



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



CTCN

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE CAUDALES
ECOLÓGICOS Y PLANES DE MANEJO DE CUENCAS EN PARAGUAY.**

APLICACIÓN A LA CUENCA PILOTO DEL RÍO TEBICUARY.

**3.4. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA
PARA LA DEFINICIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN
LA CUENCA DEL RÍO TEBICUARY**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA	2
2.1. Calibración y parametrización del modelo hidrológico	2
2.1.1. Calibración con datos históricos	2
2.1.2. Parametrización para los escenarios futuros	5
2.2. Regímenes medios de caudales en situación actual	6
2.2.1. Situación actual	6
2.2.2. Resultados para el RCP 4.5	11
2.2.3. Resultados para el RCP 8.5	14
3. DEFINICIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS	18
3.1. Caudales ambientales basados en métodos hidrológicos	18
3.2. Caudales ambientales basados en modelos biológicos	21
3.2.1. Introducción y objetivos	21
3.2.2. Metodología	21
3.2.3. Resultados	30
3.2.4. Conclusiones	33
3.3. Síntesis y propuesta de caudales ecológicos en la cuenca	34
4. BIBLIOGRAFÍA	36

APÉNDICE 3. REGÍMENES DE CAUDALES POR SUBCUENCAS

1. INTRODUCCIÓN

Tras la presentación en los documentos anteriores de, la recopilación y análisis de información disponible en a la cuenca del río Tebicuary (informe 3.1 – *Inventario y análisis de la información disponible*) y la consiguiente elección de una herramienta metodológica adecuada, en función de los datos recopilados, para la definición de caudales ecológicos en la cuenca y descripción de la misma (informe 3.2 – *Metodologías de definición de caudales ecológicos y descripción de la herramienta propuesta*) se presenta en este documento la aplicación de dicha herramienta.

El documento se estructura en dos capítulos, además de esta introducción. En el primero se presenta la caracterización del régimen hidrológico de la cuenca para la situación actual y los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, para el periodo 2045-2069 (capítulo 2) para lo cual se ha utilizado el modelo hidrológico LEM-DW (Logistic Equilibrium Model with Diffusive Wave) descrito en el capítulo 4 del informe 3.2. En el segundo (capítulo 3) se presenta la definición de los caudales ecológicos en la cuenca del río Tebicuary por los métodos descritos previamente en el informe 3.2 y la propuesta final del régimen de caudales ecológicos para la cuenca tras analizar los resultados obtenidos por cada uno de los métodos.

2. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA

2.1. Calibración y parametrización del modelo hidrológico

2.1.1. Calibración con datos históricos

La calibración del modelo hidrológico LEM-DW se ha llevado a cabo considerando parámetros uniformes del modelo para las siete subcuencas aguas arriba de Villa Florida (Figura 1), el único punto de la red fluvial donde se dispone de una serie larga de caudales medidos diarios. Existe solapamiento entre los datos de precipitación TRMM con los aforos en dicho punto, únicamente en dos periodos de tiempo:

Periodo 1: 1998-2001 (4 años)

Periodo 2: 2013-2014 (2 años)

Desafortunadamente, durante el periodo 2002-2012 se dejó de medir el nivel en la estación de Villa Florida, hasta que se renovó el sensor en el año 2013.

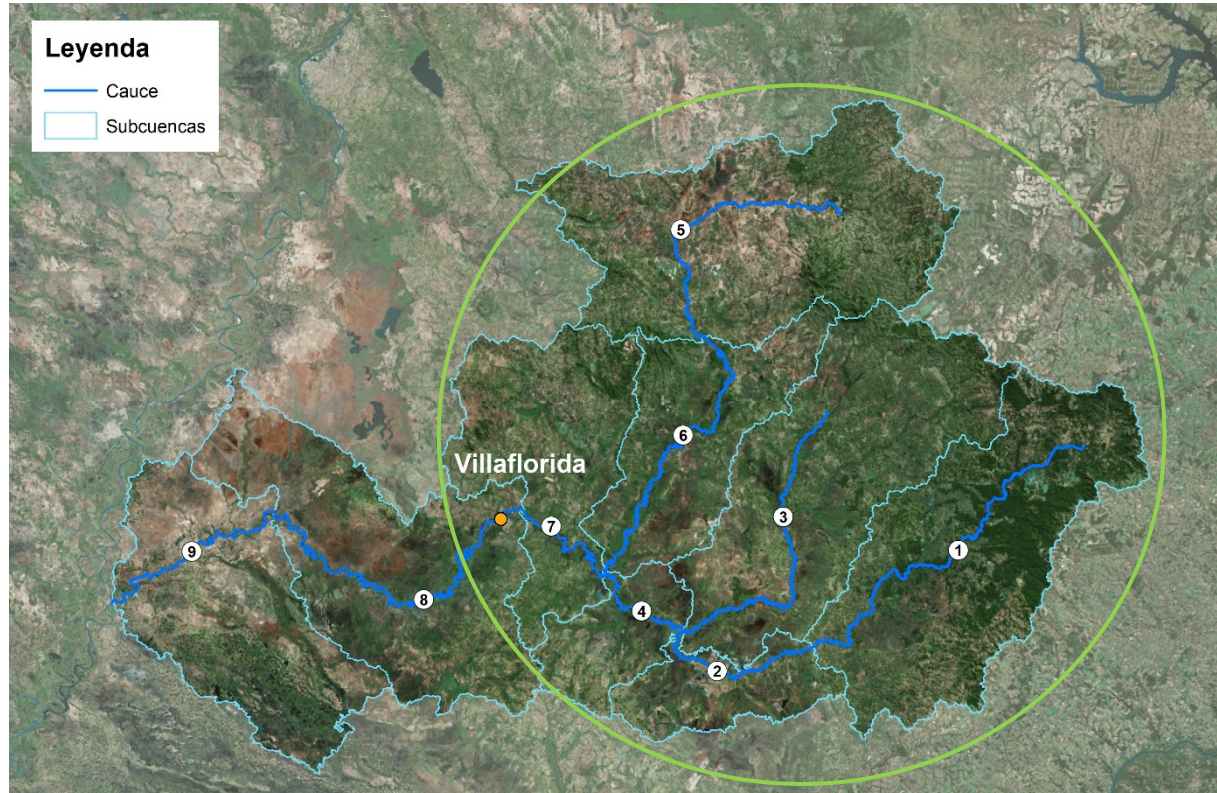


Figura 1. Subcuencas consideradas para el modelado de la cuenca del Tebicuary con indicación de las 7 situadas aguas arriba de la estación de aforo de Villa Florida utilizadas para la calibración del modelo.

Para calibrar los parámetros del modelo, se ha otorgado más peso a los datos del periodo 1, por ser más largo y por presentar previsiblemente menores alteraciones del régimen natural. La calibración se ha llevado a cabo combinado un procedimiento matemático de optimización, con un ajuste final manual de los parámetros. La optimización se ha llevado a cabo con una variante del algoritmo "fmincon" incluido en el paquete numérico Matlab, empleando la función objetivo a minimizar $F_{obj} = 1 - NS$, donde NS es el coeficiente de Nash-Sutcliffe (su valor máximo es 1, lo que indica un ajuste perfecto). También se ha minimizado la misma función aplicada al logaritmo de los caudales (NSL), lo que produce que los valores altos no tengan tanto peso en la calibración. Los parámetros obtenidos, para ambos periodos y funciones objetivo, son los siguientes (Tabla 1):

	A	k	alfa	C	D	NS	Error Vol.
Periodo 1-NS	0.28	0.013	0.020	19.2	214	0.83	-0.6%
Periodo 1-NSL	0.26	0.022	0.014	18.4	559	0.78	-6.6%
Periodo 2-NS	0.20	0.015	0.028	22.5	205	0.88	-0.3%
Periodo 2-NSL	0.18	0.023	0.03	20.1	395	0.86	-4%

Tabla 1. Parámetros obtenidos para los periodos 1 y 2 y para las funciones objetivo NS y NSL.

La tabla también presenta, en la última columna y a título informativo, el error de volumen, si bien este indicador está muy influenciado por los caudales altos y no resulta muy relevante para los objetivos de este trabajo.

A la vista de estos resultados, se han determinado los siguientes valores finales para el modelo en situación actual, otorgando más peso a los resultados del periodo 1 (Tabla 2):

A	k	alfa	C	D
0.26	0.013	0.025	21	400

Tabla 2. Valores finales de los parámetros para el modelo en situación actual.

En las Figuras 2 y 3 se presentan las series medidas y ajustadas en los dos periodos de calibración. Finalmente, resulta un coeficiente NS de 0.82 para el periodo 1, y de 0.86 para el periodo 2.

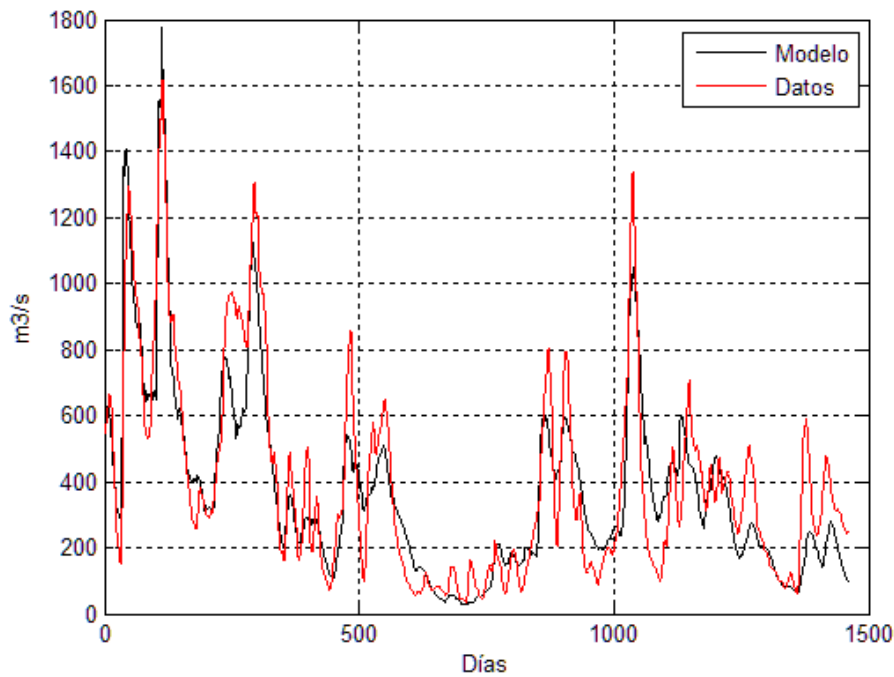


Figura 2. Ajuste del periodo 1 (1998-2001) con el modelo propuesto.

