de 4 meses cuyo valor acumulado es inferior a 93,02 hm³. Como el estudio está planteado con el objetivo de analizar la recurrencia de estos periodos secos se ha trabajado a escala mensual sin acumular, utilizando el criterio de los 4 meses para localizar aquellos periodos considerados como secos. El umbral mensual considerado es el correspondiente al percentil 0.20 de la serie mensual es 16,87 hm³.

Estos mismos umbrales se aplican a las series de proyecciones futuras de los 3 modelos climáticos, en cada uno de los 2 escenarios generados.

La siguiente figura muestra la serie de aportaciones de 68 años (CHAC), el umbral a escala mensual y los déficits acumulados en las seis hipótesis generadas.

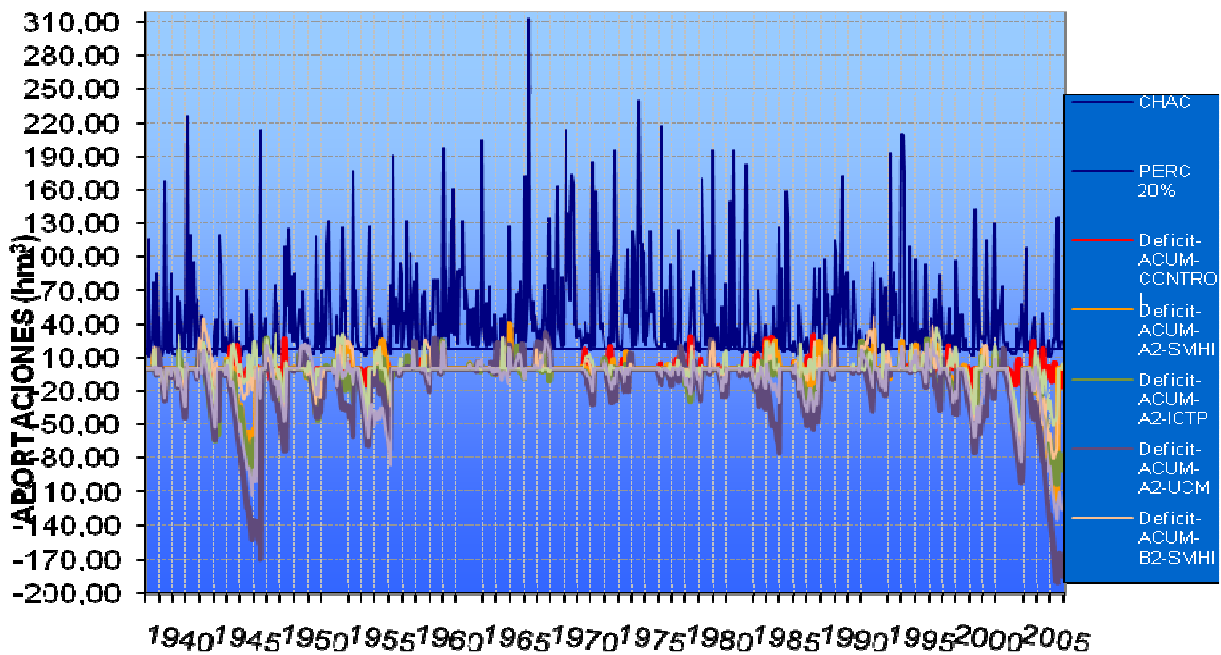


Figura 35. Serie de aportaciones (CHAC) y déficits acumulados mensuales de la serie CHAC y déficits acumulados de las proyecciones futuras.

La conclusión a la vista de los resultados es que:

- Es necesario revisar la metodología empleada porque los déficits parecen excesivos.
- Sin embargo aceptando lo que sale se detectan una serie de periodos críticos: la década de los 40, la de los 80 y la del 2000 y la tendencia actual es al déficit prolongado e incrementándose.

9. REFERENCIAS

9.1. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- www.googleearth.es
- www.icc.es
- www.aca.es
- www.aemet.es

9.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avaluació de l'impacte produït pel canvi climàtic sobre els recursos hídrics a las conques de capçalera de la muga i el francolí.
- Informe de asistencia técnica sobre métodos de aplicación de escenarios regionalizados de cambio climático para derivar los impactos con un modelo hidrológico de cuenca fluvial.
- 2007 Geert Lenderick *et al*: “ Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach” en Hydrology and Earth System Science.
- Bernhard Lehner *et al*: “Europe’s droughts today and in the future” en EuroWasser.

Impacto del cambio climático en los Recursos Hídricos de la cuenca del río Ter en el embalse de Sau



RESUMEN EJECUTIVO: Evaluación del impacto producido por el cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ter en el embalse de Sau.

BALFAGON SOLER, Rebeca
FERNÁNDEZ TOBAR, Paula

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS Y ÁMBITO DE ESTUDIO	3
3. CARÁCTERÍSTICAS DE LA CUENCA.....	4
4. CÁLCULO DE LAS APORTACIONES AL EMBALSE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROMETEOROLÓGICO.....	4
4.1. DETERMINACIÓN DE APORTACIONES CON EL MODELO SACRAMENTO	4
4.2. DATOS DE PARTIDA	4
4.3. MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ.....	5
4.4. MONTAJE DEL MODELO Y METODOLOGÍA.....	5
4.5. CALIBRACIÓN	6
4.5.1. Descripción del proceso.....	6
4.5.2. Resultados obtenidos	6
4.5.3. Conclusiones.....	7
4.6. VALIDACIÓN	7
4.7. SIMULACIÓN/RESULTADOS	7
5. CÁLCULO DE LAS APORTACIONES CON LAS SERIES DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS	10
5.1. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	10
5.1.1. Escenarios del IPCC.....	10
5.1.2. Generación de proyecciones climáticas.....	10
5.2. SERIES CLIMÁTICAS INTRODUCIDAS EN EL MODELO.....	11
5.2.1. Topología.....	11
5.2.2. Generación de series climáticas futuras.....	12
5.3. CÁLCULO DE APORTACIONES	13
5.3.1. Descripción del proceso.....	13
5.3.2. Generación de aportaciones futuras.....	14
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	14
6.1. RECURSOS HÍDRICOS.....	14
6.1.1. Pluviometría	14
6.1.2. Temperatura	14
6.1.3. Evapotranspiración Potencial.....	15
6.1.4. Aportaciones	15
6.1.5. Conclusiones.....	15
6.1.5.1. Resumen de conclusiones	15
7. CLASIFICACIÓN DE LAS SERIES DE APORTACIONES	17
7.1. CLASIFICACIÓN DE CAUDALES POR PERCENTILES.....	17
7.2. ANÁLISIS DE CAUDALES CON LA APLICACIÓN IAHRIS	18
7.3. CONCLUSIONES.....	18
7.3.1. Resumen.....	19
8. SEQUÍAS	20
8.1. CÁLCULO DE PERIODOS DE SEQUÍA.....	20
9. REFERENCIAS.....	22

1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2002, la Agencia Catalana del Agua viene realizando estudios sobre la implicación del cambio climático en los recursos hídricos. En dichos trabajos el análisis del impacto producido por el cambio climático ha partido de las hipótesis y conclusiones que el conjunto de expertos de la ONU (IPCC) ha ido publicando a lo largo de estos años.

En el presente documento se analizará la cuenca del río Ter y en concreto las aportaciones al embalse de Sau.

Se exponen en este trabajo las principales conclusiones de los informes de cambio climático realizados por el IPCC, bajo las cuales se han desarrollado los modelos climáticos acoplados océano-atmósfera. Las proyecciones futuras de precipitación y temperatura de estos modelos han sido empleadas para la comparación de futuras aportaciones con respecto a las actuales. Así mismo, se pone de manifiesto la metodología desarrollada para efectuar dicha comparación, así como las conclusiones de todo el trabajo realizado.

2. OBJETIVOS Y ÁMBITO DE ESTUDIO

El objeto de este estudio es la evaluación del impacto producido por el cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ter en el embalse de Sau. Teniendo en cuenta esta información, se podrán determinar los recursos de la cuenca para su correcta gestión y planificación futura.

