

# ***Adaptabilidad de tres cuencas mediterráneas al cambio climático en Catalunya para el horizonte de predicción 2000-2050.***

*Gonzalo Olivares<sup>1</sup>; Karim Tamoh<sup>2</sup>; Manuel Gómez<sup>1</sup>; Lucila Candela<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Instituto Flumen. UPC. Jordi girona 1-3. 08034 Barcelona*

*<sup>2</sup>Departament de Ingenieria del Terreno-UPC. Gran Capitan s.n. Barcelona  
gonzalo.olivares@upc.edu*

## **1 Introducción**

El estudio del cambio climático acapara un alto interés en tiempos actuales. Los efectos potenciales de alteraciones del clima afectan directamente al ser humano, ya sea, a través de catástrofes o la interrupción de servicios básicos. Por esta razón los esfuerzos deben concentrarse en estudiar estos fenómenos y encontrar las claves que permitan distintas adaptabilidades a dichos cambios.

Los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos en un territorio, deben analizarse de manera rigurosa dadas las consecuencias sobre el desarrollo de la población. El estudio conjunto de los recursos superficiales y subterráneos aparece como una necesidad imperiosa.

La construcción de un modelo hidrológico se presenta como una alternativa válida de la evaluación de los recursos hídricos a corto y largo plazo. Para ellos es imprescindible contar con información histórica de calidad, ya que será la base de las distintas evaluaciones futuras. Adicionalmente la selección de los modelos meteorológicos a utilizar y la ejecución de técnicas estadísticas de *downscaling* deberán ser llevadas a cabo con conocimiento y pragmatismo ya que representan grandes fuentes de incertidumbre a la hora de generar datos.

Los objetivos principales del trabajo realizado han sido evaluar la aportación y la variabilidad de los recursos hídricos frente a cambios climáticos que puedan ocurrir en las cuencas en estudio. La evaluación de estos datos permitirá definir las posibles adaptabilidades posibles frente a cambios en el clima.

## **2 Área de estudio**

El área de estudio comprende dos zonas al noreste y una al sur de Catalunya. La cuenca del río Fluvià abarca el área de la Vall d'en Bas, Olot, Castelfollit, La Garrotxa y la zona del Empordá. La cuenca posee una superficie de 973 km<sup>2</sup> con un uso de suelo predominantemente de bosque y agrícola y con zonas urbanas que no superan el 24% de la superficie total de la cuenca. La zona presenta una meteorología con precipitaciones medias anuales de 870mm y una temperatura media anual de 14°C.

La cuenca del río Tordera se sitúa en la vertiente sur-oriental del macizo montañoso del Montseny. Se extiende entre el Montseny y la sierra litoral hasta la desembocadura en el mediterráneo (entre el Maresme y la Costa Brava). Atraviesa las comarcas del Vallés Oriental, la Selva y el Maresme, junto a una pequeña parte de Osona. Posee un área de 876km<sup>2</sup> con un uso de suelo predominantemente forestal y agrícola, con zonas urbanas que representan el 41,5% del área total. En la zona se registra una meteorología con precipitaciones medias anuales de 700mm y una temperatura media anual de 13.5°C.

La cuenca del Siurana está ubicada en una zona totalmente diferente a las anteriores. Abarca la cuenca del río Siurana al sur de Catalunya, y las zonas correspondientes a Cornudella del Montsant, Cabaces y Tivissa. Posee un área de 615 km<sup>2</sup> y presenta uso de suelo mayoritariamente agrícola con zonas de matorrales y suelo desnudo.

Las zonas urbanas no superan el 14% de la superficie total. El clima es más seco que el de las cuencas anteriores con un precipitación media anual de 500mm y una temperatura media anual de 15.2 °C. A continuación se muestran las cuencas en estudio y las estaciones meteorológicas y de aforo utilizadas para la confección del modelo hidrológico.