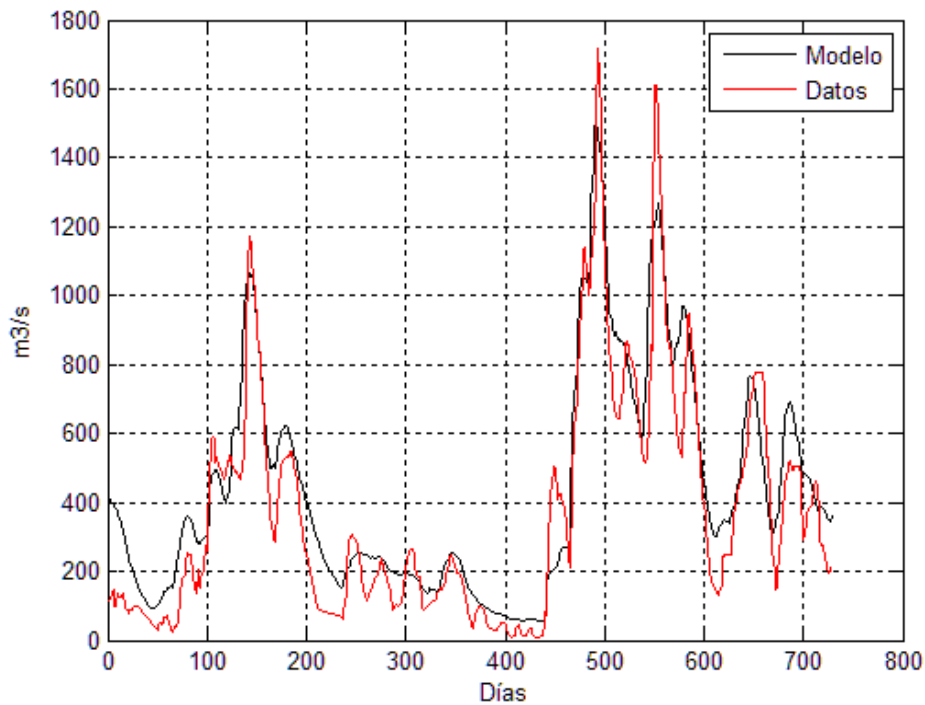


Figura 3. Ajuste del periodo 2 (2013-2014) con el modelo propuesto.

2.1.2. Parametrización para los escenarios futuros

Los parámetros de un modelo hidrológico pueden variar, tal y como pueden hacerlo los mecanismos físicos de generación de escorrentía, con el paso del tiempo. Por lo tanto, se debe analizar cuál debe ser el valor de los parámetros del modelo propuesto para los escenarios futuros, con cambio climático. Si bien en general esta tarea de proyectar parámetros es compleja y no está resuelta, el hecho de que el modelo LEM-DW se base en una hipótesis de equilibrio sustentada por la teoría de las curvas de Budyko, permite plantear de forma sencilla una perturbación de los parámetros obtenidos. Para ello, se asumen las siguientes hipótesis:

- 1) Las alteraciones en la cuenca derivadas del cambio climático no generarán cambios cualitativos en la vegetación ni en los ecosistemas asociados.
- 2) La geomorfología, tanto de la red fluvial como de los propios cauces (secciones tipo, pendiente, sinuosidad) no se verá afectada.

Como consecuencia de la segunda hipótesis planteada, los parámetros de celeridad y difusividad del modelo (C y D) no se modificarán con respecto a la situación actual. Es sabido, a partir del análisis de otras cuencas, que el parámetro k está ligado a la capacidad de almacenamiento del suelo, que a su vez guarda correlación con el índice de flujo base (base flow index o BFI, en inglés); se asumirá que este parámetro no se verá alterado por un cambio en las condiciones climáticas futuras. Sin embargo, tanto el parámetro A como alfa determinan de manera dinámica el coeficiente de escorrentía medio de la cuenca, y éste se verá alterado como consecuencia de los cambios en el índice de aridez. A partir de la series de precipitación y ETP futuras, se puede obtener el nuevo índice de aridez de la cuenca y, con la relación de Schreiber, la variación del coeficiente de escorrentía (CE) entre la situación actual y las condiciones futuras, derivada del cambio previsto en el índice de aridez (IAR) (Tabla 3):

	PREC	ETP	IAR	CE	A	Alfa
SIT. ACTUAL	4.50	4.29	0.953	0.386	0.260	0.025
RCP 4.5	4.62	4.54	0.982	0.375	0.264	0.024
RCP 8.5	5.59	4.71	0.844	0.430	0.244	0.028

Tabla 3. IAR, CE y valores de los parámetros A y alfa obtenidos para dos escenarios de cambio climático, RCP 4.5 y RCP 8.5.

Se observa un leve descenso del coeficiente de escorrentía para el RCP 4.5, y un aumento significativo del mismo para el RCP 8.5. Ahora hay que imponerle al nuevo modelo, en sus dos versiones, que cumpla con los valores del coeficiente de escorrentía estimados, modificando para ello el valor de los parámetros A y alfa. De la aplicación del modelo en otras cuencas, se sabe que alfa es proporcional al coeficiente de escorrentía, y dicha proporcionalidad se debe mantener en los escenarios futuros. Por lo tanto, queda por determinar únicamente A, tras obligar al modelo a cumplir con los coeficientes de escorrentía estimados; los resultados se presentan en las últimas dos columnas de la tabla

anterior. En definitiva, los parámetros del modelo hidrológico adoptados para los dos escenarios futuros con cambio climático quedan de la siguiente manera (Tabla 4):

	A	k	Alfa	C	D
RCP 4.5	0.264	0.013	0.024	21	400
RCP 8.5	0.244	0.013	0.028	21	400

Tabla 4. Valores finales parámetros para el modelo para los dos escenarios de cambio climático, RCP 4.5 y RCP 8.5.

Se puede observar que el escenario RCP4.5 muestra una cuenca prácticamente igual a la actual, pero en el RCP 8.5 el índice de aridez (y por tanto el parámetro A) se reducen visiblemente, mientras que el parámetro alfa aumenta, indicando una menor memoria del sistema (el inverso de alfa representa un tiempo característico de la cuenca en días, que pasa de 40 a 36 días).

2.2. Regímenes medios de caudales en situación actual

Se ha ejecutado el modelo hidrológico LEM-DW para la cuenca del Tebicuary con los parámetros presentados en el apartado anterior, para los tres escenarios de trabajo considerados:

- 1) Situación actual (periodo 1998-2014).
- 2) Escenario con cambio climático RCP 4.5 (periodo 2045-2069).
- 3) Escenario con cambio climático RCP 8.5 (periodo 2045-2069).

A continuación se presentarán los resultados obtenidos.

2.2.1. Situación actual

El modelo LEM-DW ha proporcionado las series de caudales diarios en nueve puntos representativos de la cuenca, correspondientes a los puntos finales de las subcuencas consideradas. A partir de dichas series, es posible caracterizar el régimen de caudales en dichos puntos, tanto a escala anual como por meses.

Comenzando por el régimen anual, la Tabla 5 presenta varios percentiles representativos del caudal (también de forma gráfica en la Figura 4).

ACTUAL	Q5%	Q10%	Q50%	Q90%
SC-1	14.1	19.9	59.9	155.9
SC-2	18.1	24.9	75.1	194.2
SC-3	10.8	15.6	52.5	135.7
SC-4	33.6	44.5	141.8	362.0
SC-5	11.1	16.6	63.6	161.1
SC-6	18.1	27.2	98.9	233.7
SC-7	60.6	83.8	271.0	661.9
SC-8	78.8	102.9	327.4	756.7
SC-9	90.9	117.4	373.0	855.6

Tabla 5. Percentiles representativos del régimen de caudales en diversos puntos (m³/s) para la situación actual.

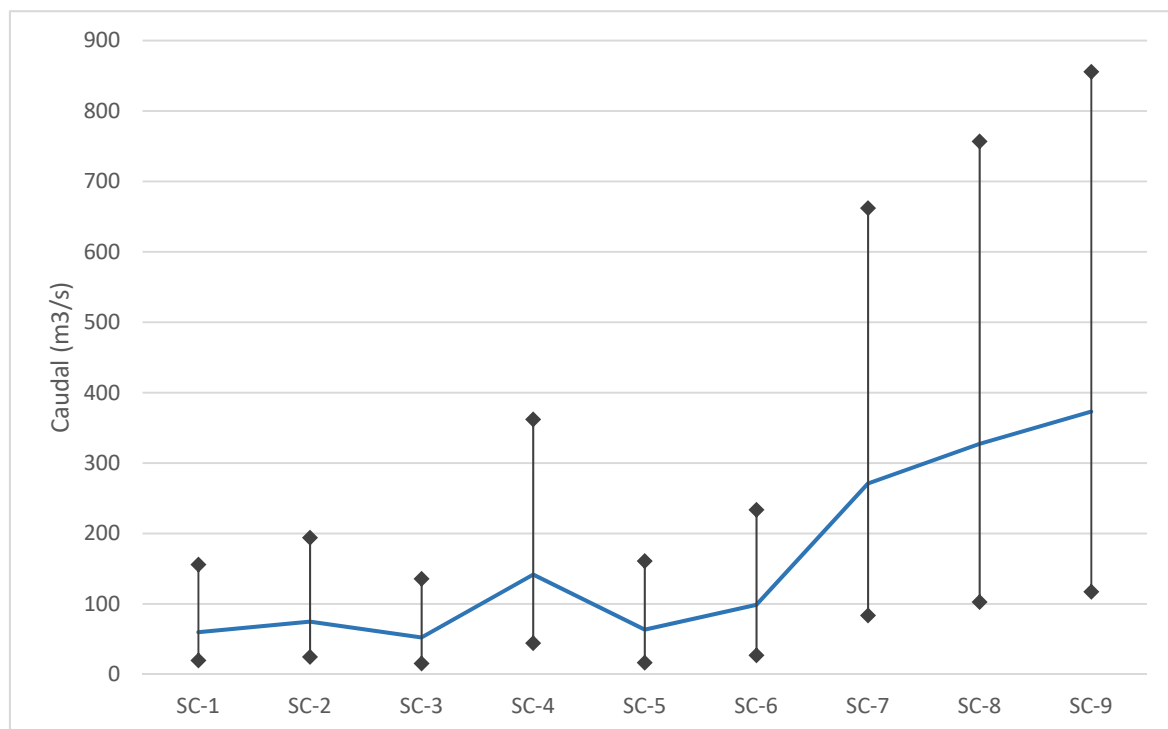


Figura 4. Percentiles del 10, 50 y 90% del régimen de caudales en los puntos de cálculo.

También se han obtenido las curvas de caudales acumulados para todas las subcuencas, y se ha representado un periodo de dos años de cada serie, para facilitar el análisis visual de las mismas. En las Figuras 5 y 6 se presenta las gráficas correspondientes a la subcuenca n°1 (SC-1) y n°7 (SC-7), correspondientes al Alto Tebicuary (aproximadamente a la altura de Yuty) y al Bajo Tebicuary en Villa Florida. El resto de gráficas se pueden encontrar en el Apéndice 3.