La evaluación del impacto causado por el Cambio Climático se determinará a partir del cálculo de los recursos hídricos con el mismo modelo hidrometeorológico con el que se ha simulado la serie 1940/41-2007/08, pero introduciendo como datos las proyecciones futuras de precipitación y temperatura teniendo en cuenta varias hipótesis o escenarios que se consideraron posibles a finales del S. XXI, según los expertos del IPCC. Los resultados obtenidos con el modelo hidrometeorológico fueron comparados con otros estudios realizados con anterioridad para comprobar la fidelidad del mismo.

Una vez estimados los recursos futuros, se comparan estos con los obtenidos para el periodo 1940/41-2007/08 a partir de datos registrados en estaciones climáticas.

La siguiente figura muestra el ámbito de estudio.

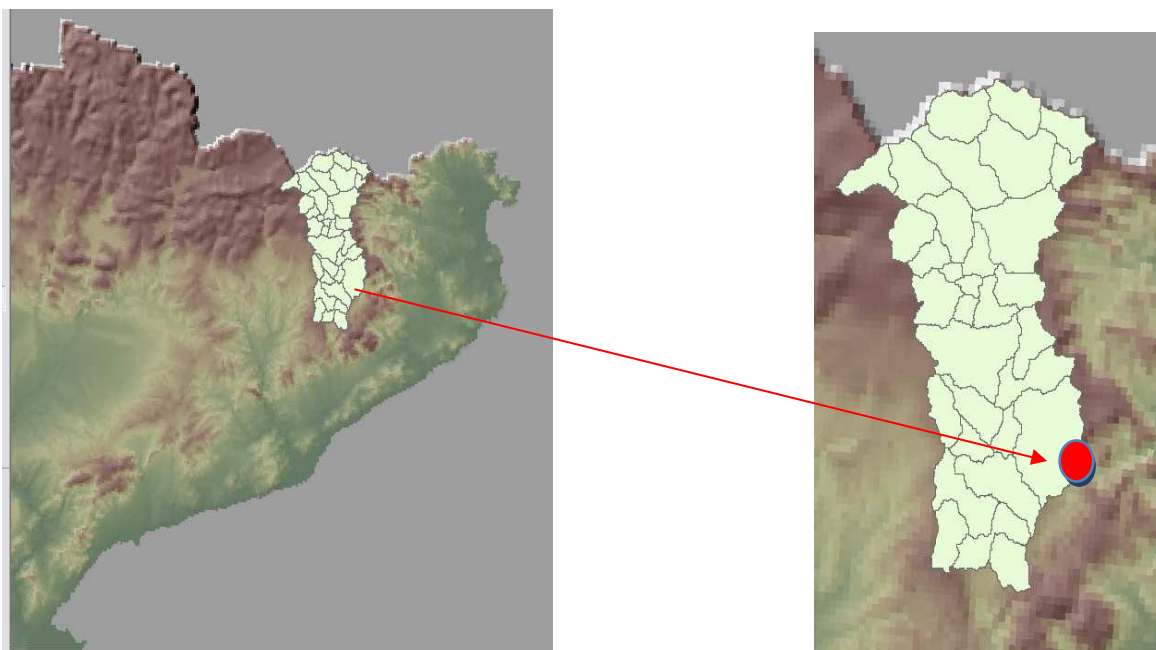


Figura 1. Ámbito de estudio

3. CARÁCTERÍSTICAS DE LA CUENCA

El río Ter nace en Ulldeter en la comarca pirenaica del Ripollès y desemboca en el Mar Mediterráneo, aguas abajo de Torroella de Montgrí .

La zona a estudio es la cuenca del río Ter ubicada en la provincia de Gerona. Las coordenadas del punto de cierre de la cuenca a estudio son X: 451502 Y: 4646663, huso 31, la superficie de la cuenca es de 1528 km² y la longitud del cauce asciende a 208 km. Por último destacar que el río Ter pertenece a las Cuencas Internas Catalanas.

4. CALCULO DE LAS APORTACIONES AL EMBALSE MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROMETEOROLÓGICO

Este estudio toma como datos de partida los resultados de otro precedente realizado en la misma cuenca por la Agencia Catalana del Agua (ACA). En dicho estudio se utilizó el modelo A Generalized Streamflow Simulation System, desarrollado conjuntamente por el National Weather Service de Estados Unidos y el Department of Water Resources del estado californiano de Sacramento. En nuestro país ha venido a conocerse con el nombre de Sacramento, y la versión utilizada para el Estudio de Recursos del ACA se completó con una rutina que tiene en cuenta el efecto invernal de retención nival, que el modelo original no contemplaba. Este modelo trabaja a escala diaria y depende de 28 parámetros.

En el estudio realizado el objetivo de la primera fase es reproducir la serie de aportaciones obtenida con el modelo SACRAMENTO a través de un modelo más simple, como es el modelo de Témez.

Para ello se introducen los datos de precipitación y ETP en el modelo de Témez utilizando la aplicación CHAC, del CEDEX, y se calibra hasta obtener una serie de caudales que se ajuste lo máximo posible a la del SACRAMENTO.

4.1. DETERMINACIÓN DE APORTACIONES CON EL MODELO SACRAMENTO

Para montar el modelo Témez se parte de los datos de precipitación, ETP y aportaciones medios mensuales en la cuenca de Ter en el embalse de Sau. Estas series se han calculado mediante un estudio climático y de aportaciones realizado en las 32 subcuencas en las que se dividió la cuenca del Ter en Sau en el estudio realizado por el ACA y cuyos valores se acumularon o agregaron consiguiendo así una serie única para cada variable en la cuenca completa.

El modelo Sacramento intenta determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca determinando los diversos porcentajes que se dedican a retención nival, evaporación, flujo superficial o flujo subterráneo, porcentajes variables en función de los diversos parámetros hidrológicos de la cuenca en cada momento.

Para utilizar el modelo Sacramento en casos prácticos con garantía, es necesario obtener por calibración el valor que los 15 parámetros de la formulación toman en el caso particular. Para ello, se parte de las series diarias de precipitación/evapotranspiración que produjeron un hidrograma registrado en una estación de aforos. Se necesitan unas series que abarquen la mayor parte posible de sucesos hidrológicos diferentes (sequía prolongada, lluvia importante tras período seco, tren de lluvias importantes, etc.).

Como se ha indicado anteriormente se comprueba que la series obtenida del modelo de Témez, que depende de seis parámetros, a escala mensual y calculada como cuenca única, se ajusta a la serie de aportaciones del modelo Sacramento que depende de 28 parámetros, a escala diaria y agregada a partir de los resultados de 32 subcuencas.

4.2. DATOS DE PARTIDA

El cuadro siguiente muestra los datos a partir de los cuales se realizó la primera fase del estudio. Todos fueron facilitados por la Agencia Catalana:

	Series temporales mensuales	Unidades	Media	Observaciones
Precipitación	1940/41-2007/08	mm	939,7 mm	
ETP	1940/41-2007/08	mm	696,2 mm	
Temperaturas	1940/41-2007/08	°C	11,4°C	
Datos calibración	Aportaciones → 1940/41-2007/08 Entradas al embalse → 1980/81-2007/08	hm ³ hm ³		Aportaciones → Sacramento Entradas → ACA

Tabla 1. Datos de partida

4.3. MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ

El modelo hidrológico empleado es el de Témez. Éste es un modelo matemático, determinístico y agregado a escala mensual.

La aportación total de la cuenca será la suma de la escorrentía superficial (A_{sup}) y la escorrentía subterránea (A_{sub}):

$$AT = A_{sup} + A_{sub}$$

En donde la A_{sup} = excedente – infiltración y A_{sub} = f(infiltración).

Para poder calcular estas aportaciones previamente se han de estimar los cuatro parámetros del modelo:

- $H_{m\acute{a}x}$ = capacidad máxima de almacenamiento en el suelo (mm)
- C = coeficiente de excedente
- $I_{m\acute{a}x}$ = parámetro de infiltración máxima (mm/h)
- a = coeficiente de la rama de descarga del acuífero

La capacidad de cálculo informático ha permitido introducir dos variantes al modelo:

El modelo permite considerar más de una rama de descarga del acuífero, de manera que por cada rama aumenta a la par el número de variantes. Teniendo en cuenta que para el presente estudio se emplearon dos ramas, el número de variantes aumento en dos, lo cual redundo en un mejor ajuste del modelo pero conlleva un aumento del número de parámetros, pasando de cuatro a seis.