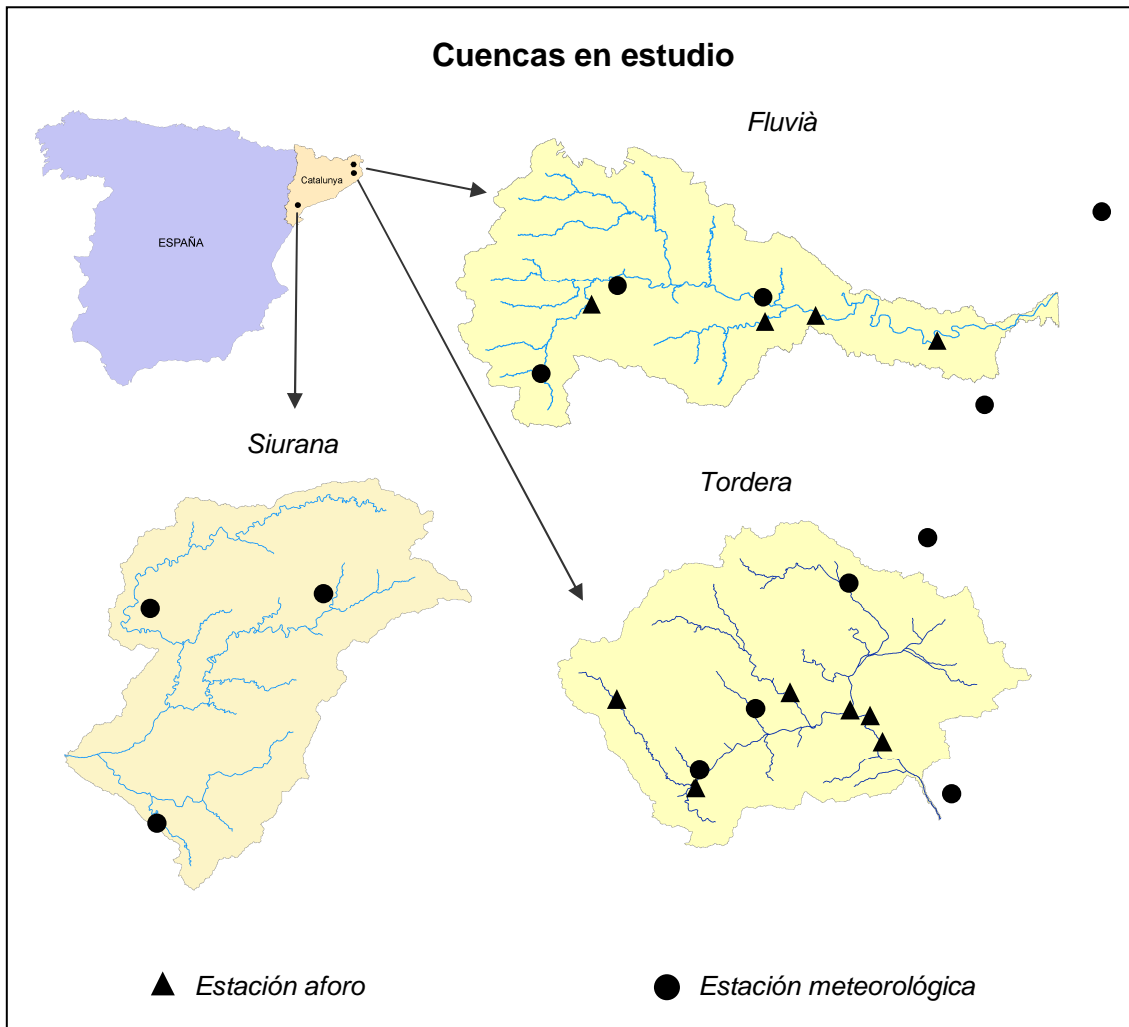


Figura 1 Cuencas de estudio con las estaciones meteorológicas y de aforo.

### 3 Metodología de estudio

La metodología se basó por un parte en la generación de series futuras de datos meteorológicos a través de modelos globales del clima (GCM) y posteriormente técnicas de *downscaling*. Esto permitió la evaluación de los recursos a horizontes futuros de predicción de 50 años (2000-2050) para dos tipos de escenarios climatológicos, a escala local. Así, se seleccionaron los escenarios B1 (cambio moderado del clima) y A2 (cambio más severo del clima). Se analizaron las series de aforo a través de modelos empíricos del tipo caja negra a fin de seleccionar los mejores datos para posteriores ajustes, calibraciones y validaciones a través del modelo distribuido.

Con el fin de evaluar la hidrología superficial de la cuenca y su interacción con la hidrología subterránea, se procedió a la construcción de un modelo hidrológico distribuido de la cuenca que se llevo a cabo a través de HEC-HMS 3.4. Adicionalmente se utilizó la herramienta HEC-GeoHMS, que corresponde a una utilidad que

mediante ArcGis 9.3., permite elaborar toda la información topográfica necesaria a través de modelos digitales de elevación del terreno (DEM).