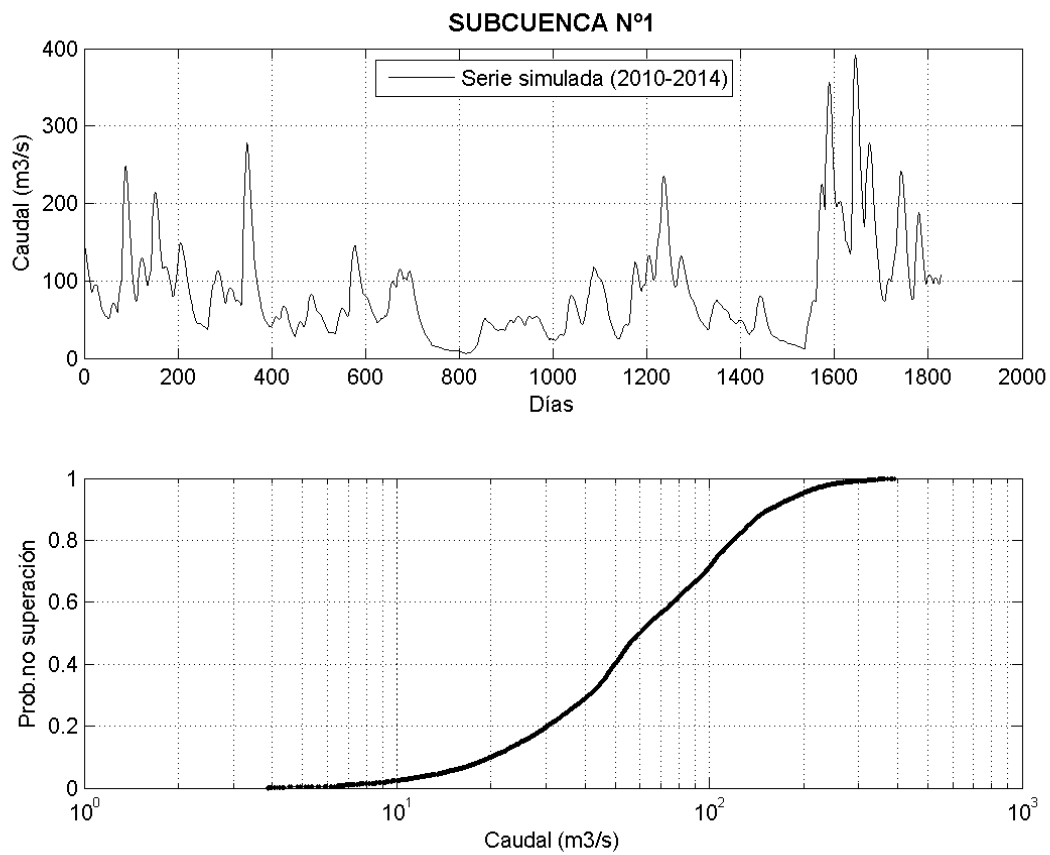


Figura 5. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-1 (Yuty).

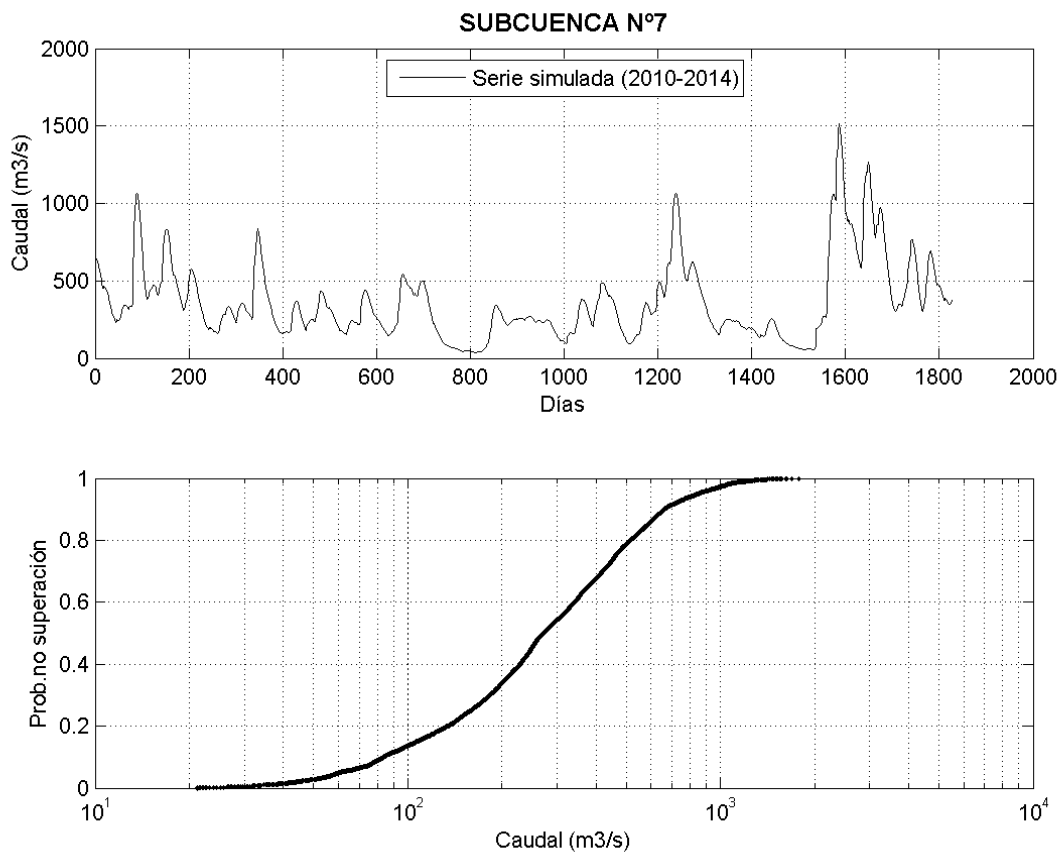


Figura 6. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-7 (Villa Florida).

Para el análisis mensual, en primer lugar se han obtenido las series de caudales agregadas, y se han determinado para cada mes los valores correspondientes al percentil del 10, 50 y 90% de probabilidad de superación; para facilitar la interpretación, los tres valores se han asimilado a un año seco, medio y húmedo, respectivamente. Los resultados en Yuty y Villa Florida se presentan en las Figuras 7 y 8, mientras que el resto se ha incluido en el Apéndice 3.

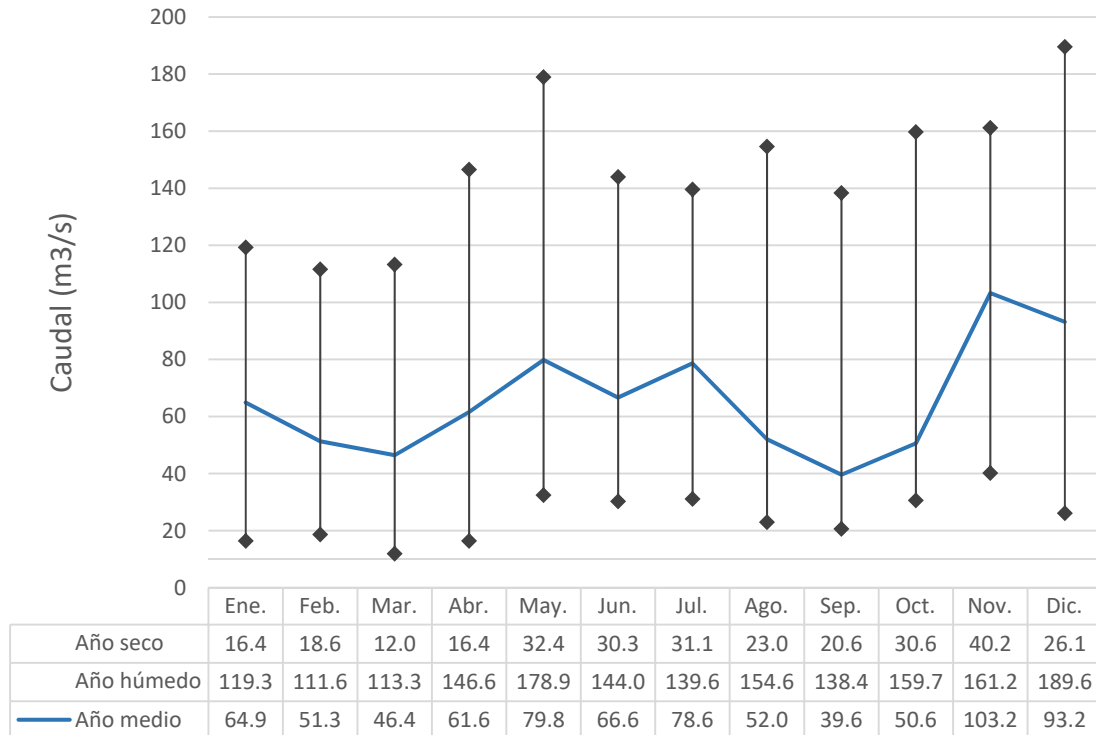


Figura 7. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-1.

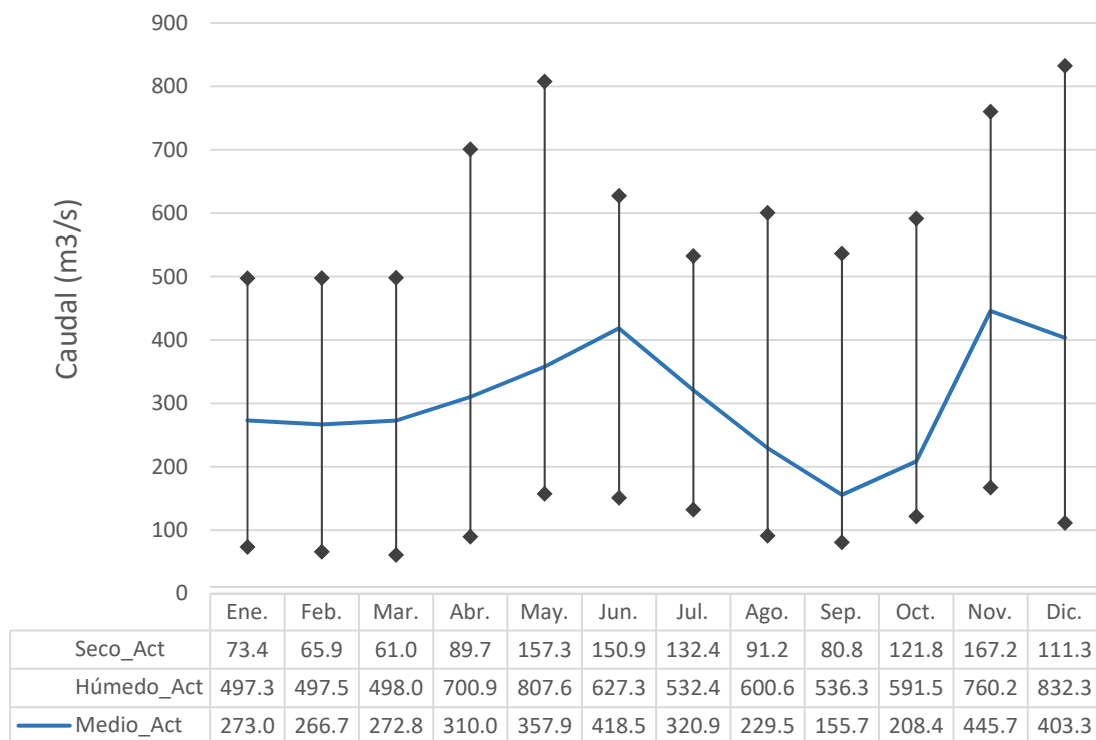


Figura 8. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-7 (Villa Florida).