En este estudio se considera una cuenca única en vez de estudiar cada una de las subcuencas en las que se divide la zona de estudio.

4.4. MONTAJE DEL MODELO Y METODOLOGÍA

Para emplear el modelo de Témez usando la aplicación CHAC es necesario transformar los formatos de las series de partida al formato LEMA, propio del CHAC.

Para ello los datos originales del SACRAMENTO facilitados en ACCESS se pasaron a una hoja de cálculo Excel para transformarlos, ya que el CHAC cuenta con un módulo de intercambio con este programa. Y de ahí importarlos a CHAC.

Además fue necesario obtener los valores anuales de cada una de las variables. Por último a la variable aportación se le aplicó un cambio de unidades, de hm^3/mes a m^3/s (valor medio mensual).

Una vez introducidos los datos en el CHAC, tanto las series como los datos de características de la cuenca se procede a calibrar, validar y simular con el modelo Témez.

La serie obtenida se exporta a Excel y se vuelve a cambiar las unidades de m^3/s a hm^3/mes .

La nomenclatura utilizada para los datos obtenidos del estudio realizado con el modelo Sacramento fue SCIC. La nomenclatura utilizada para los datos obtenidos con el modelo de Témex fue CHAC.

Finalmente se compararon los resultados obtenidos del modelo del estudio anterior (SCIC), con los datos de aportaciones de entrada al embalse de Sau a partir del año hidrológico 1980/81 y con la simulación de aportaciones obtenidas de CHAC.

4.5. CALIBRACIÓN

4.5.1. Descripción del proceso

La serie SCIC es la que introduce en el modelo como base de calibración.

Inicialmente se calibró utilizando el módulo propio del CHAC, a partir de los valores medios mensuales de toda la serie con el objetivo de minimizar al máximo los errores. Con esto se consiguió un juego de parámetros como primera aproximación.

Posteriormente se calibró comparando la distribución de la serie completa, año a año. Esto se realiza de forma gráfica dibujando todas las series simultáneamente.

Tras la calibración inicial se comprobó que el caudal base de la serie generada de aportaciones SCIC era menor que la serie CHAC siendo en los primeros años (1940/41-1947/48) mucho más elevado que el resto, pareciendo un problema de la condición inicial

Es por ello que se optó por reducir la condición inicial para que el caudal base disminuyera en el primer periodo, esto produjo que en los primeros años (1940/41-1947/48) las series SCIC y CHAC correlacionaran algo mejor.

Sin embargo los resultados no eran aceptables. Se optó por variar en sucesivas pasadas:

- la infiltración máxima
- los valores de las ramas de descarga
- disminuir el parámetro de excedencia
- el coeficiente de reparto de descarga.

Como el caudal base seguía muy elevado se disminuyó aún más la condición inicial.

Aun así se detectó una desviación tanto en los caudales punta como en los base.

Posteriormente para ajustar las puntas y caudal base se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de los siguientes parámetros: infiltración, el parámetro de excedencia y humedad máxima. Estos cambios fueron:

- Al disminuir la infiltración se acentúan las puntas y disminuye el caudal base.
- Al bajar el parámetro de excedencia disminuyen las puntas.
- Al bajar la humedad máxima se produce un aumento de las puntas.

Con el análisis anteriormente descrito se concluyó que los mejores resultados se obtendrían con una disminución del 50 % de la infiltración, observándose en este caso que en los años iniciales encajaban correctamente con los valores observados de la serie SCIC pero en los años finales se elevaban ligeramente respecto de SCIC.

Los últimos retoques consistieron en unas pequeñas variaciones en infiltración y humedad máxima hasta alcanzar los valores que más se ajustaban a los obtenidos por Sacramento.

Para finalizar se comprobó que ambas series, tanto SCIC como CHAC, eran comparables a las entradas al embalse

En todas las pasadas de calibración se fueron comprobando que los errores medios (para cuadrar caudales medios), el error cuadrático relativo (índice del ajuste en caudales bajos) y el error cuadrático estándar (índice de ajustes en caudales altos) fueran aceptables.

4.5.2. Resultados obtenidos

De las múltiples calibraciones realizadas, solo 33 fueron de utilidad para el presente trabajo. De todas ellas se seleccionó como óptima la número 29, siendo los valores obtenidos:

- Coeficiente de ETP = 1
- Parámetro c de excedencia = 0,3

- Humedad máxima = 110
- Infiltración máxima = 30
- Rama de descarga = 0,01
- Caudal inicial = 3
- Coeficiente de reparto de recarga = 0,01
- Rama de descarga 2 = 0,0016
- Caudal inicial = 3
- Humedad inicial = 3

4.5.3. Conclusiones

El caudal base es muy similar entre la serie SCIC y la CHAC, siendo los valores máximos en general superiores para el primer caso.

La variación del volumen de CHAC respecto de SCIC es aproximadamente del 4%, por lo que los datos obtenidos se consideran adecuados, ya que una variación mayor implicaría que no correlacionan de una manera fiable.

Los valores del coeficiente de sesgo, desviación típica y la media son muy similares, mientras que existen ligeras diferencias entre los máximos y los mínimos.

Se observa que existen décadas en las que el modelo ajusta muy bien al original, como por ejemplo la década de los sesenta, sin embargo, la década de los setenta son más difíciles de ajustar, por su gran variabilidad.

Se puede apreciar que no se han ajustado bien las puntas lo que se traduce en una sobre elevación de los meses de abril y mayo, que junto con el otoño son los dos periodos más lluviosos de la cuenca.

La conclusión es que a pesar de que el modelo Témez es más rígido que el Sacramento, ya que no es posible ajustar con la misma precisión debido a la diferencia de parámetros existentes, se ha conseguido reproducir la serie de 68 años de forma sensiblemente semejante a la calculada con el modelo Sacramento. Si la referencia de Sacramento no hubiera existido, ajustar el modelo con CHAC hubiera sido muy difícil y con mucha variabilidad en los resultados.

4.6. VALIDACIÓN

Lo que interesa en este proyecto es reproducir lo más fidedignamente con el modelo Témez la serie de 68 años calculada con el SACRAMENTO. Por este motivo se utiliza la serie completa para calibrar y no se procede a validar.

4.7. SIMULACIÓN/RESULTADOS

En la siguiente tabla se pueden observar un resumen de los valores medios anuales obtenidos por CHAC.