La evaluación de la recarga profunda, se realizó mediante el método del balance del agua en el suelo a partir del código Visual-Balan. Se ha seguido la siguiente metodología: evaluación de la recarga natural por precipitación y retorno de riego para el periodo histórico (1984-2008); calibración de los resultados en base a los datos de aforo de las cuencas en estudio (figura 1) calibrados y validados mediante HEC-HMS para 25 años hidrológicos; estimación de la recarga futura a partir del modelo calibrado y con nuevos vectores de cambio (temperatura y precipitación según escenarios simulados por el ECHAM5, evapotranspiración y usos del suelo). El tratamiento de la entrada y salida de datos para el modelo se realizó mediante ArcWiew 3.x. Las masas de agua de la cuenca son las definidas por el ACA (ACA, 2005). La distribución de usos del suelo y parámetros aplicados en Visual Balan se obtuvieron del mapa hidrogeológico a escala 1:250.000 y del mapa de usos del suelo. La ETR se estimó mediante el método de Blaney-Criddle (la ETP a nivel diario fue proporcionada por el <sup>1</sup>IRTA). Para generar los escenarios futuros de usos del suelo se utilizó información basada en tendencias socioeconómicas esperables en 2020 y proporcionada por la administración local.

## **2.2 Series climáticas: Generación de escenarios futuros**

La generación de series diarias de precipitación y temperatura futuras se obtuvo a partir del escalado del Modelo de Cambio Global-GCM ECHAM5 (Max Planck Institute for Meteorology, 2003) y a partir de los datos del periodo histórico registrados en las diversas estaciones meteorológicas de la cuenca (figura 1). Se seleccionaron los escenarios B1 que se define como un cambio moderado y A2, que representa una alteración más severa del clima (IPCC, 2001). Estos cambios fueron aplicados para el periodo comprendido entre el 2000 y el 2050.

Las series futuras de precipitación se generaron a partir de cadenas de Markov y mediante la distribución de Weibull; para la temperatura se aplicaron modelos ARMA (*Autoregressive Moving-Average*). La metodología utilizada genera 200 series de 50 años de longitud para cada estación meteorológica y escenario climático. Por ello se optó por definir de acuerdo a criterios estadísticos una única serie representativa del clima futuro por estación meteorológica. Las series generadas constituyen los datos previos de entrada para el modelo hidrológico de simulación de escenarios futuros:

## **2.3 Adquisición, selección y estudio de los datos meteorológicos y de aforo**

Las series climáticas de las estaciones meteorológicas seleccionadas (figura 1) para el periodo histórico (1984-2008) fueron proporcionadas por la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Todas las series elegidas presentaron información diaria de precipitación y temperatura para un periodo de 25 años (1984-2008) y con un valor de ausencia de datos inferior al 20% del total del registro.

El paso fundamental para realizar cualquier estudio hidrológico consiste en la obtención de información suficiente y de calidad. Se dispuso de información meteorológica de 25 años (1984-2008) de estaciones ubicadas dentro de las cuencas en estudio. Los datos correspondían a registros diarios de precipitación y temperatura. El número de estaciones seleccionada para el estudio dependió de la calidad de la información disponible. Originalmente existía un número alto de estaciones por cuenca, pero una vez realizado el filtro y selección sólo se trabajó con las estaciones mostradas en la tabla 1.

La tabla 1 y la figura 1 muestran las estaciones meteorológicas y de aforo utilizadas en el estudio para la evaluación de las aportaciones en la cuenca.

---

<sup>1</sup> Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries

Tabla 1 Estaciones meteorológicas y de aforo utilizadas en el estudio hidrológico.

Cuenca	Nombre estación meteorológica	Estado	Nombre estación de aforo	Estado
Fluvià	Vall d'en Bas	en operación	Garrigàs	en operación
	Castellfollit de la Roca		Olot	
	Maia del Monacal		Esponellà	
	Jafre		Serinyà	hasta 1994
	Roses			
Tordera	Sant Celoni	en operación	Sant Celoni	en operación
	Breda		La llavina	
	Santa Coloma		Riera d'Arbucies	
	Aeroport Girona		Can Serra	
	Blanes		Fogars de Tordera	
			Can Simó	
Siurana	Cornudella de Montsant	en operación	no disponibles	-
	Cabaces			
	Tivissa			

Para los datos de aforo, se contó con las estaciones de la Agencia Catalana de l'Aigüa (ACA) en los principales cauces de las cuencas en estudio.