Finalmente, se han obtenido los coeficientes de correlación entre las series diarias correspondientes a los diversos puntos, lo que permite una primera aproximación al grado de conocimiento que se puede adquirir de la cuenca a partir de la observación de ciertos puntos aislados. La Tabla 6 muestra los resultados de forma coloreada (un valor de 1 indica correlación total, y el cero indicaría series estadísticamente independientes). Se observa que en general la cuenca presenta altos coeficientes de correlación entre sus diferentes zonas, dándose la menor correlación en las subcuencas finales (8 y 9) y la subcuenca n°5 (alto Tebicuary Mi).

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9
SC1		0.99	0.96	0.97	0.86	0.87	0.95	0.87	0.86
SC2	0.99		0.95	0.99	0.85	0.86	0.96	0.86	0.86
SC3	0.96	0.95		0.98	0.92	0.93	0.99	0.91	0.91
SC4	0.97	0.99	0.98		0.87	0.89	0.98	0.88	0.89
SC5	0.86	0.85	0.92	0.87		0.93	0.92	0.82	0.82
SC6	0.87	0.86	0.93	0.89	0.93		0.95	0.94	0.93
SC7	0.95	0.96	0.99	0.98	0.92	0.95		0.93	0.93
SC8	0.87	0.86	0.91	0.88	0.82	0.94	0.93		0.99
SC9	0.86	0.86	0.91	0.89	0.82	0.93	0.93	0.99	

Tabla 6. Coeficientes de correlación entre las series a escala diaria.

2.2.2. Resultados para el RCP 4.5

De igual forma, se han obtenido los resultados correspondientes al escenario con cambio climático correspondiente al RCP 4.5. Los percentiles representativos del régimen diario de caudales en cada punto se presentan en la Tabla 7.

RCP 4.5	Q5%	Q10%	Q50%	Q90%
SC-1	14.3	19.3	59.1	153.4
SC-2	18.0	23.9	74.3	188.9
SC-3	11.2	15.3	51.5	133.7
SC-4	33.0	42.8	139.7	352.4
SC-5	10.7	15.4	62.0	164.8
SC-6	18.8	25.7	95.7	236.3
SC-7	61.7	80.4	269.2	667.6
SC-8	78.5	99.1	328.6	771.9
SC-9	88.5	113.6	375.0	871.2

 Tabla 7. Percentiles representativos del régimen de caudales en diversos puntos (m³/s) para el RCP 4.5.

Las variaciones porcentuales con respecto a la situación actual se muestran de forma gráfica en la Figura 9.

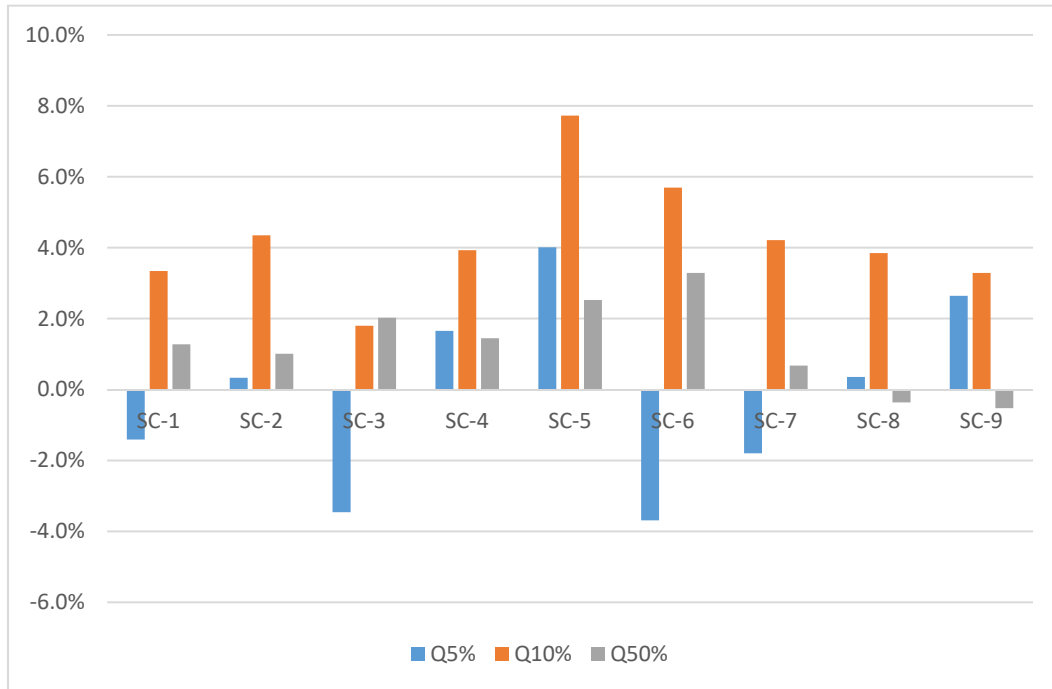


Figura 9. Variaciones porcentuales en tres percentiles representativos del régimen de caudales, para el escenario de cambio climático asociado al RCP 4.5.

Se observa, en primer lugar, que este escenario de cambio climático no conlleva alteraciones significativas en el régimen hidrológico de la cuenca (todas las variaciones son inferiores al 10%). En general, los caudales aumentarán ligeramente en todas las cuencas, si bien los caudales mínimos en estiaje (Q5%) podrán bajar en algunas de ellas.

Los resultados a escala mensual en Villa Florida (Figura 10) aportan algo más de información sobre las variaciones previstas, pero sin cambios sustanciales en la conclusión general.

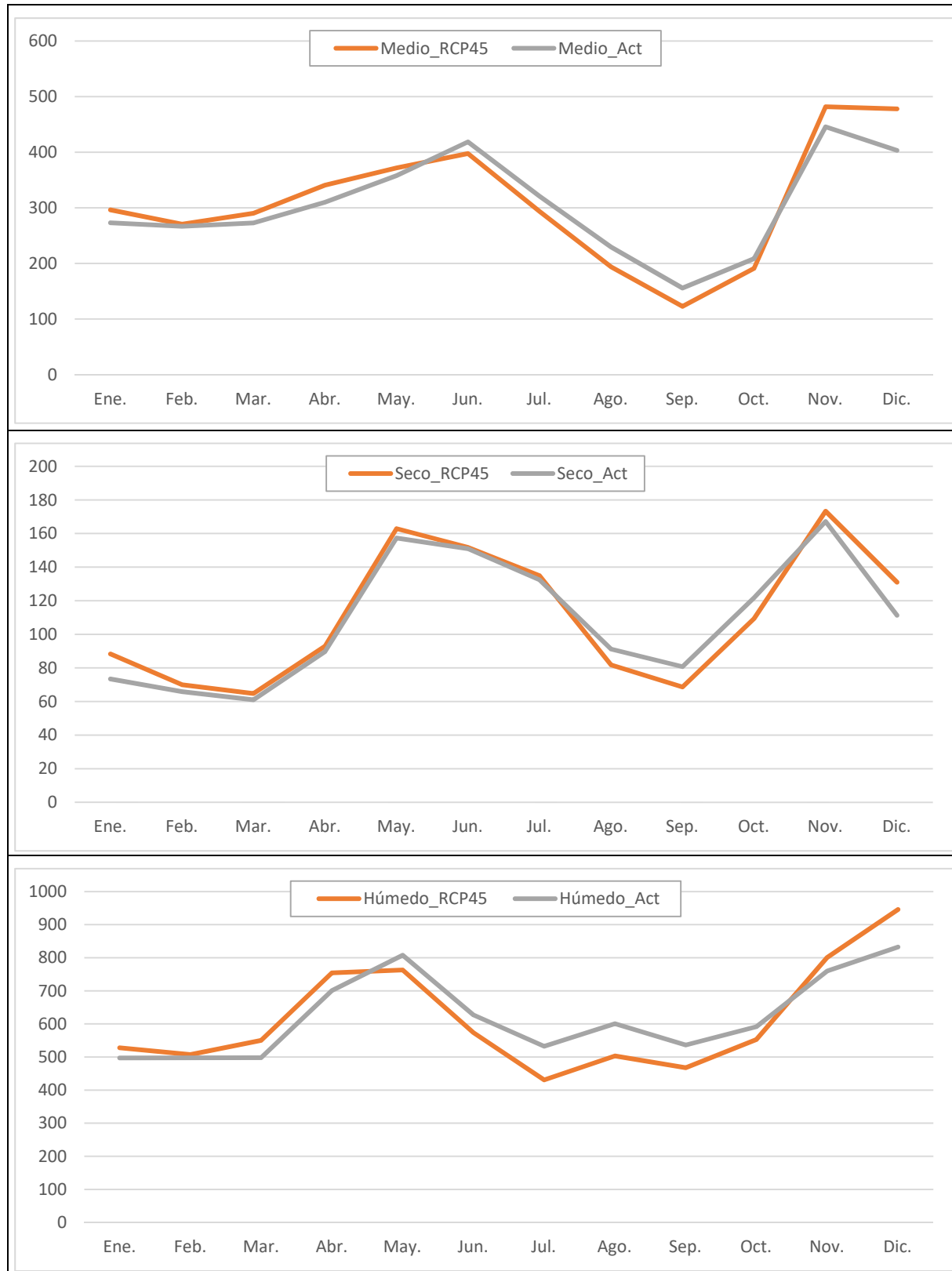


Figura 10. Comparación de los regímenes de caudales entre la situación actual y el del RCP 4.5 para un año medio, seco y húmedo. Escala vertical en m³/s. Nótese las diferencias en los rangos de valores en los ejes Y.

2.2.3. Resultados para el RCP 8.5

Finalmente, se han obtenido los resultados correspondientes al escenario con cambio climático correspondiente al RCP 8.5. Los percentiles representativos del régimen diario de caudales en cada punto se presentan en la Tabla 8.

RCP 8.5	Q5%	Q10%	Q50%	Q90%
SC-1	20.1	30.5	82.8	216.1
SC-2	26.9	38.2	103.4	266.4
SC-3	16.7	24.5	69.6	182.9
SC-4	49.8	70.1	192.0	496.4
SC-5	15.8	23.4	82.3	220.1
SC-6	29.6	41.0	129.3	311.5
SC-7	92.0	134.7	374.4	917.5
SC-8	116.0	166.2	442.6	1055.2
SC-9	131.6	189.3	495.6	1168.9

Tabla 8. Percentiles representativos del régimen de caudales en diversos puntos (m³/s) para el RCP 8.5.