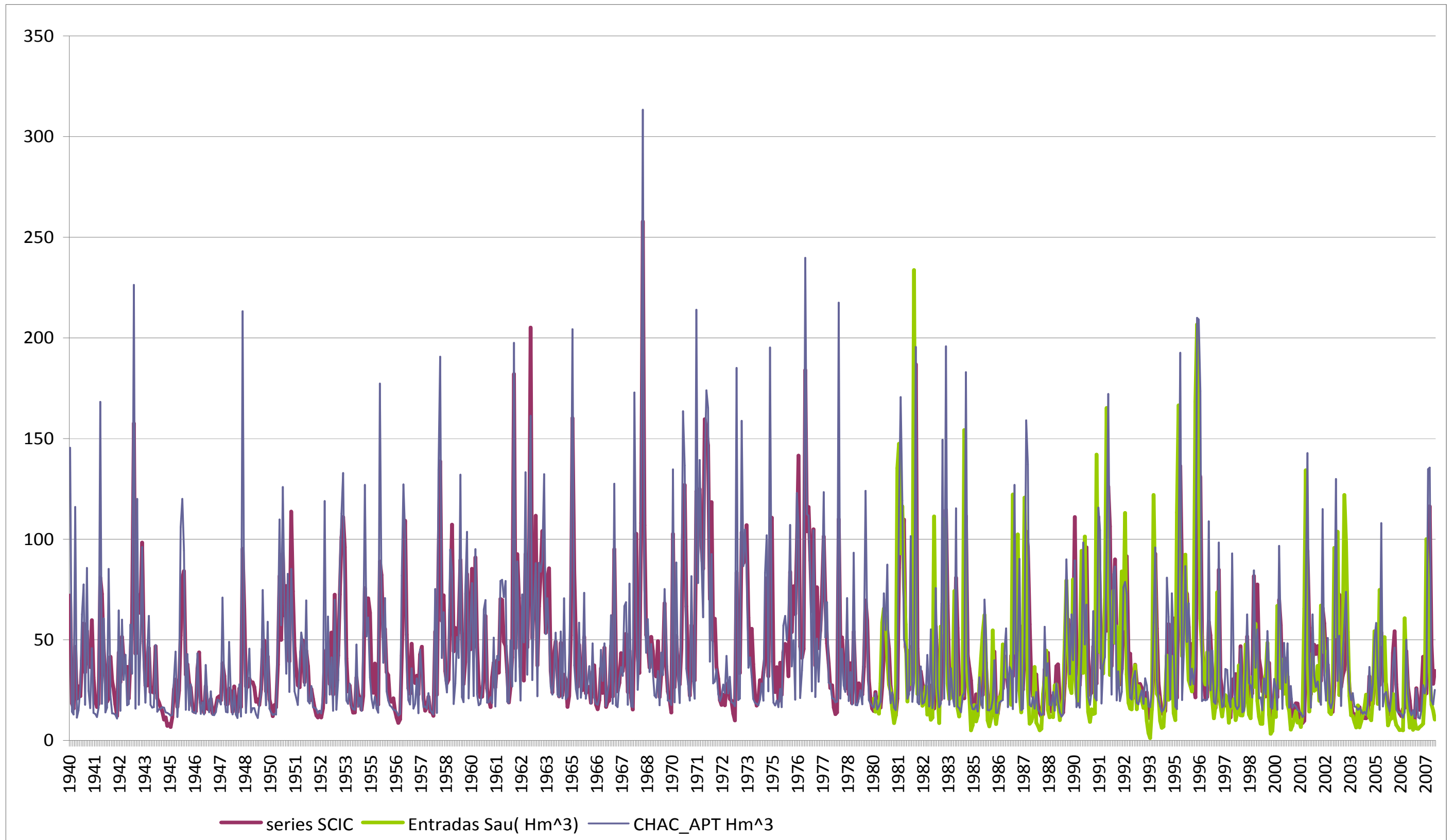
Nombre de la cuenca	Superficie acumulada (km ²)	Serie pluviométricas (mm)	Aportación media anual generada (hm ³)	Coeficiente de escorrentía	ETP	Temperatura (°C)
Ter en Sau	1527,9	925,88	528,40	0,36	685,96	11,26

Tabla 2. Valores medios anuales obtenidos con CHAC

A continuación se presenta una relación de los principales estadísticos (en valores medios anuales) que comparan la serie SCIC con la serie CHAC. Observándose que la desviación típica y el mínimo son bastante similares.

ESTADÍSTICAS dato anual	SCIC	CHAC
PROMEDIO	506,56	528,40
SESGO	1,31	1,05
DESV. TIP	0,41	0,39
CURTOSIS	2,34	1,26
Mediana	468,04	483,89
Mínimo	194,51	209,23
Máximo	1277,53	1239,54
Suma	34446,15	35930,87

Tabla 3. Comparación de los estadísticos anuales entre SCIC Y CHAC



5. CÁLCULO DE LAS APORTACIONES CON LAS SERIES DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS

5.1. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

5.1.1. Escenarios del IPCC

Para conocer la variación futura del clima los expertos en modelos climáticos parten de varias hipótesis de evolución de los niveles de los Gases de efecto invernadero (GEIs) y aerosoles vertidos a la atmósfera por las distintas actividades humanas.

Esas hipótesis de evolución de las emisiones se recogen en el “Informe Especial sobre los escenarios de emisiones del IPCC” (Nakicenovic et al., IPCC 2000) y fueron elaboradas por el “Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC)” teniendo en cuenta varias variables como: evoluciones futuras de crecimiento de la población mundial, la demanda de energía, la eficiencia de su consumo o el crecimiento económico global.

Los escenarios de emisiones a partir de los cuales se han obtenido las proyecciones de clima futuro se denominan escenarios SRES (Special Report on Emission Scenarios). Dentro de este informe se contemplan varias hipótesis de las cuales cuatro reflejan cuatro tipo de políticas socioeconómicas extremas.

Conviene señalar que ninguno de los escenarios se corresponde exactamente con los objetivos de emisión marcados en el Protocolo de Kyoto. Los años horizonte varían.

La siguiente figura, obtenida del documento “Plan Nacional de adaptación al Cambio Climático. Marco para la coordinación entre Administraciones Públicas para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático”, editado por la Oficina Española de Cambio Climático para la prevención de la contaminación y del Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, se resumen las bases de cada uno de los escenarios.

SRES: Informe especial sobre los escenarios de emisiones del IPCC (Nakicenovic et al., IPCC 2000)

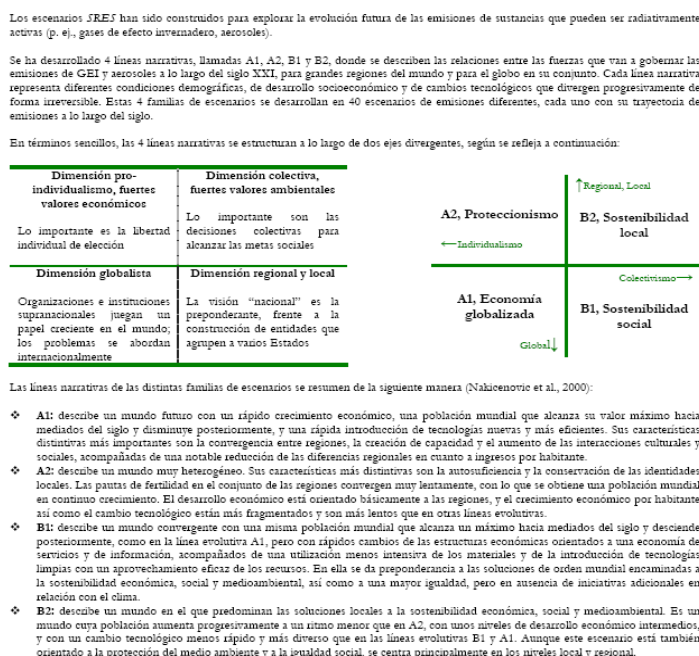


Figura 2. Escenarios SRES. (Fuente: MMA, Oficina de Cambio Climático)

5.1.2. Generación de proyecciones climáticas

La generación de proyecciones climáticas es un elemento crucial en este proceso y debe ser consistente con el marco general proporcionado por el informe especial sobre escenarios de

emisiones elaborado por el IPCC (Special Report on Emission Scenarios (SRES), Nakicenovic et al., 2000). Cronológicamente, lo primero que desarrollaron los expertos del IPCC a raíz del informe del año 2000 fue una cuantificación de las emisiones futuras de GEIs y compuestos de azufre (Tercer Informe del IPCC, 2001. IPCC-TAR, 2001) para cada uno de los escenarios incluidos en el Informe SRES.

La herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM, de las siglas en inglés) que se desarrollan en unos pocos centros internacionales de investigación climática. El tercer informe del IPCC habla de 16 modelos globales AOGCM con los que se han realizado simulaciones detalladas teniendo en cuenta varios escenarios en un largo periodo de tiempo: de 1960 a 2100. Hasta el año 2000 se han considerado las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero observadas, junto con las calculadas de azufre. A partir del año 2000 se consideran las hipótesis de los distintos escenarios. Los resultados obtenidos de estos 16 modelos climáticos son facilitados por el Centro de Distribución de Datos (DDC) del IPCC.

La mayor parte de estos datos corresponden a valores mensuales de las variables más utilizadas en estudios de impacto del cambio climático en superficie (temperatura, precipitación, presión, etc.), correspondientes a cada una de las celdas de la malla del modelo que cubre toda la atmósfera terrestre.

Modelos globales son:

- CGCM2 (Centro Canadiense del Clima, versión2)
- ECHAM4 (Instituto Max Planck de Meteorología, Alemania)
- HadAM3H (Centro Hadley (RU), modelo atmosférico versión 3)
- HadCM3 (Centro Hadley (RU), modelo acoplado atmósfera-océano versión 3)
- HadCM2SUL (Centro Hadley (RU), modelo acoplado atmósfera-océano versión 2)

Estos modelos globales proporcionan las características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas con escasa resolución espacial (celdas entre 100 y 300 km de lado). Es por ello que se necesita aplicar técnicas de regionalización (downscaling) a las proyecciones generadas por los AOGCMs como paso intermedio antes de ser utilizados por los modelos de impacto.