Nuevamente la primera parte del trabajo consistió en la depuración de los datos de aforo. Inicialmente se propuso la creación de un modelo empírico de caja negra (black-box model) que permitió la estimación de la escorrentía a través de los datos históricos de lluvia. El modelo se basó en el método del Número de Curva (*Curve Number Method*) desarrollado por *Soil Conservation Service* (SCS) perteneciente al *USDA Natural Resource Conservation Service*. El método consiste principalmente en aplicar un balance entre lluvia bruta, lluvia neta y pérdidas (Gómez, 2004).

El proceso permitió hacer una primera evaluación de los datos y seleccionar estaciones y series de datos de calidad para el posterior ajuste, calibración y validación del modelo hidrológico distribuido.

Para el caso de la cuenca del Siurana sólo se utilizó la metodología de cuencas no aforadas, por lo cual la construcción del modelo hidrológico se basó en la caracterización física de la cuenca haciendo hincapié en una mejor caracterización edafológica del modelo.

Los valores de temperatura diaria histórica (1984-2008) fueron utilizados para la generación de la evapotranspiración potencial utilizada en el modelo hidrológico. La generación de la evapotranspiración fue realizada través del modelo <sup>2</sup>GOTILWA desarrollado por el CREAM (Centre de Recerca Ecològica y Aplicacions Forestals). Dicha evapotranspiración fue definida para tres usos de suelo específicos: forestal, matorral y agrícola.

## 2.4 Construcción de un modelo hidrológico distribuido

Como paso posterior se procedió a la construcción de un modelo físico distribuido de la cuenca del Fluvià. La construcción del modelo hidrológico de base física se realizó principalmente a través de la herramienta HEC-GeoHMS y HEC-HMS 3.4. Dicha herramienta permite la construcción del modelo a través de información digital del terreno de 30 x 30m (*DEM*) elaborando así información referente a pendientes, causas principales, sub-división de cuencas, entre otras.

HEC-HMS consta de una amplia gama de modelos y métodos que permiten construir un modelo hidrológico. La selección de estos dependió directamente del tipo de información utilizada en el estudio y de los objetivos propuestos a cumplir. Se definió que la mejor manera de caracterizar el movimiento del agua en el sistema

<sup>2</sup> Growth of Trees is Limited by Water

hidrológico sería la utilización de un modelo continuo de pérdidas, que permitiera ingresar la información en formato mallado (*Grid format*). A partir de esto se seleccionó el *Soil Moisture Accounting model* (SMA).

La construcción de un modelo hidrológico distribuido de base física en HEC-HMS 3.4., consistió además en la selección de diversos modelos o métodos hidráulicos-hidrológicos que permitieron la correcta evaluación de los procesos hidrológicos e hidráulicos. A continuación se presentan los distintos métodos asociados al proceso.

- *Soil Moisture Accounting model* (modelo continuo de pérdidas)
- *Mod-Clark method* (modelo de transformación lluvia-escorrentía)
- *Kinematic wave approach* (modelo de propagación de la onda cinemática)
- *Linear reservoir method* (modelo de caudal base)

Un punto importante fue la utilización de la precipitación espacialmente distribuida en formato mallado (celdas de 1000 x 1000m) que permitió, dependiendo de la disponibilidad de estaciones, una mejor definición espacial de la lluvia.

La evapotranspiración en el modelo fue evaluada través de la aproximación *Monthly Average* que básicamente consiste en la obtención de un valor mensual de evapotranspiración potencial que es repartido entre los días del mes.

## 2.5 Ajuste y calibración del modelo hidrológico

Se realizaron diversos ajustes y calibraciones la cuenca del Fluvià y Tordera. Se utilizaron estaciones de aforo de cada cuenca seleccionando series de datos que fueron previamente chequeadas con el modelo de caja negra. Dada la irregularidad de la calidad de los datos en la mayoría de los casos, sólo fue posible realizar calibraciones y ajustes con series no mayores a 5 años continuos. A continuación se muestra la calibración y ajuste para la cuenca del Fluvià y Tordera.