Las variaciones porcentuales con respecto a la situación actual se muestran de forma gráfica en la Figura 11.

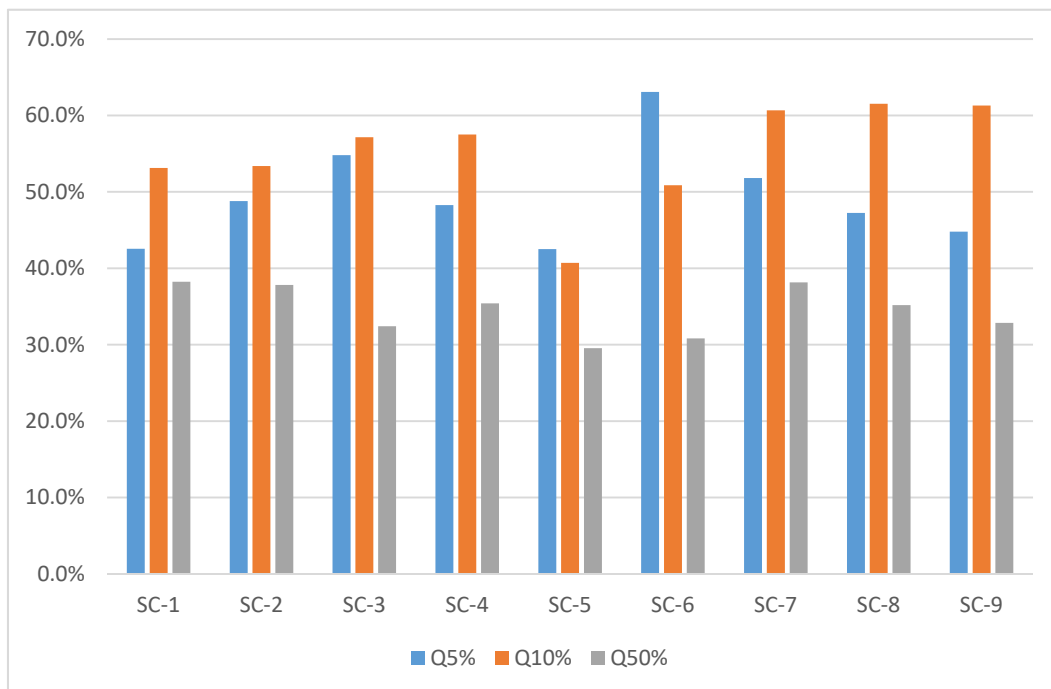


Figura 11. Variaciones porcentuales en tres percentiles representativos del régimen de caudales, para el escenario de cambio climático asociado al RCP 8.5.

A diferencia del escenario anterior más moderado, este escenario augura incrementos muy importantes en el régimen de caudales en todos los tramos de la cuenca, que oscilan del 30 al 60% según el percentil y la zona. Estos aumentos se deben en general a dos causas: por un lado, al aumento de la precipitación bruta; por otro, al aumento del coeficiente de escorrentía debido al descenso del índice de aridez.

Los resultados a escala mensual en Villa Florida (Figura 12) para el RCP 8.5 reflejan la estacionalidad de las variaciones previstas, pero sin cambios sustanciales en la conclusión general.

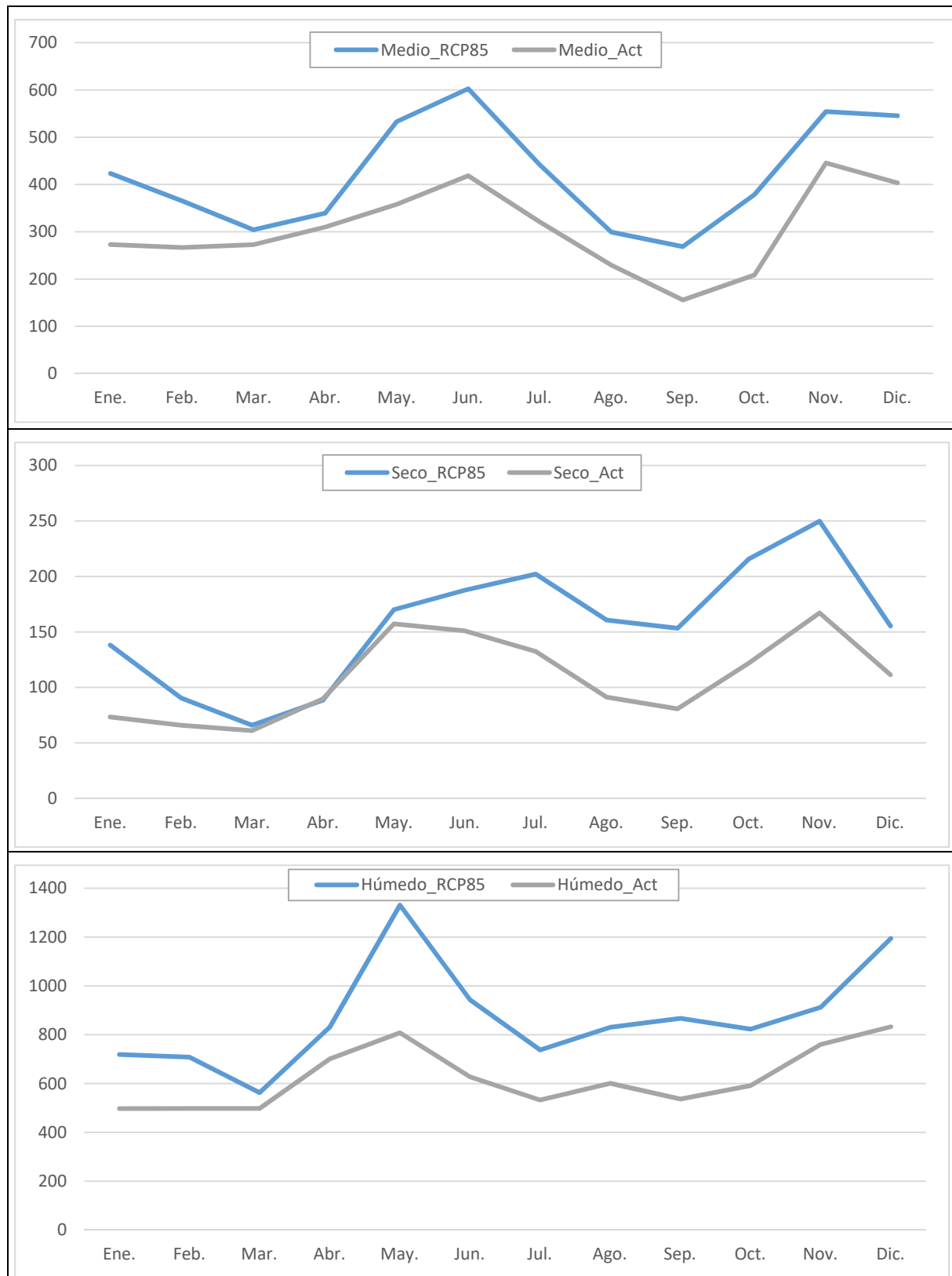


Figura 12. Comparación de los regímenes de caudales entre la situación actual y el del RCP 8.5 para un año medio, seco y húmedo. Escala vertical en m³/s. Nótese las diferencias en los rangos de valores en los ejes Y.

En situación actual, el estiaje más severo en años medios es el de septiembre, pero en años secos, que son los más limitantes, se sitúa en marzo, coincidiendo con el final de la campaña del arroz. El escenario con RCP 8.5 resolvería prácticamente la sequía de septiembre (al menos en términos hidrológicos), aumentando los caudales medios casi siempre durante todos los meses del año, salvo en el mes de marzo, cuando los estiajes severos (correspondientes a años secos) traerían aproximadamente el mismo caudal que en la actualidad.

3. DEFINICIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS

3.1. Caudales ambientales basados en métodos hidrológicos

Los denominados métodos hidrológicos permiten estimar el caudal ambiental asociado a un tramo de río a partir de una serie suficientemente larga (generalmente más de 10 años) de caudales diarios. En este proyecto, se han obtenido por simulación numérica series diarias de 17 años de duración (1998-2014) en nueve puntos representativos de la red fluvial, tanto en situación actual como para dos escenarios de cambio climático.

Se han aplicado cuatro algoritmos para el cálculo de caudales ambientales:

1. Método del caudal básico original (Qbas1)
2. Método del caudal básico con variante (Qbas2)
3. Método de las medias móviles de 21 días (Qmm21)
4. Método de las medias móviles de 21 días (Qmm25)

Finalmente, para condensar la información obtenida, se ha propuesto una combinación lineal de dichos valores para obtener un caudal ambiental ponderado por tramos (Qamb). Los resultados para los tres escenarios considerados se presentan en las Tablas 9 a 11, y gráficamente en las Figuras 13 y 14.

ACTUAL	Qbas1	Qbas2	Qmm21	Qmm25	Q_AMB	Q_AMB/Q_med
SC1	22.8	25.1	20.2	20.8	22.2	28.4%
SC2	27.0	31.8	25.0	25.9	27.4	28.3%
SC3	20.2	21.6	17.3	17.7	19.2	28.7%
SC4	50.1	57.0	47.2	48.6	50.7	28.1%
SC5	24.3	17.7	18.9	19.6	20.1	25.4%
SC6	34.1	26.8	31.7	32.5	31.3	26.5%
SC7	98.8	84.5	93.4	95.8	93.1	27.3%
SC8	133.3	143.7	111.9	115.1	126.0	31.5%
SC9	147.5	162.9	126.8	130.3	141.9	31.5%

Tabla 9. Caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos para la situación actual (m³/s).

3.4. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA PARA LA DEFINICIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO TEBICUARY
MEMORIA

RCP45	Qbas1	Qbas2	qmm21	qmm25	Q_AMB	Q_AMB/Q_med
SC1	24.1	24.3	19.3	19.8	21.9	28.0%
SC2	28.1	28.8	24.2	24.9	26.5	27.4%
SC3	19.8	14.5	16.7	17.1	17.0	25.4%
SC4	52.4	53.9	45.3	46.6	49.6	27.5%
SC5	21.2	14.9	17.3	17.9	17.8	22.5%
SC6	34.8	24.5	28.3	29.0	29.2	24.8%
SC7	98.8	76.7	87.3	89.4	88.0	25.7%
SC8	127.9	137.9	106.2	108.9	120.2	29.9%
SC9	144.4	153.7	119.4	122.5	135.0	29.7%

 Tabla 10. Caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos para el escenario con cambio climático RCP 4.5 (m³/s).

RCP85	Qbas1	Qbas2	qmm21	qmm25	Q_AMB	Q_AMB/Q_med
SC1	32.1	26.5	27.2	28.3	28.5	26.6%
SC2	38.8	29.1	34.3	35.8	34.5	25.9%
SC3	30.2	23.7	22.7	23.7	25.0	27.5%
SC4	75.2	54.0	63.1	65.8	64.5	26.1%
SC5	29.6	26.0	25.0	26.4	26.7	24.5%
SC6	54.7	42.3	43.0	44.4	46.1	28.5%
SC7	152.5	120.2	125.2	130.4	132.1	28.2%
SC8	180.0	143.4	157.6	161.8	160.7	29.3%
SC9	201.8	161.9	175.4	180.7	180.0	29.1%

 Tabla 11. Caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos para el escenario con cambio climático RCP 8.5 (m³/s).