5.2. SERIES CLIMÁTICAS INTRODUCIDAS EN EL MODELO.

5.2.1. Topología

Para poder calcular aportaciones a partir de los datos de precipitación y temperatura de las proyecciones transformadas se ha montado un esquema topológico por modelo y escenario, para que se pueda generar y gestionar todas las series desde la misma base de datos.

En el estudio antecedente realizado por el ACA se analizaron los resultados de precipitación y temperatura en las cuencas del Francolí en Montblanc y Muga en el embalse de Boadella. Este análisis mostró la gran dispersión de resultados existente dentro del conjunto de modelos climáticos que formaron el Proyecto PRUDENCE. Por este motivo se consultó a los 2 expertos españoles que habían estado trabajando en él. En el informe incluido en este estudio se expone la metodología para poder trabajar con las series climáticas utilizando una base comparable. Adicionalmente indicaron cuales, bajo su experiencia, eran los modelos que mejor se ajustaban en la zona de estudio. Estos son: el modelo italiano (ICTP), el modelo sueco (SMHI) y modelo español (UCM).

- La cuenca del Ter hasta el embalse de Sau se modeliza con 1 subcuenca, creándose 6 modelos distintos:

CODIGO_NIVEL1	NOMBRE_DEL_RIO
20A21	TER (A2-ICTP)
20A22	TER (A2-SMHI)
20A23	TER (A2-UCM)
20B21	TER (B2-ICTP)
20B22	TER (B2-SMHI)
20B23	TER (B2-UCM)

5.2.2. Generación de series climáticas futuras

En cuanto a las series climáticas el proceso seguido para la generación de las series de precipitación y temperatura que alimenten al modelo Sacramento y que sean comparables con las series calculadas anteriormente ha sido el siguiente:

- Elección del método de la *transformada directa con escalado, aplicando un filtro gaussiano de 3 meses*.

El filtro gaussiano es una técnica de suavizado en la que a la muestra se le aplica unos coeficientes de ponderación obtenidos a partir de una distribución de Gauss y cuya suma debe ser igual a 1.

- Como las distribuciones de las series de control entre los modelos climáticos y la calculada anteriormente son significativamente distintas la comparación debe estar entre cada modelo y su futuro, tomando como base común las series CHAC. Es decir, que se transforman las series futuras de cada modelo a partir de unos coeficientes de transformación obtenidos a escala mensual y que dependen de la serie de control del modelo, los escenarios futuros de cada modelo y la serie calculada. Las ventajas de este método es que se elimina la incertidumbre que introduce el cambio de modelo empleado sobre la base de que la serie de control es común para todos los futuros y la segunda ventaja es que se pueden generar 68 años futuros.

La transformada se obtiene mediante el cálculo de coeficientes mensuales:

- Para lluvia: los coeficientes de paso mensuales se aplican a los 68 años de las series de precipitación en la unidad que forma la cuenca del Ter en el embalse de Sau. Estos coeficientes se obtienen a partir de cálculo de la serie de control de los modelos climáticos contra los escenarios y de las medias mensuales de precipitación de la serie CHAC. Se calcula un coeficiente para cada serie de control y para cada escenario de cada modelo.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Ab.	Ma.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.
20A21	2.53	2.50	2.36	2.82	4.19	5.21	4.91	5.57	5.07	3.51	3.14.	3.00
20A22	3.01	2.77	2.36	2.59	3.68	4.63	5.82	6.67	4.95	3.78	3.33	3.32
20A23	2.88	2.95	2.80	3.25	4.22	4.91	5.92	5.94	4.70	4.16	3.81	3.49
20B21	1.63	0.93	0.87	1.37	3.01	3.98	3.90	4.14	3.19	1.87	2.23.	4.19
20B22	1.88	1.37	0.96	1.42	2.44	3.75	4.84	5.26	3.39	2.22	2.34	2.06
20B23	2.07	1.81	1.31	2.08	3.66	4.45	5.04	5.04	4.00	3.21	3.07	2.61

Tabla 7. Coeficientes de transformación de las series de precipitación

- Para temperatura: el proceso es el mismo, pero la corrección no se realiza mediante un coeficiente sino en grados centígrados de aumento medio mensuales.

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Ab	Ma	Jun	Jul	Ago	Sept
20A21	0.787	0.867	0.963	0.836	0.609	0.496	0.546	0.861	1.065	1.108	1.010	0.883
20A22	0.980	0.859	0.859	0.818	0.700	0.601	0.481	0.722	1.008	1.114	1.113	1.078
20A23	0.739	0.658	0.807	0.761	0.634	0.544	0.539	0.760	0.939	1.039	1.157	1.148
20B21	1.006	0.990	0.976	0.917	0.753	0.639	0.629	0.855	1.017	1.055	1.016	1.008
20B22	1.078	0.997	1.014	0.958	0.751	0.569	0.476	0.619	0.897	1.051	1.106	1.102
20B23	0.975	0.755	0.765	0.707	0.572	0.527	0.639	0.829	0.983	1.034	1.120	1.222

Tabla 8. Incrementos de °C para la transformación de las series de temperatura

Finalmente se obtienen las series diarias de la siguiente forma:

- A las series de precipitación se les multiplica por el coeficiente mensual que le corresponda.
- A las series de temperatura se les suma el incremento de grados por mes correspondiente
- Se calcula la ETP mediante la fórmula de Thornthwaite y se desagrega uniformemente a escala mensual.

Seguidamente, por variable, se obtuvieron la original (CHAC) más las seis alteradas correspondientes a los “experimentos futuros”. Todas comprenden un periodo de 68 años definido entre 1940/41-2007/08. La base temporal debería ser la misma, aunque las series alteradas sean una proyección de futuro medio del último trienio (2071-2100). El calendario debería ser común, tanto para las proyecciones futuras como las actuales, por lo que la serie temporal utilizada fue 1940/41-2007/08.

5.3. CALCULO DE APORTACIONES

5.3.1. Descripción del proceso

Para poder obtener las aportaciones futuras al embalse de Sau se elaboraron seis hojas Excel, una para cada modelo para transformar el formato de partida (ACCESS) a formato LEMA para importar al programa CHAC.

Las series de partida que fueron introducidas en el modelo de Témez son:

- Precipitación y ETP del escenario A2 del modelo ICTP
- Precipitación y ETP del escenario B2 del modelo ICTP
- Precipitación y ETP del escenario A2 del modelo SMHI
- Precipitación y ETP del escenario B2 del modelo SMHI
- Precipitación y ETP del escenario A2 del modelo UCM
- Precipitación y ETP del escenario B2 del modelo UCM

Todas estas series están completas para el periodo (1940/41-2007/08). Estos seis modelos fueron simulados introduciendo los parámetros de la calibración 29 para así poder realizar las proyecciones en base a la variación ocurrida en el pasado. Es decir, es el mismo modelo alimentado con datos climáticos distintos

Tras obtener las aportaciones futuras para cada uno de los escenarios y modelos, se introdujeron en una única hoja Excel para poder analizarlos conjuntamente con la serie CHAC.

5.3.2. Generación de aportaciones futuras

Se han introducido en CHAC tantos modelos por cuenca piloto como hipótesis, es decir, modelo por hipótesis de futuro con datos transformados (uno por modelo climático y escenario, en total, suman seis hipótesis)

En total son siete modelos por cuenca. Esto se ha hecho así para poder conservar todos los cálculos aplicando el mismo esquema a cada serie de datos sin necesidad de ir eliminando con cada pasada los resultados de la hipótesis anterior.

Los resultados son las series de caudales y aportaciones mensuales de cada una de estas seis hipótesis en la cuenca piloto más la obtenida en la fase inicial.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en la cuenca del Ter en Sau se ha realizado aplicando la metodología escrita en el punto anterior. En este apartado se incluyen los resultados más significativos de todos los cálculos realizados.

6.1. RECURSOS HÍDRICOS

Para evaluar el cambio que podría producirse en los recursos hídricos se han estudiado los valores medios mensuales comparándose las series de precipitación, temperatura, ETP y aportaciones denominadas CHAC obtenidas del estudio realizado en la fase inicial.