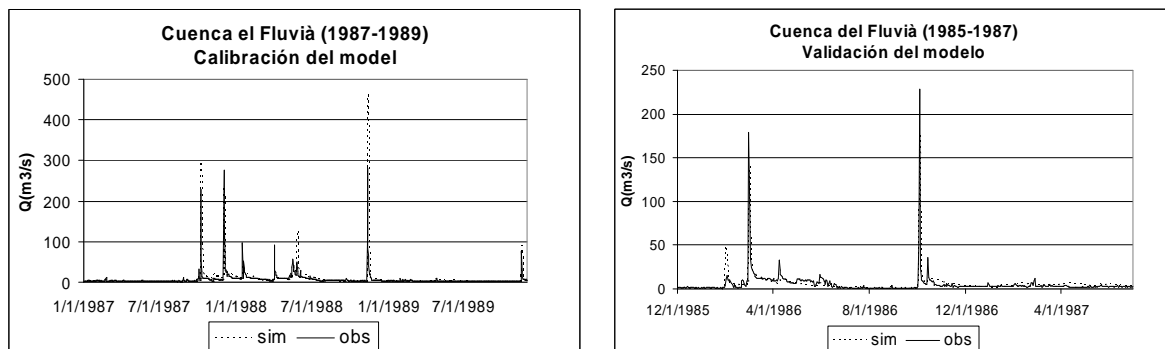


Figura 2 Calibración y validación del modelo para la cuenca del Fluvià.

La figura 2 muestra el ajuste y calibración de la cuenca del Fluvià. Se observa que el modelo es capaz de modelar el comportamiento de la curva de caudales tanto para la calibración como la validación. La mayoría de los picos han sido replicados. Sin embargo puede haber diferencia entre ellos dada la presencia de errores en los datos y la distribución espacial de la lluvia que es difícilmente captada a través de un número limitado de estaciones de precipitación.

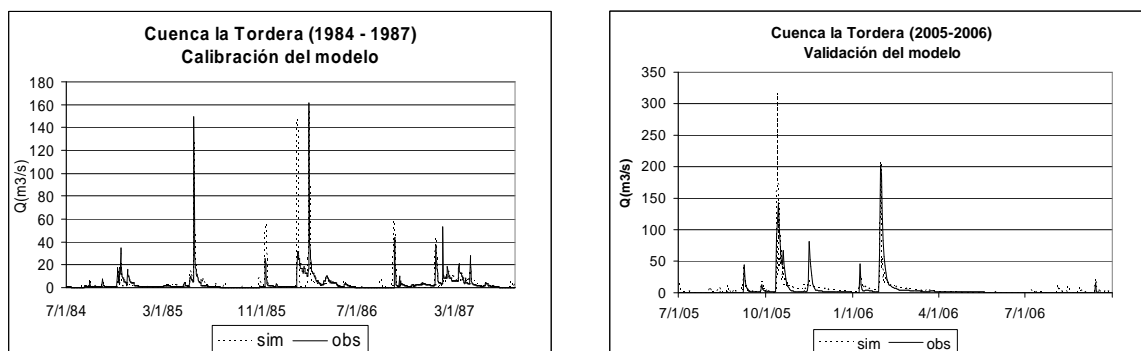


Figura 3 Calibración y validación del modelo para la cuenca de la Tordera.

Para el caso de la Tordera, se observaron resultados similares a los encontrados en Fluvià. El modelo es capaz de reproducir la mayoría de los picos de caudal. Adicionalmente se registraron volúmenes de caudal similares entre el valor observado y el simulado, ya sea para el proceso de calibración como la validación. A continuación la tabla 2 muestra el valor de los volúmenes totales para el período de validación de la cuenca del Fluvià y la Tordera.

Tabla 2 Volúmenes calculado por el modelo para la validación del modelo en Fluvià y Tordera.

Cuenca	Estación aforo	Fecha simulación	Volumen real (hm <sup>3</sup> )	Volumen simulado (hm <sup>3</sup> )	Error estimación (%)
Fluvià	Garrigàs	01/01/87-30/09/89	657	660	+0.6*
Tordera	Can Serra	01/06/05-30/09/06	230	226	-1.5**

\* sobreestimación

\*\* subestimación

## 4 Resultados de escenarios futuros

Como ya se mencionó anteriormente se proyectaron dos escenarios a largo plazo para las tres cuencas en estudio. Los horizontes de predicción abarcaron del año 2000 al 2050. Adicionalmente dos escenarios climatológicos fueron seleccionados: el escenario A2 que representa un cambio del clima más severo y el escenario B1 con un cambio del clima moderado. De las simulaciones realizadas en el modelo se obtuvieron los valores de aportaciones anuales para cada año del horizonte de predicción en cada horizonte de predicción propuesto.