En situación actual, los caudales ecológicos resultantes se sitúan, de manera consistente, entre el 25 y el 32% del caudal medio interanual de los tramos de estudio. El tramo que requiere un menor caudal ambiental, en términos relativos, es la subcuenca n° 5 (alto Tebicuary Mi), mientras que las más demandantes son las subcuencas finales (7, 8 y 9). En el escenario con RCP 4.5 la pauta se mantiene muy similar, con demandas algo menores en los tramos finales (bajan del 32% al 30% del caudal medio, aproximadamente). Para el escenario más extremo con RCP 8.5, los caudales ambientales se reducen una vez más, en términos relativos, si bien en absolutos aumentan notablemente.

En la Figura 13 se puede apreciar que los cuatro métodos aplicados producen resultados dentro del mismo rango, aunque los basados en medias móviles tienden a dar cifras algo más bajas (10-20%). En cuanto a la comparación de las cifras absolutas entre escenarios (Figura 14), se confirma lo ya expresado, con los resultados más favorables para el escenario con RCP 4.5.

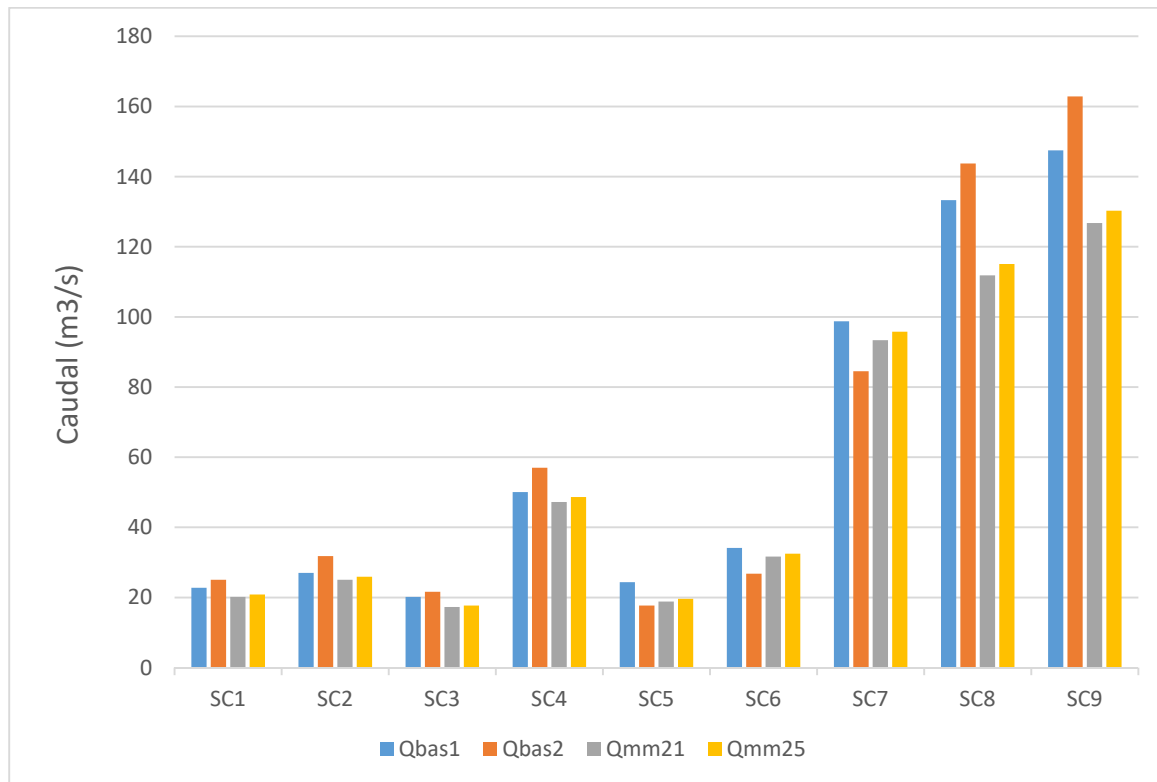


Figura 13. Comparación de los caudales ambientales obtenidos en la situación actual, con los cuatro métodos seleccionados.

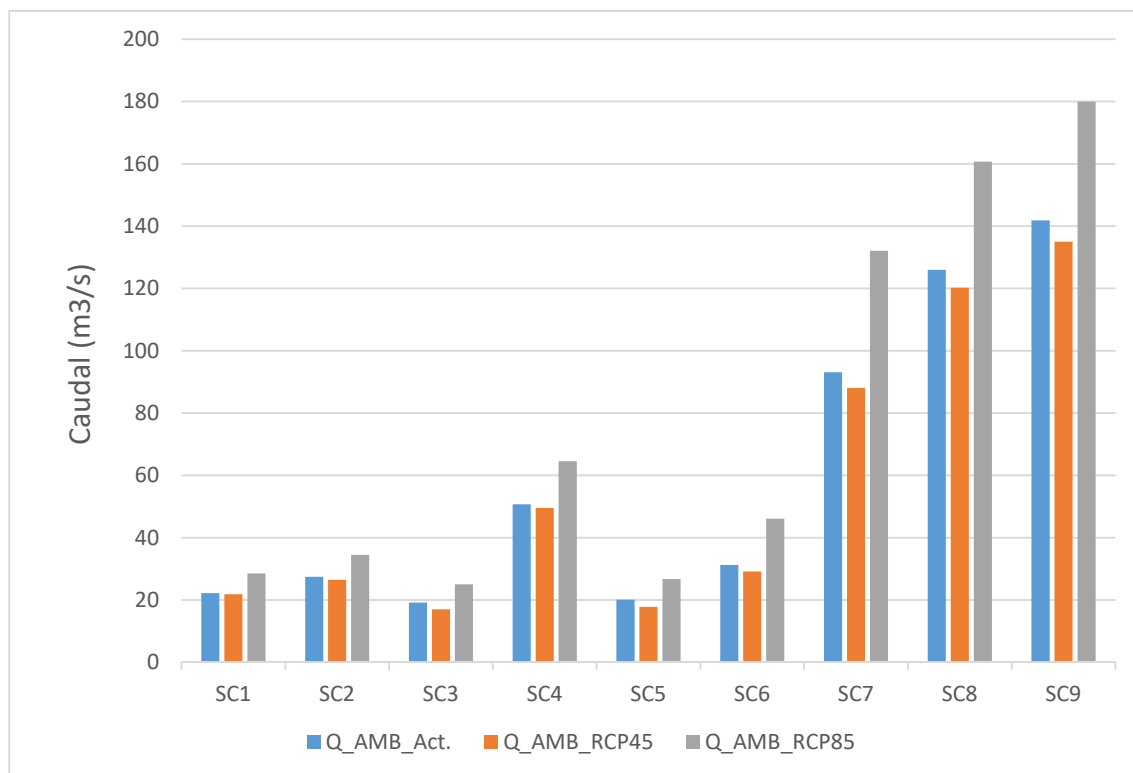


Figura 14. Comparación de caudales ambientales para las diferentes subcuencas, en función del escenario de cálculo.

3.2. Caudales ambientales basados en modelos biológicos

3.2.1. Introducción y objetivos

Para favorecer el buen estado de conservación de una determinada especie piscícola se deben conocer tanto sus necesidades ecológicas, como la respuesta que ésta muestra frente a las distintas afecciones antrópicas a las que se puede ver sometida. Partiendo de este conocimiento previo se puede diseñar un programa de medidas que compatibilice su conservación con el desarrollo económico y social del entorno en el que habita. En este sentido, hay numerosos factores que pueden afectar al desarrollo de la especie, como son la cantidad y calidad del agua, la estructura física del cauce o la disponibilidad de recursos tróficos. Todos estos componentes del hábitat fluvial se ven muy influenciados por diferentes actividades antrópicas, como puede ser el desarrollo de la agricultura (afecciones sobre la vegetación de ribera) o el incremento del volumen de agua detraído para el abastecimiento (disminución de caudales), las cuales limitan la habitabilidad del medio fluvial.

La determinación de un régimen de caudales ecológicos mínimos mediante métodos hidrobiológicos se fundamenta en la estimación de la cantidad de hábitat útil para la especie en función del caudal circulante. La determinación del hábitat útil, como Hábitat Potencial Útil (HPU), se basa en la combinación de dos modelos: (1) un modelo hidráulico, que permite simular las características hidráulicas de un tramo fluvial para un rango de caudales y (2) un modelo biológico, que estima las preferencias de la especie en función de la variación de las características hidráulicas. A partir de la conjunción de las funciones de HPU, junto con la información sobre la distribución de caudales en régimen natural, se obtienen las curvas HPU-Caudal. Estas curvas son la base para el establecimiento de los caudales ecológicos a través del análisis del efecto que los distintos escenarios hidrológicos tienen sobre la habitabilidad del tramo fluvial para las especies que lo habitan.

Por ello, el objetivo del presente estudio es determinar los caudales mínimos necesarios para garantizar unas condiciones hidráulicas adecuadas para la vida piscícola en el río Tebicuary.

3.2.2. Metodología

Tramo de estudio:

En el presente trabajo se ha seleccionado un tramo de estudio del río Tebicuary en Villa Florida donde se han desarrollado modelos de simulación del hábitat para la definición de un régimen de caudales ecológicos mínimos. Concretamente la longitud del tramo de estudio ha sido de 1 km aguas abajo del puente de Villa Florida, con una pendiente hidráulica de 0.05%. La sección empleada se encuentra 500 m aguas abajo del puente (Figuras 15, 16 y 17) en un tramo relativamente recto y con un ancho aproximado de 215 m (Mongelós et al. 2015). Dicha sección ha sido considerada como representativa del tramo de estudio, es decir, desde el puente hasta 1 km aguas abajo.



Figura 15. Situación de la sección medida y el tramo de estudio en el río Tebicuary en Villa Florida. Fuente: Mongelós et al. (2015).