6.1.1. Pluviometría

Las siguientes tablas muestran los valores medios de la serie CHAC y de los futuros en los dos escenarios contemplados del informe SRES y de los tres modelos climáticos elegidos:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	86,6	61,6	60,0	43,7	40,0	56,4	74,0	109,1	107,5	80,2	108,6	98,1	925,9
Modelo SMHI.esc A2	95,2	67,8	64,1	42,0	33,6	48,0	60,1	75,3	64,0	37,9	77,4	98,0	763,3
Modelo ICTP.esc A2	94,7	61,5	52,5	33,7	34,0	53,8	61,4	65,5	52,8	43,0	92,3	103,6	748,7
Modelo UCM .esc A2	88,8	70,5	68,2	31,7	25,8	45,1	55,9	68,2	57,9	42,4	81,5	91,3	727,2
Modelo SMHI.esc B2	89,8	67,4	65,5	46,2	39,1	56,7	70,4	80,7	60,6	37,5	66,3	87,2	767,4
Modelo ICTP.esc B2	90,2	61,9	59,9	43,1	38,8	54,5	67,3	81,0	68,0	49,5	91,6	98,9	804,8
Modelo UCM .esc B2	88,4	68,2	72,6	41,8	29,6	42,8	51,9	61,5	56,1	50,3	88,9	95,6	747,6

Tabla 9. Valores medios mensuales de pluviometría (mm) mensuales y anuales

6.1.2. Temperatura

La siguiente tabla muestra los valores medios de temperatura mensual de la serie CHAC y las futuras.

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	12,3	6,8	3,7	2,9	4,6	7,5	9,4	13,2	17,2	20,2	20,1	16,9	11,3
Modelo SHMI. Esc A2	16,1	10,2	7,0	5,9	7,3	9,8	12,0	16,9	21,8	26,0	26,7	21,8	15,2
Modelo ICTP. Esc A2	15,8	10,0	4,0	5,4	7,1	9,8	12,2	17,4	22,4	25,1	25,6	21,9	14,8
Modelo UCM. Esc A2	16,4	10,7	7,1	5,8	7,5	10,3	12,7	17,4	22,1	26,1	26,0	21,6	15,3
Modelo SHMI. Esc B2	14,5	9,2	5,7	4,8	5,9	8,4	10,8	15,6	21,0	25,0	25,3	20,2	13,9
Modelo ICTP. Esc B2	14,2	9,1	4,1	4,5	5,5	8,3	10,8	16,2	21,2	24,0	24,2	20,0	13,6
Modelo UCM. Esc B2	15,5	9,9	6,3	5,0	6,4	8,8	11,5	16,8	21,7	25,2	25,1	20,9	14,5

Tabla 10. Valores medios mensuales de temperatura (°C) mensuales y anuales

6.1.3. Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial ha sido calculada en todas las hipótesis mediante la fórmula de Thornwaite, la hipótesis real con los datos calculados a partir de series CHAC y los futuros a partir de las series transformadas de los modelos climáticos. La siguiente tabla muestra los valores medios mensuales:

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	50,2	22,0	11,0	9,6	13,8	30,0	42,7	74,5	104,5	128,0	117,5	82,2	686,0
Modelo SHMI. Esc A2	57,8	24,1	12,9	10,4	14,8	28,8	42,9	82,8	125,9	167,1	162,6	102,9	833,0
Modelo ICTP. Esc A2	57,2	24,2	5,8	9,6	14,6	29,8	45,4	88,1	132,0	158,2	152,3	104,4	821,6
Modelo UCM. Esc A2	59,5	25,6	13,1	9,8	15,1	30,4	46,2	86,5	128,1	168,1	155,5	100,7	838,7
Modelo SHMI. Esc B2	53,0	23,4	11,4	9,2	12,8	26,1	40,8	78,4	121,6	158,5	150,2	94,6	780,1
Modelo ICTP. Esc B2	52,2	23,9	7,5	9,1	12,1	26,6	41,8	84,0	124,5	150,4	141,0	94,2	767,2
Modelo UCM. Esc B2	56,8	24,9	12,1	9,0	13,2	26,1	42,6	85,5	126,2	159,9	147,8	97,6	801,7

Tabla 11. Valores medios mensuales de ETP (mm) mensuales y anuales

6.1.4. Aportaciones

Por último, se adjuntan los resultados del modelo hidrometeorológico en los que la cuenca simuladas es idéntica en todos los modelos, variando únicamente los valores de los datos de partida, es decir las series de precipitación y temperatura.

HIPOTESIS	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
CHAC	41,4	36,1	43,8	39,0	31,7	46,5	51,8	74,1	56,6	30,7	40,0	36,8	528,4
Modelo SMHI.esc A2	40,8	35,3	42,3	33,2	23,0	34,1	34,7	35,7	19,9	13,3	18,6	29,9	360,9
Modelo ICTP.esc A2	40,2	30,5	32,6	25,8	22,6	38,5	35,0	27,6	15,2	13,0	23,8	32,6	337,3
Modelo UCM .esc A2	34,6	35,3	44,2	23,2	16,5	28,6	28,2	27,1	15,6	12,1	18,7	25,3	309,4
Modelo SMHI.esc B2	38,1	35,8	44,8	38,7	29,0	45,9	48,0	44,7	20,9	14,3	16,9	25,7	402,9
Modelo ICTP.esc B2	39,8	32,8	41,0	36,6	29,5	44,3	45,1	43,6	23,6	16,1	26,1	32,7	411,3
Modelo UCM .esc B2	35,7	34,9	49,9	33,6	20,7	30,5	28,7	25,6	16,1	13,8	22,6	28,7	340,8

Tabla 12. Valores medios mensuales de aportación (hm³) mensuales y anuales

6.1.5. Conclusiones

Puesto que las aportaciones dependen de otros factores como son ETP, Temperatura, y Pluviometría, su variabilidad es mucho mayor que los parámetros que solo dependen de un solo factor, por lo que la proyección a futuro es mucho más difícil de determinar de una manera fiable

6.1.5.1. Resumen de conclusiones

Para realizar una evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos hay varios puntos clave dentro del análisis. Estos son:

- El modelo hidrológico empleado para el cálculo de los recursos hídricos y sus limitaciones
- En caso de no realizar un estudio global, la cuenca elegida como representativa para realizar el análisis.
- Los datos climáticos de entrada al modelo hidrológico, ya que de la bondad de éstos depende el resultado.

El modelo hidrológico empleado es el modelo de Témez. Este modelo calcula a escala mensual. Este es un modelo continuo con el que se obtienen valores medios mensuales no siendo posible modelizar caudales máximos instantáneos ya que para esto es necesario un modelo que trabaje en una escala temporal menor.

La elección del embalse de Sau en el río Ter se ha efectuado basándose en la carencia de estudios similares sobre cambio climático en dicha cuenca. Se calibró el estudio de Recursos Hídricos, periodo 1940/41-2007/08, con el modelo Sacramento.

Para realizar la comparación entre la serie CHAC (1940/41-2007/08) y las proyecciones futuras (2071-2100) el modelo utilizado es el mismo y la caracterización paramétrica de la cuenca es la misma. De este modo se establece la misma base comparativa para que las limitaciones del modelo afecten de forma homogénea a los resultados.

Por último, comentar, que si bien los datos meteorológicos empleados en la evaluación del impacto en los recursos hídricos no son los apropiados para la escala del trabajo, la indiscutible ventaja es que en la medida que ha sido posible se ha realizado un análisis que incorpora los resultados de la aplicación de las conclusiones del grupo de expertos del IPCC publicadas en su tercer informe aunque esta aplicación se halle limitada a los escenarios A2 y B2 en el periodo 2071-2100.

De todos los modelos con dato disponible de precipitación y temperatura se eligieron aquellos que mejor encajaban a nivel local con las series de precipitación y temperatura generadas en el estudio de Recursos pero también que respondieran bien a nivel regional dentro del proyecto PRUDENCE.

De los tres modelos climáticos de los que se han utilizado los datos de precipitación y temperatura para generar las series de aportaciones, los modelos PROMES de la UCM (Universidad Complutense de Madrid), el RegCM del ICTP (Centro Internacional de Física Teórica de Italia) y el RCAO del SMHI (Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia), ninguno destaca respecto de los otros de forma global como para concluir analizando los resultados del mismo, por lo que las conclusiones se han realizado empleando medias o rangos calculadas con los datos y resultados de todas las hipótesis, que por otro lado es lo lógico cuando el escenario horizonte se sitúa a partir del año 2070.