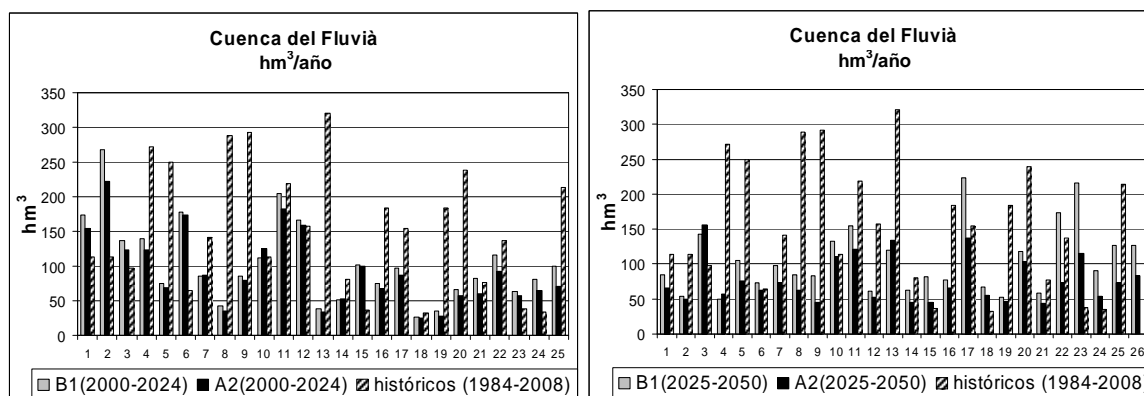


Figura 4. Aportación anual para el escenario B1, A2 y la aportación histórica del caudal entre 1984-2008. Cuenca del Fluvià.

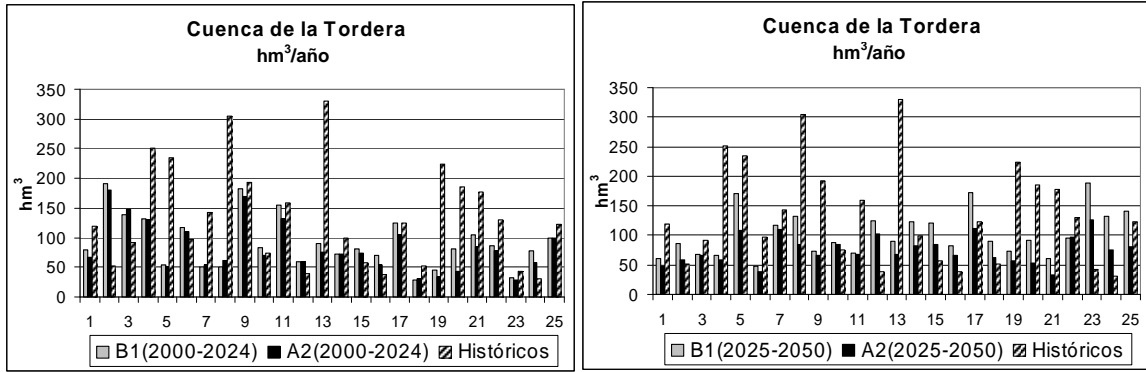


Figura 5 Aportación anual para el escenario B1, A2 y la aportación histórica del caudal entre 1984-2008. Cuenca de la Tordera.

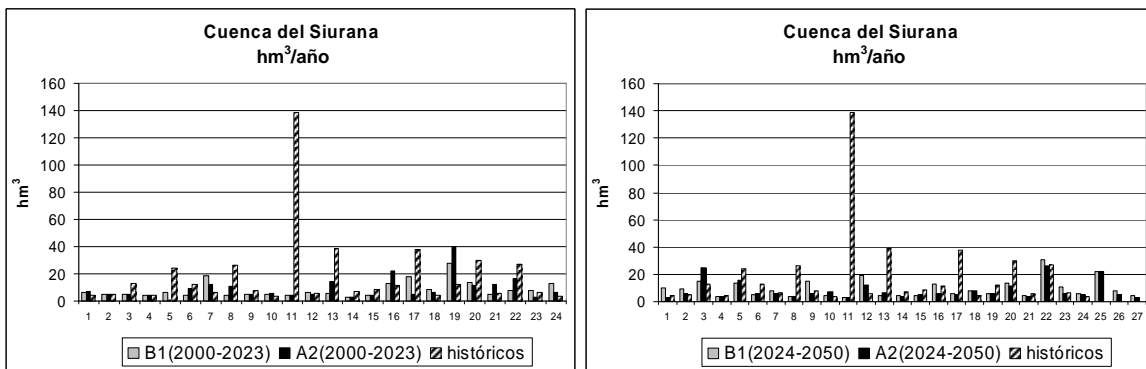


Figura 6 Aportación anual para el escenario B1, A2 y la aportación histórica del caudal entre 1984-2008. Cuenca del Siurana.