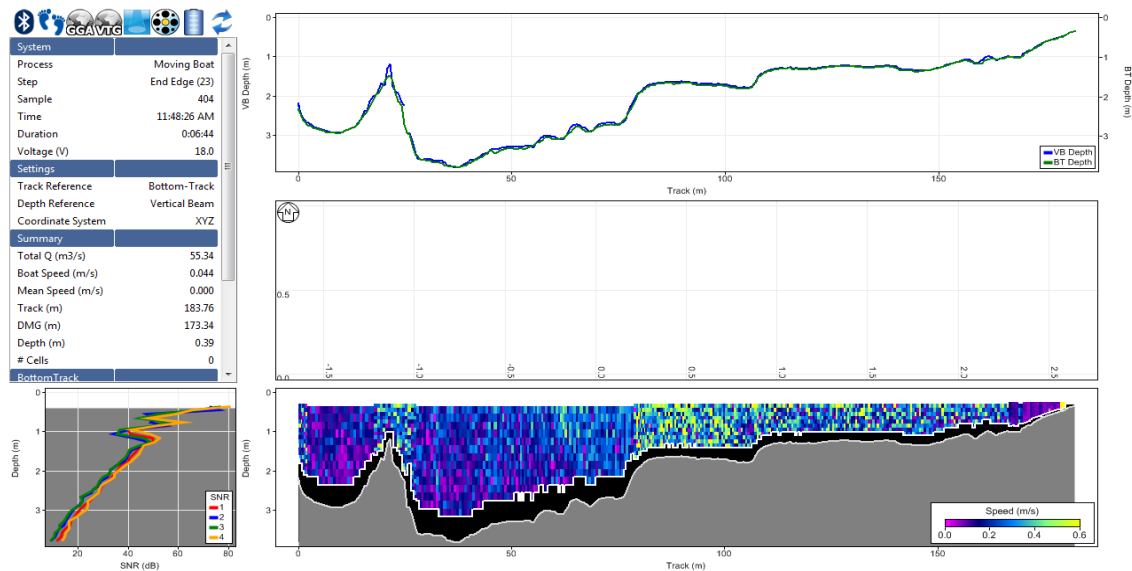


Figura 16. Sección transversal medida con un equipo ADCP SONTEK. Fuente: Mongelós et al. (2015).

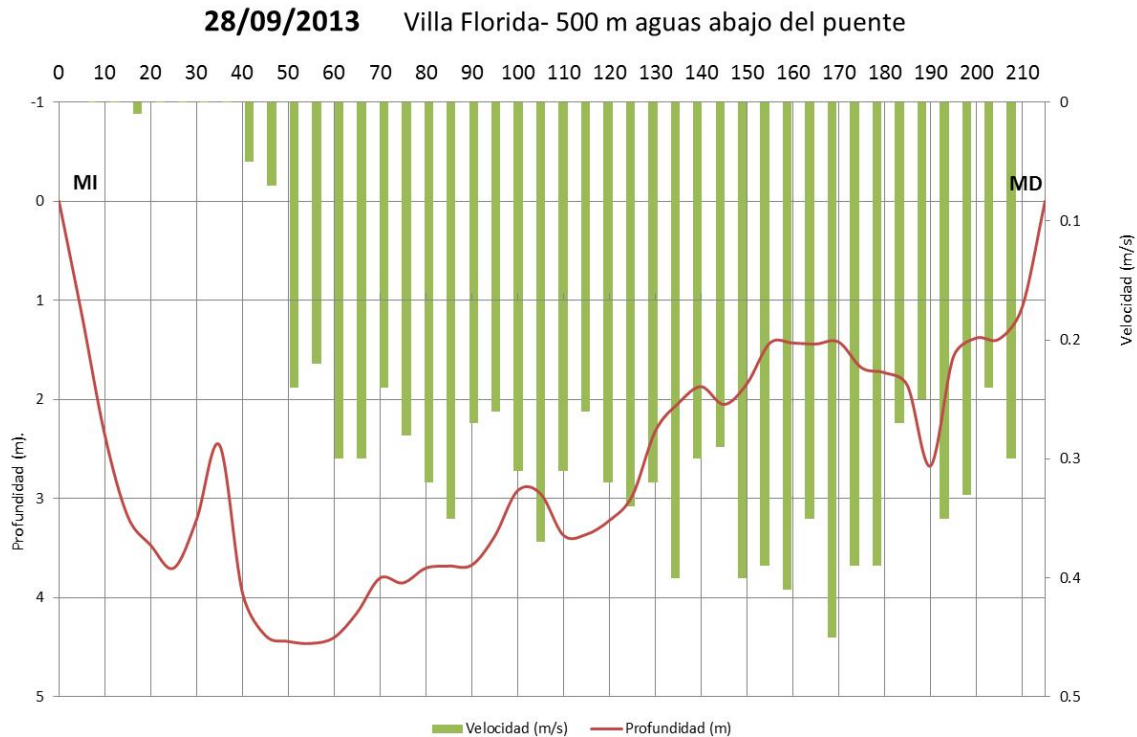


Figura 17. Sección Transversal medida cada 5 m con el equipo QLINER OTT. Fuente: Mongelós et al. (2015).

Finalmente, se ha considerado que la composición del sustrato del tramo de estudio está formada por un 2% de bloques, 2% de cantos, 2% de gravas gruesas, 2% de gravas finas, 80% de arenas, 12% de limos, 0% de vegetación y 0% de roca madre (Tabla 12).

TIPO DE SUSTRATO	DIÁMETRO	COMPOSICIÓN (%)
Vegetación		0
Limos	<0.062 mm	12
Arenas	0.062 a 2 mm	80
Gravas finas	2 a 9 mm	2
Gravas gruesas	9 a 64 mm	2
Cantos	64 a 256 mm	2
Bloques	> 256 mm	2
Roca madre		0

Tabla 12. Clasificación de los tipos de sustrato, rango de diámetro y porcentaje de composición utilizado en la caracterización del lecho del tramo de estudio.

Series de caudal natural:

Una fase fundamental para la estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos es la obtención del régimen natural de caudales. Esta información es necesaria para simular y conocer las condiciones hidráulicas del tramo en el rango de valores de caudal que debería circular por el tramo objetivo de manera natural. Para ello, se ha utilizado la información hidrológica generada en el capítulo 2 del presente estudio (Figura 18), es decir, la serie de caudales naturales y la curva de gasto.

Permanencia de caudales (1974-2002)

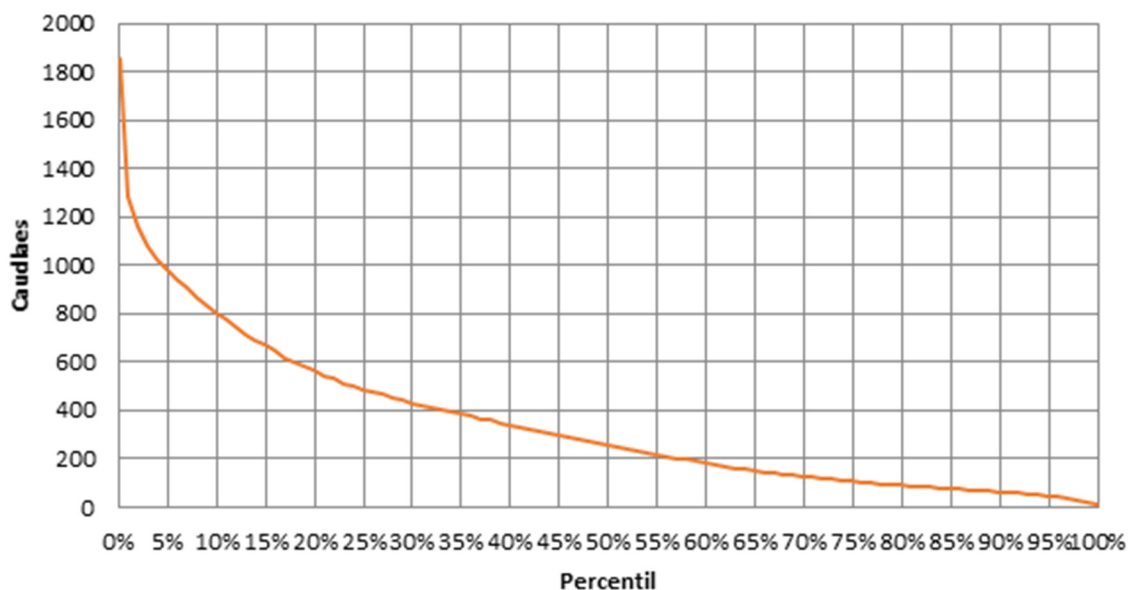


Figura 18. Curva de distribución acumulada de caudales (m³/s) en el río Tebicuary en villa Florida para el periodo comprendido entre 1974 y 2002.

Estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos mediante simulación del hábitat:

La estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos se ha realizado mediante métodos de simulación del hábitat. Este método proporciona una cuantificación de las capacidades potenciales de acogida para la fauna piscícola en función del caudal, a un nivel de estudio de amplitud espacial comprendida entre el meso y el microhábitat. De forma general, este método permite determinar la cantidad de hábitat disponible en un tramo fluvial para diversas especies ante diferentes escenarios de gestión de los recursos hídricos. La simulación del hábitat es un método ampliamente extendido y utilizado en muchos países del mundo, siendo uno de los métodos reconocidos por la actual legislación española en materia de planificación hidrológica (ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica).

Para la determinación del hábitat útil mediante métodos de simulación se combinan dos modelos: un modelo hidráulico, que permite la estimación de los gradientes hidráulicos que se producen dentro de un tramo para un rango de caudales analizados, y un modelo

de carácter biológico, que estima las preferencias de los organismos considerados, a través de la interpretación de las respuestas de las diferentes especies a los gradientes de una serie de parámetros hidráulicos y físicos (velocidad, calado y sustrato). La combinación de los dos modelos permite la cuantificación del Hábitat Potencial Útil, en forma de Hábitat Potencial Útil (HPU), para un rango de caudales. A partir de esta información se pueden determinar los regímenes de caudales necesarios para mantener un nivel de funcionalidad aceptable de acuerdo a criterios que se consideren a priori.

Las fases principales para el cálculo de caudales ecológicos mediante el método de simulación del hábitat son: (1) el desarrollo de un modelo hidráulico, (2) desarrollo o adopción de un modelo biológico para las especies representativas del tramo, (3) obtención del régimen natural de caudales, (4) simulación del hábitat, (5) establecimiento de criterios y (6) cálculo del régimen de caudales ecológicos. Cada una de estas fases y los trabajos desarrollados en el marco de este proyecto se describen brevemente en los siguientes apartados.

Modelo Hidráulico

La aplicación de los métodos de simulación del hábitat requiere en primer lugar el desarrollo y aplicación de un modelo hidráulico en una estación de estudio representativa de un segmento fluvial más amplio. Dadas las características hidromorfológicas del tramo de estudio se ha desarrollado un modelo hidráulico unidimensional. Para ello se ha empleado el programa RHYHABSIM (Jowett, 1989), el cual está diseñado específicamente para el cálculo de caudales ecológicos.