Se ha estudiado el impacto en los recursos hídricos desde varias perspectivas, por un lado comparando valores medios y por otro su distribución temporal, evolución de las sequías y el posible aumento de los valores máximos.

El cambio en la **precipitación** se produce de forma estacional, aumentando en algunos meses (entre septiembre y diciembre) en todas las proyecciones futuras y disminuye drásticamente en verano, en torno al 50%, presentando también reducciones muy acusadas en enero y febrero. Los mínimos se presentan en los meses de julio y agosto y febrero. En cuanto a los periodos más lluviosos se sitúan de nuevo en septiembre y octubre. El máximo relativo que en la actualidad se presenta en mayo se adelanta al mes de abril. Esto hace que el periodo seco de enero a marzo se acorte un mes mientras que el de verano aumenta en casi 2.

En cuanto a la **temperatura** los resultados de todos los modelos son mucho más uniformes. En el escenario más pesimista (A2) el aumento previsto es de 3,8° C mientras que en el más favorable (B2) este aumento es de 2,7° C en valores medios anuales. Estas conclusiones se obtienen del análisis de promedios de las series de proyecciones transformadas de precipitación y temperatura al periodo 1940/41-2007/08 comparadas con las series CHAC

La **ETP**, calculada a partir de la temperatura mediante el mismo método en las series CHAC y en las proyecciones futuras, también se incrementa. Dicho aumento puede situarse en torno al 18% en el escenario A2 y el 12% en el B2.

Por último, en cuanto a las **aportaciones** calculadas con el programa CHAC, todos los modelos presentan mayores reducciones en el escenario A2, la diferencia entre escenarios es sensiblemente parecida y de todos los modelos el de la UCM es el que mayor reducción de aportaciones presenta.

7. CLASIFICACIÓN DE LAS SERIES DE APORTACIONES

7.1. CLASIFICACIÓN DE CAUDALES POR PERCENTILES

Se han clasificado los caudales según percentiles de 0 a 1. En la siguiente tabla se muestra como resumen, los valores que marcan los caudales que se sitúan en los percentiles 0.25, 0.50 y 0.75 (probabilidad de no excedencia) de las series anuales en el periodo común de 68 años:

HIPÓTESIS	Aportación media anual (hm ³)		
	Percentil	Percentil	Percentil
	0.25	0.50	0.75
CHAC	386,79	483,89	632,20
Modelo SMHI. Esc A2	228,45	327,19	450,47
Modelo ICTP. Esc A2	220,76	308,37	433,62
Modelo UCM. Esc A2	194,48	273,50	395,09
Modelo SMHI. Esc B2	265,93	370,65	495,21
Modelo ICTP. Esc B2	277,67	377,74	506,35
Modelo UCM. Esc B2	213,09	305,72	414,36

Tabla 13. Valores representativos de las series

El siguiente gráfico muestra esa misma tabla, en la que se observa de forma más simple el descenso del valor del percentil 0.50 de las series futuras respecto de la calculada en el estudio de Recursos, CHAC.

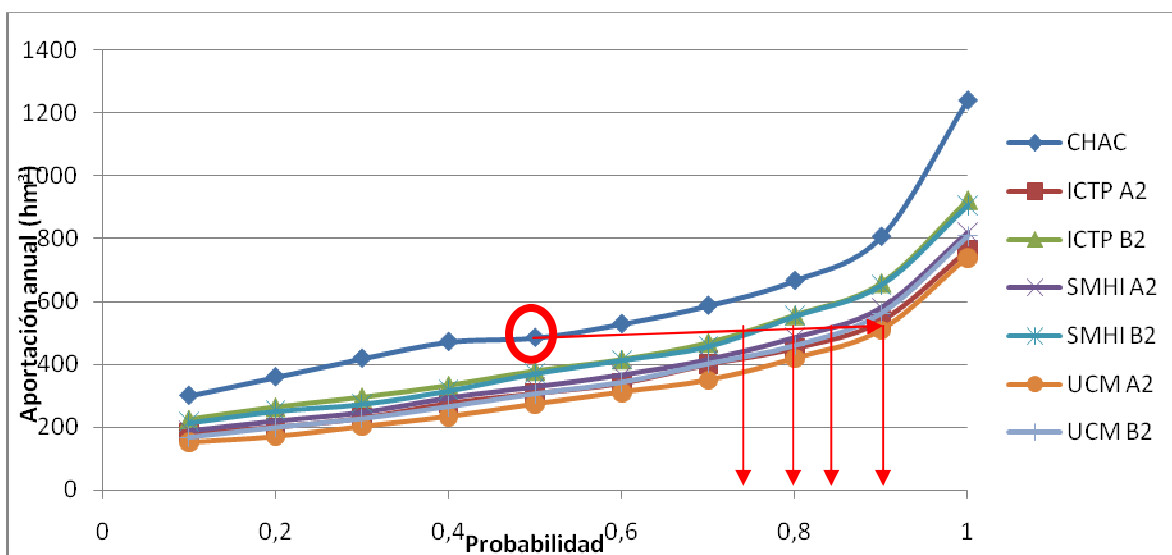


Figura 3. Gráficos de probabilidad de las series de aportación real y futuras. Cuenca del Ter en el embalse de Sau

La conclusión al analizar esta clasificación que el valor del caudal del percentil del 0.5, que se puede asemejar al caudal tipo de un año medio a futuro el mismo valor estaría clasificado entre los percentiles 0.7 y 0.9, es decir pasaría a ser un caudal tipo año húmedo. Esta conclusión tiene una gran repercusión en la vida piscícola y la vegetación de ribera.

7.2. ANÁLISIS DE CAUDALES CON LA APLICACIÓN IAHRIS

Adicionalmente se ha realizado un ajuste utilizando el programa IAHRIS (índices de alteración hidrológica en ríos) a la serie anual de aportaciones medias.

Esta aplicación informática permite obtener:

- Parámetros con los que caracterizar el régimen hidrológico, tanto natural como alterado, en un punto de un río. Estos parámetros valoran aspectos hidrológicos del régimen con marcada trascendencia ambiental (duración de las sequías, estacionalidad de las avenidas...).
- Facilitando datos de los dos regímenes, natural y alterado, la aplicación, además, calcula unos índices que permiten valorar el grado de alteración del régimen hidrológico en aquellos aspectos de mayor significación ambiental.

Los valores de las clasificaciones de las series de aportaciones, se adjuntan en el **Anejo n° 3** a esta memoria.

Para este proyecto se considera régimen natural a toda la cuenca a estudio ya que como se observa en el punto 2, el punto de cierre se encuentra aguas arriba del embalse de Sau.

A continuación se muestran la caracterización de la variabilidad interanual, las aportaciones mensuales, en este caso en régimen natural, para el modelo CHAC y los diferentes escenarios asociados al mismo. Este análisis se llevó a cabo con el programa IAHRIS.

7.3. CONCLUSIONES

Con el programa IHARIS se procedió a evaluar cada uno de los modelos y los escenarios, obteniéndose para cada uno de ellos la caracterización de la variabilidad interanual, es decir, la clasificación de los años en húmedos, medios y secos, así mismo también se obtuvieron los valores medios mensuales para cada uno de los tres tipos de años existentes en la clasificación (húmedo, medio y seco). Se observa también diferentes aspectos de las aportaciones para cada uno de los modelos y escenarios, valorándose la magnitud y variabilidad de los datos obtenidos.

CHAC

Para la serie CHAC se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 637,17 hm³ y seco si la aportación era menor a 384,27 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 130 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 25 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 47 hm³ y el mínimo en noviembre con un valor aproximado de 20 hm³.