Como se observa en la figura 4 hay una clara disminución de las aportaciones para el horizonte de predicción 2000-2050 (B1 y A2). La tabla 3 muestra las disminuciones de caudal en términos medios y porcentuales.

La figura 5 muestra el efecto de ambos escenarios (B1 y A2) con respecto a la serie histórica en la Tordera. Nuevamente hay una disminución en la aportación para las series de datos analizados. Dicha disminución se ve acrecentada con el escenario A2.

Finalmente la figura 6 muestra el caso del Siurana. Se observa claramente que las aportaciones para los escenarios en estudio son más bajas en relación a las otras dos cuencas. Esto es de esperarse debido a que la precipitación media anual de la cuenca es 30% menor que en las otras cuencas analizadas. También se observa un pico registrado en el año 1994 que coincide con la crecida del río en octubre de ese mismo año donde se registraron precipitaciones de más de 400mm en 72 horas.

A continuación la tabla 3 muestra los valores de las aportaciones estimadas para el horizonte 2000-2050.

Tabla 3 Valores estimados para las tres cuencas de estudio en el horizonte 2000-2050.

Cuenca del Fluvià									
Escenarios	Media anual (hm <sup>3</sup> ) en 25 años 2000-2024)	Media anual (hm <sup>3</sup> ) en 25 años 2025-2050)	% respecto al histórico (2000-2024)	% respecto al histórico (2025-2050)	Precipitación media (2000-2024) histórico (mm)	Precipitación media (2025-2050) histórico (mm)	% respecto P_media		Recarga (hm <sup>3</sup> )
Histórico (1984-2008)	*155.1	*155.1	-	-	***870	***870	-		273
Escenario B1	103.9	105.2	68	68	788	801.2	90	92	247
Escenario A2	93.2	77.6	60	50	761.4	722.6	87	83	226
Cuenca de la Tordera									
Histórico (1984-2008)	*134.9	*134.9	-	-	***708	***708	-		37.8
Escenario B1	91.6	102.7	68	76	664	683	94	96	37.4
Escenario A2	82.7	75.5	61	56	646	608	91	86	32.5
Cuenca del Siurana									
Histórico (1984-2008)	**18.8	**18.8	-	-	***493	***493	-		39.4
Escenario B1	8.5	9.3	43	43	461	468	93	94	36.3
Escenario A2	8.8	8.2	41	40.5	437	434	88	88	33.7

\*Valores históricos (1984-2008) calculados para la cuenca del Fluvià y Tordera

\*\* Valores históricos (1984-2007) calculados para la cuenca del Siurana

\*\*\* Valores históricos de precipitación para la cuenca de estudio

Se observa que una disminución de la lluvia del 8 al 17% genera disminuciones de la aportación que varían desde un 33 a un 50%. El valor mayor corresponde a lo registrado para el escenario A2 que fue propuesto como el escenario más restrictivo de cambio en el futuro (tabla 3).

De esto se desprende que existe un efecto importante del comportamiento del sistema hidrológico (cuenca) en términos de aportación. Si bien es cierto que los cambios de lluvia y su distribución espacial y temporal afecta la aportación final, también se observa que el tipo de cuenca y sus características (infiltración, contenido de humedad, evapotranspiración, etc) cumple un rol importante y amplifica el efecto de la reducción de aportación.

Por otro lado, la cuenca de la Tordera se comporta de manera un tanto distinta a la cuenca del Fluvià. Si bien es cierto que la Tordera posee un área menor al Fluvià (11%), las aportaciones también varían de manera significativa. Se observa que con disminuciones en la precipitación del 5 al 14%, hay disminuciones en las aportaciones que van del 24 al 44%, respectivamente, que son algo menores a las observadas en el Fluvià. Está claro que el efecto de la disminución de la lluvia podría verse mitigado por la influencia de los acuíferos existentes en la zona de la Tordera. Este efecto es claramente replicado en el modelo distribuido de base física propuesto para la resolución del problema. Nuevamente se observa que el escenario A2 presenta menores valores de aportación producto a que corresponde al escenario más adverso.

Finalmente el caso del Siurana es el caso más interesante de analizar. La falta de información histórica de base amplifica la incertidumbre asociada al cálculo del modelo. Se observan a priori, cambios esperables para una cuenca de este tipo, con cauces efímeros. Por ubicación y condición, la cuenca se sitúa en un sector seco, que en



comparación con las otras dos cuencas, la precipitación media anual es menor en un 30%. De esta misma manera hay una clara disminución de la aportación de alrededor de un 60% (entre 57% y 59.5%) con cambios en la precipitación (disminución) de no más de un 12%. El Siurana es la cuenca que presenta resultados más similares entre escenario (B1 y A2), a diferencia de las otras cuencas donde se observan claras diferencias por escenario climatológico.

Con relación a la recarga se puede mencionar que en general para las tres cuencas en estudio y los dos escenarios climatológicos propuestos en el estudio, las reducciones son mucho menores que en el caso de las aportaciones. Para el caso del Fluvià las reducciones recarga van de un 9% a un 17% en comparaciones con las aportaciones que están entre un 33% y un 50%. Esto considerando escenarios B1 y A2 respectivamente. La cuenca de la Tordera presenta reducciones de recarga que van desde un 1.05% (B1) a un 14% (A2). Esto es bastante menor en relación a lo encontrado para las aportaciones (24% y 44%, respectivamente). Adicionalmente el Siurana se comporta de manera similar. Los resultados arrojaron disminuciones en la recarga que van de un 8% (B1) a un 14,5% (A2). Sin embargo aquí es donde se producen los cambios más drásticos en la reducción de la aportación, con disminuciones que van de un 57% (B1) y 59,5% (A2).

Los resultados de la cuenca del Siurana demuestran el estado de fragilidad de las zonas con déficit de precipitación y como cambios en la precipitación pueden hacer variar drásticamente las aportaciones. Será interesante a futuro el estudio más detallado de dichas zonas ya que son las que se encontrarán más vulnerables a posibles cambios en el clima local.

## 5 Conclusiones

Los objetivos principales del trabajo realizado han sido el evaluar la aportación y la variabilidad de los recursos hídricos frente a cambios climáticos que puedan ocurrir cuencas mediterráneas de Catalunya. La evaluación de estos datos permitirá definir las posibles adaptabilidades frente a cambios futuros en el clima. Dada la irregularidad de la calidad de los datos en la mayoría de los casos, sólo fue posible realizar calibraciones y ajustes con series no mayores a 5 años continuados

De los resultados obtenidos se desprende que existe un efecto muy importante sobre el comportamiento del sistema hidrológico (cuenca) en términos de aportación. Si bien es cierto que la lluvia y su distribución espacial y temporal es el principal factor que afecta la aportación final, también se observa que el tipo de cuenca y sus características (infiltración, contenido de humedad, evapotranspiración, etc) cumple un rol importante que amplifica las variaciones porcentuales, en términos de recursos disponibles en el territorio.

Los datos de calibración muestran que los resultados obtenidos con Visual-Balan solo presentan una desviación del 10% aproximadamente entre los valores reales medidos en los aforos superficiales y los valores obtenidos del estudio de la recarga distribuida a las masas subterráneas. El valor obtenido se encuentra entre los márgenes de error aceptables.

Se puede concluir que los parámetros que más condicionan la recarga, tanto histórica como futura, son siempre los meteorológicos. Los cambios de usos del suelo tienen un valor despreciable en los resultados finales

Finalmente se observa que los mayores cambios producidos por el posible cambio climático y la disminución progresiva de las precipitaciones, afectaran de manera más intensa los procesos superficiales ya que las procesos sub-superficiales (recarga) presentan una menor disminución porcentual que éstos.

## 6 Referencias

ACA, 2005. Directiva Marc de l'Aigua a Catalunya.

IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, Van Der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United, Kingdom and New York, N.Y., USA, 881 pp

Max Planck Institute for Meteorology. 2003. *The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5.*, report No. 349.

Nanía, L Gómez, M. y. (2004). *Ingeniería Hidrológica*. Grupo Editorial Universitario, p. 278, España.

Natural Resources Conservation Service (SCS), 1986, National Engineering Manual Section 4 Hydrology, USDA (Also know as National Engineering Manual Part 630).

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Publicación Técnica de ENRESA nº 5/99, Madrid. 205 pp.

The Hydrologic Modeling System, HEC-HMS 3.4. US Army Corps of Engineers, 2010.

The Geospatial Hydrologic Modeling Extensión. HEC-GeoHMS. US Army Corps of Engineers, 2010.