En los años secos el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 27 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 10 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

ICTP A2

Para la serie ICTP A2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 435,62 hm³ y seco si la aportación era menor a 214,08 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 100 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de marzo, con un valor aproximado de 20 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 15 y 19 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

SMHI A2

Para la serie SMHI A2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 460,48 hm³ y seco si la aportación era menor a 227,47 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 100 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 30 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 15 y 19 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

UCM A2

Para la serie UCM A2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 400,04 hm³ y seco si la aportación era menor a 190,83 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de diciembre, con un valor aproximado de 95 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 20 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 8 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 10 y 13 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

ICTP B2

Para la serie ICTP B2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 513,32 hm³ y seco si la aportación era menor a 276,78 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 95 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 37 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos el máximo se da en el mes de abril-mayo, con un valor aproximado de 21 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 10 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

SMHI B2

Para la serie SMHI B2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 514,91 hm³ y seco si la aportación era menor a 265,18 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de octubre, con un valor aproximado de 92 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 38 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos el máximo se da en el mes de abril, con un valor aproximado de 22 hm³ y el mínimo en febrero con un valor aproximado de 10 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

UCM B2

Para la serie UCM B2 se obtuvo la siguiente clasificación: año húmedo a partir de 415,92 hm³ y seco si la aportación era menor a 212,46 hm³.

En los años húmedos el máximo se da en el mes de diciembre, con un valor aproximado de 115 hm³ y el mínimo en julio con un valor aproximado de 18 hm³.

En los años medios el máximo se da en el mes de mayo, con un valor aproximado de 20 hm³ y el mínimo en febrero-julio con un valor aproximado de 15 hm³.

En los años secos se observa una progresión bastante lineal oscilando el valor de las aportaciones entre 10 y 15 hm³.

Finalmente, la magnitud y la variabilidad son mayores en los años húmedos.

7.3.1. Resumen

Finalmente para poder cuantificar de alguna manera el comportamiento de las series de recursos se **clasificaron** aplicando el programa IAHRIS, las series de aportaciones medias anuales en años medios, secos y húmedos.

El modelo del SMHI y el del ICTP presentan series semejantes en los meses invernales, mientras que el de la UCM baja la frecuencia mucho más, es decir, la serie se vuelve mucho más “seca” en todo el periodo.

La variación temporal de caudales en la zona a estudio, puede provocar que las diferentes especies presentes en la zona vean afectadas su ciclo biológico. El principal problema aparece por el cambio en la época de los periodos de sequía, ya que las especies piscícolas no están adaptadas. Las principales especies piscícolas presentes en la zona son: Carpa (*Carassius Auratus*), Cacho (*Leuciscus cephalus.*), Trucha (*Salmo trutta*), Trucha Arco Iris (*Salmo iridea*), Lucio (*Esox lucius*), Bermejuela (*Leuciscus cephalus.*), Black Bass (*Micropterus salmoides*), entre otros.

A su vez, el aumento de la temperatura producirá en el agua un aumento de la solubilidad de los gases por lo tanto se producirá un descenso de la concentración de oxígeno disponible por la fauna de la zona.

8. SEQUÍAS

8.1. CÁLCULO DE PERIODOS DE SEQUÍA

Para la evaluación de sequías se ha partido de las mismas series de aportaciones que se han analizado en el punto anterior.

Se ha calculado el valor acumulado de cuatro meses de la serie de aportaciones mensuales, periodo 1940/41-2007/08 de la cuenca del Ter en el embalse de Sau, generada en el estudio de Recursos precedente y denominada CHAC. Se toma el valor acumulado de 4 meses ya que se considera un periodo representativo de la capacidad de la regulación de los recursos en las Cuencas Internas. El percentil del 0.20 de esta serie se fija como el umbral de sequía. Esto significa que en 1 de cada 5 periodos de 4 meses acumulados no se abastecen las necesidades hídricas y se considera sequía. Este umbral corresponde a 93,02 hm³. Se considera periodo deficitario aquel que no supera este valor. Estos criterios han sido facilitados por la Agencia Catalana del Agua.

A continuación se calcularon los déficits acumulados a escala mensual, considerando únicamente los periodos de 4 meses cuyo valor acumulado es inferior a 93,02 hm³. Como el estudio está planteado con el objetivo de analizar la recurrencia de estos periodos secos se ha trabajado a escala mensual sin acumular, utilizando el criterio de los 4 meses para localizar aquellos periodos considerados como secos. El umbral mensual considerado es el correspondiente al percentil 0.20 de la serie mensual es 16,87 hm³.

Estos mismos umbrales se aplican a las series de proyecciones futuras de los 3 modelos climáticos, en cada uno de los 2 escenarios generados.

La siguiente figura muestra la serie de aportaciones de 68 años (CHAC), el umbral a escala mensual y los déficits acumulados en las seis hipótesis generadas.

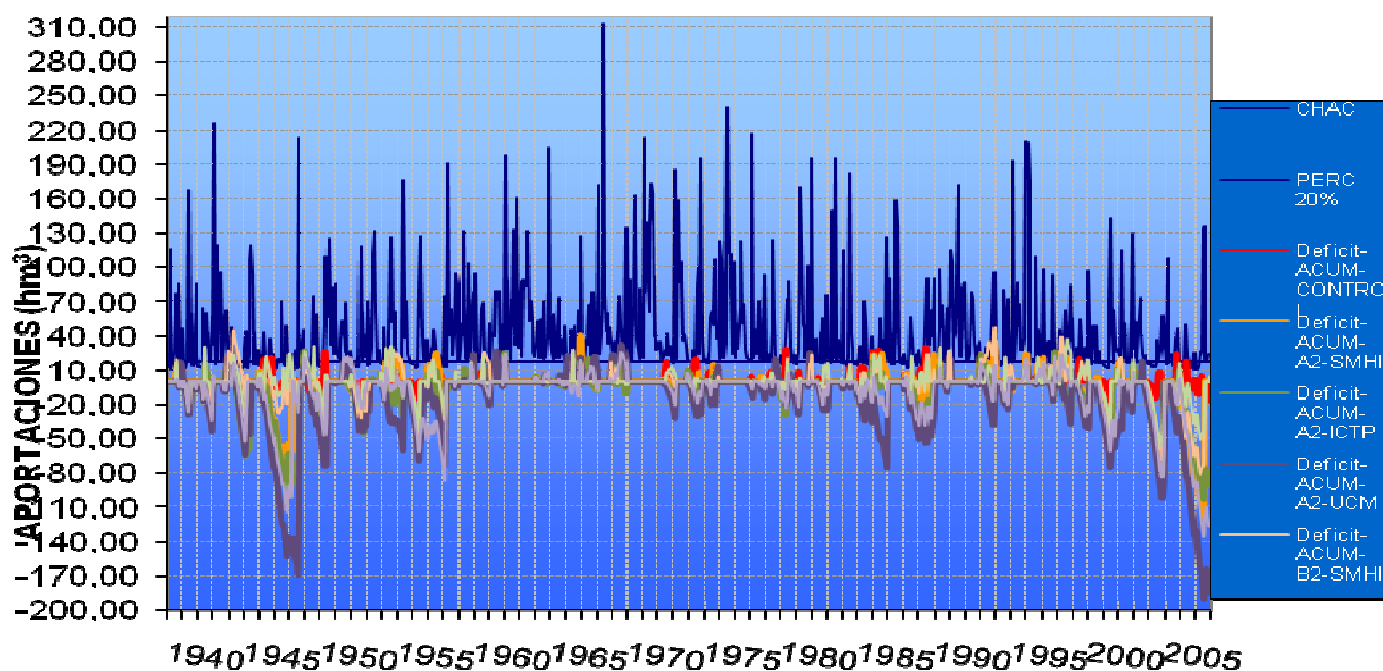


Figura 4. Serie de aportaciones (CHAC) y déficits acumulados mensuales de la serie CHAC y déficits acumulados de las proyecciones futuras.

La conclusión a la vista de los resultados es que:

- Es necesario revisar la metodología empleada porque los déficits parecen excesivos.
- Sin embargo aceptando lo que sale se detectan una serie de periodos críticos: la década de los 40, la de los 80 y la del 2000 y la tendencia actual es al déficit prolongado e incrementándose.

9. REFERENCIAS

9.1. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- www.googleearth.es
- www.icc.es
- www.aca.es
- www.aemet.es

9.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avaluació de l'impacte produït pel canvi climàtic sobre els recursos hídrics a las conques de capçalera de la muga i el francolí.
- Informe de asistencia técnica sobre métodos de aplicación de escenarios regionalizados de cambio climático para derivar los impactos con un modelo hidrológico de cuenca fluvial.
- 2007 Geert Lenderick *et al*: “Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach” en Hydrology and Earth System Science.
- Bernhard Lehner *et al*: “Europe’s droughts today and in the future” en EuroWasser.