La simulación hidráulica se ha realizado mediante el software RHYHABSIM 5.0 (Jowett 1989), que está basado en los principios del PHABSIM (Bovee 1982), ofreciendo mayores prestaciones. Previamente, se llevó a cabo el procesado de los datos hidráulicos y de los datos topográficos para generar los archivos (*.rhb) con el formato adecuado para su lectura en RHYHABSIM 5.0. Una vez introducidos los datos, el proceso de simulación hidráulica consta de cuatro pasos básicos:

1. **Chequeo de los datos de entrada:** En este primer punto se analiza la calidad de los datos introducidos en el programa y la existencia de posibles errores en la composición del sustrato, la velocidad y el calado.
2. **Calculo del caudal e introducción del caudal de calibración:** El programa calcula el caudal en cada sección a partir de los datos de distancia, profundidad y velocidad obtenidos en campo. Se analiza la coherencia entre los caudales medidos y, a partir de éstos, se calcula el caudal de calibración, que es el dato en el que se basan los procesos de cálculo de los factores de distribución de caudales medios, el calibrado de las curvas de gasto y del perfil longitudinal de la lámina de agua. Normalmente, este caudal de calibración se estima como la media de los caudales medidos en la sección estudiada.
3. **Definición de las curvas de gasto:** Las curvas de gasto son la base del modelo hidráulico que se utilizan para predecir el nivel de la lámina de agua con caudales diferentes de los medidos. RHYHABSIM ajusta las curvas de gasto a partir de los

datos de altura de lámina de agua y caudal medidos en las campañas de campo. Este cálculo se puede hacer mediante diferentes métodos que ofrece el software, siendo el método empleado el ajuste a través de mínimos cuadrados.

4. **Cálculo y edición de los factores de distribución de la velocidad:** El factor de distribución de velocidad se calcula para cada celda, es decir, cada una de las divisiones del transecto, a partir de la velocidad media en el transecto y la velocidad en esa celda. Cuando se simulan otros caudales distintos a los medidos en las campañas de campo, las velocidades en cada celda se calculan aplicando estos factores de corrección. No obstante, este factor de corrección es independiente del caudal simulado, es decir, se mantiene constante.

Una vez calibrado el modelo, es posible conocer para cada celda los valores de velocidad y profundidad que se generan con distintos valores de caudal. Posteriormente, los patrones de condiciones hidráulicas asociados al rango de caudales objetivo se cruzarán con el modelo biológico (curvas de preferencia) lo que nos permitirá conocer como varía la habitabilidad del tramo dentro de ese rango de caudales.

Modelo Biológico

El análisis de la habitabilidad fluvial y el posterior cálculo de caudales ecológicos requiere el desarrollo de un modelo biológico para la/s especie/s piscícola/s y estadio/s representativa/s del tramo fluvial. Los modelos biológicos se representan mediante curvas de preferencia. Las curvas de preferencia son funciones univariantes que expresan la idoneidad para una especie o estadio de un rango de valores de una determinada variable hidráulica (velocidad, profundidad y sustrato). Las curvas de preferencia toman valores entre 0 (no útil) y 1 (útil).

En este caso no se dispone de curvas de preferencia de especies específicas para el río Tebicuary, el desarrollo de las mismas supondría la realización de diversos estudios para la obtención de nuevos datos que exceden los alcances del presente proyecto. Se ha optado por emplear curvas de preferencia desarrolladas en otros estudios específicos, concretamente se han utilizado las curvas desarrolladas por Costa et al. (2013) para dos especies nativas del Tebicuary: *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos) y *Oligosarcus hepsetus* (dientudo) así como dos especies nativas y comerciales del Tebicuary: *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) para la profundidad (Figura 19), velocidad (Figura 20) y sustrato (Figura 21).

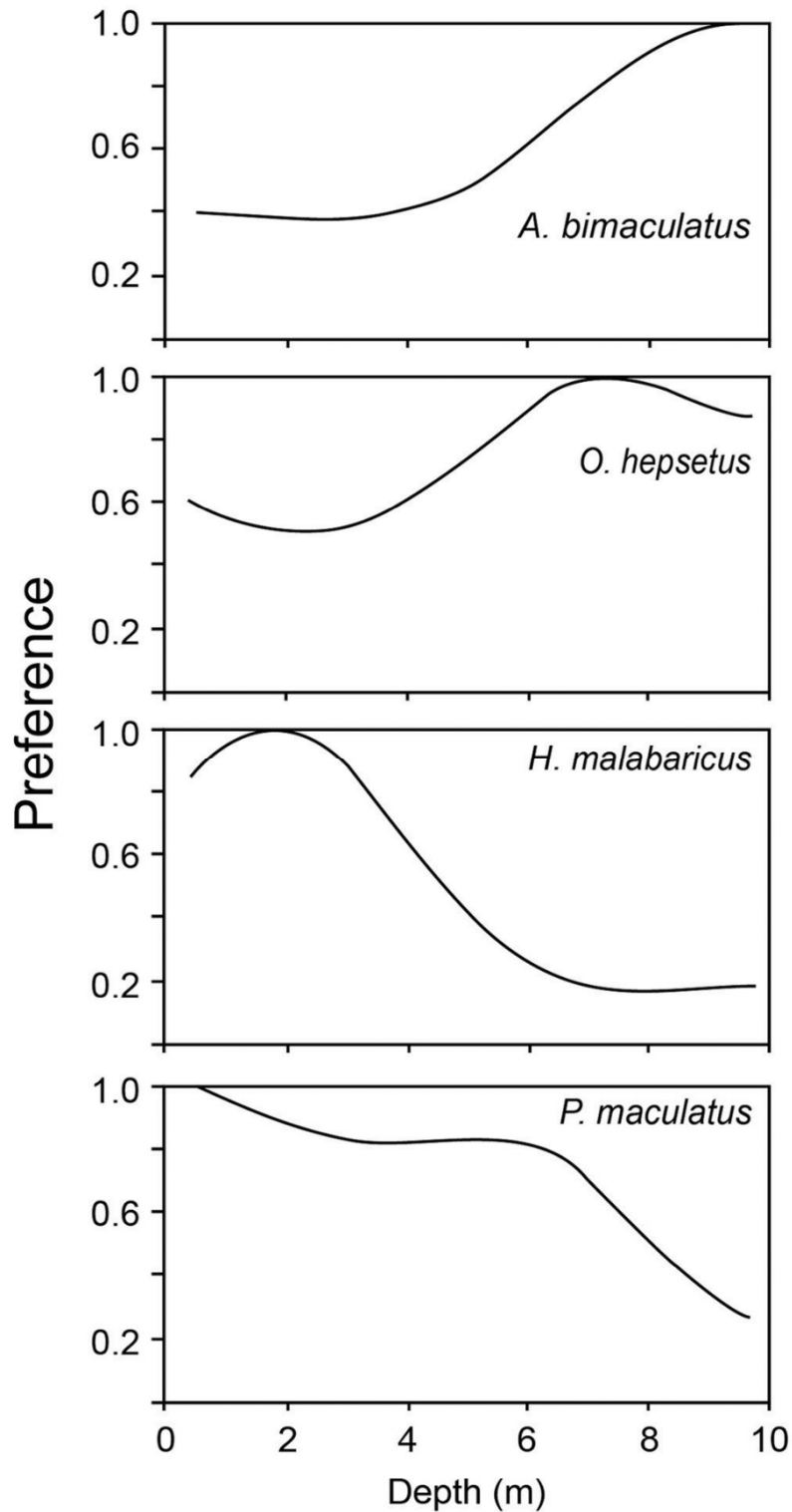


Figura 19. Curvas de preferencia de profundidad para *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos), *Oligosarcus hepsetus* (dientudo), *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) elaboradas por Costa et al. (2013).

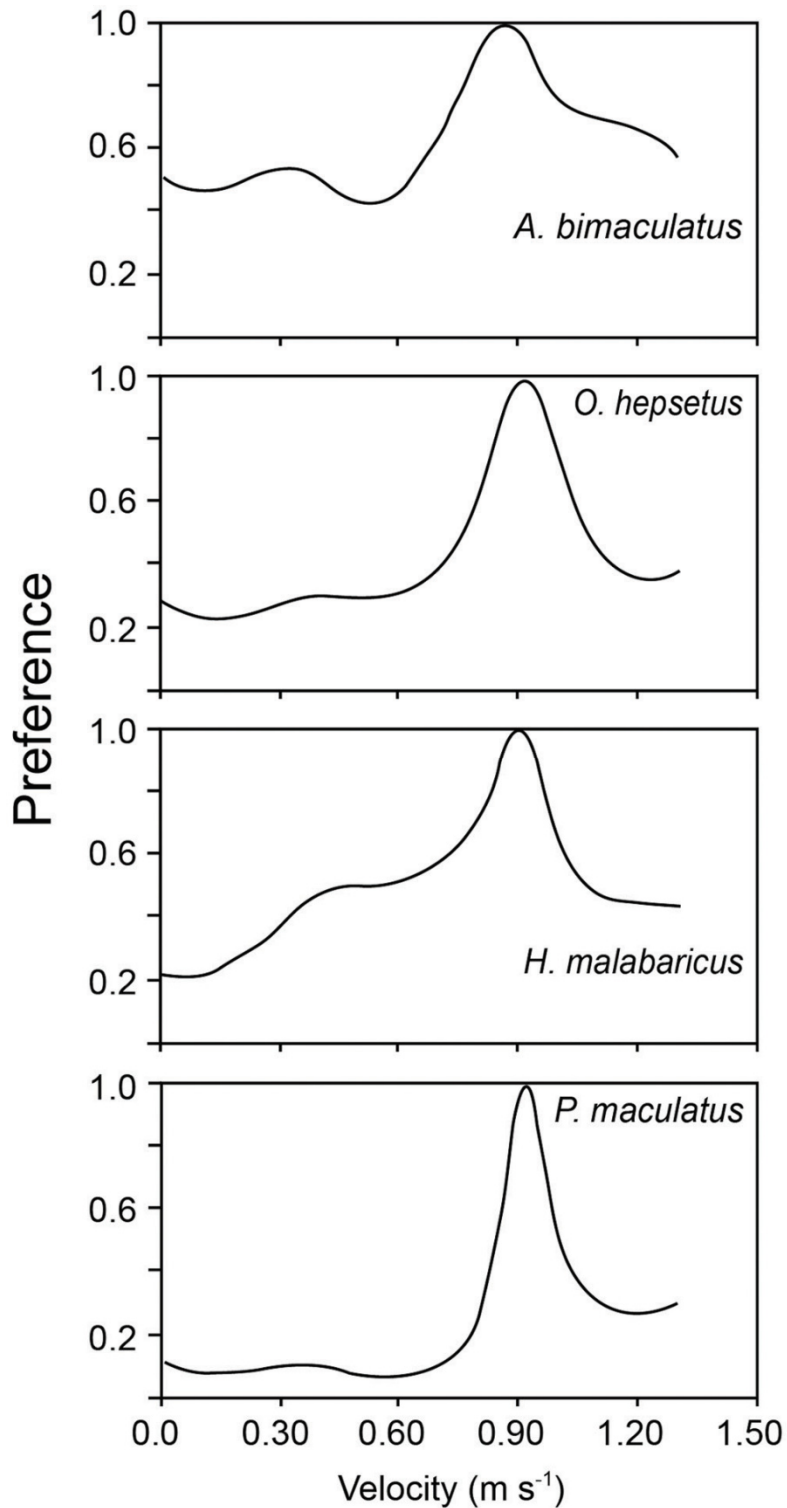


Figura 20. Curvas de preferencia de velocidad para *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos), *Oligosarcus hepsetus* (dientudo), *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) elaboradas por Costa et al. (2013).

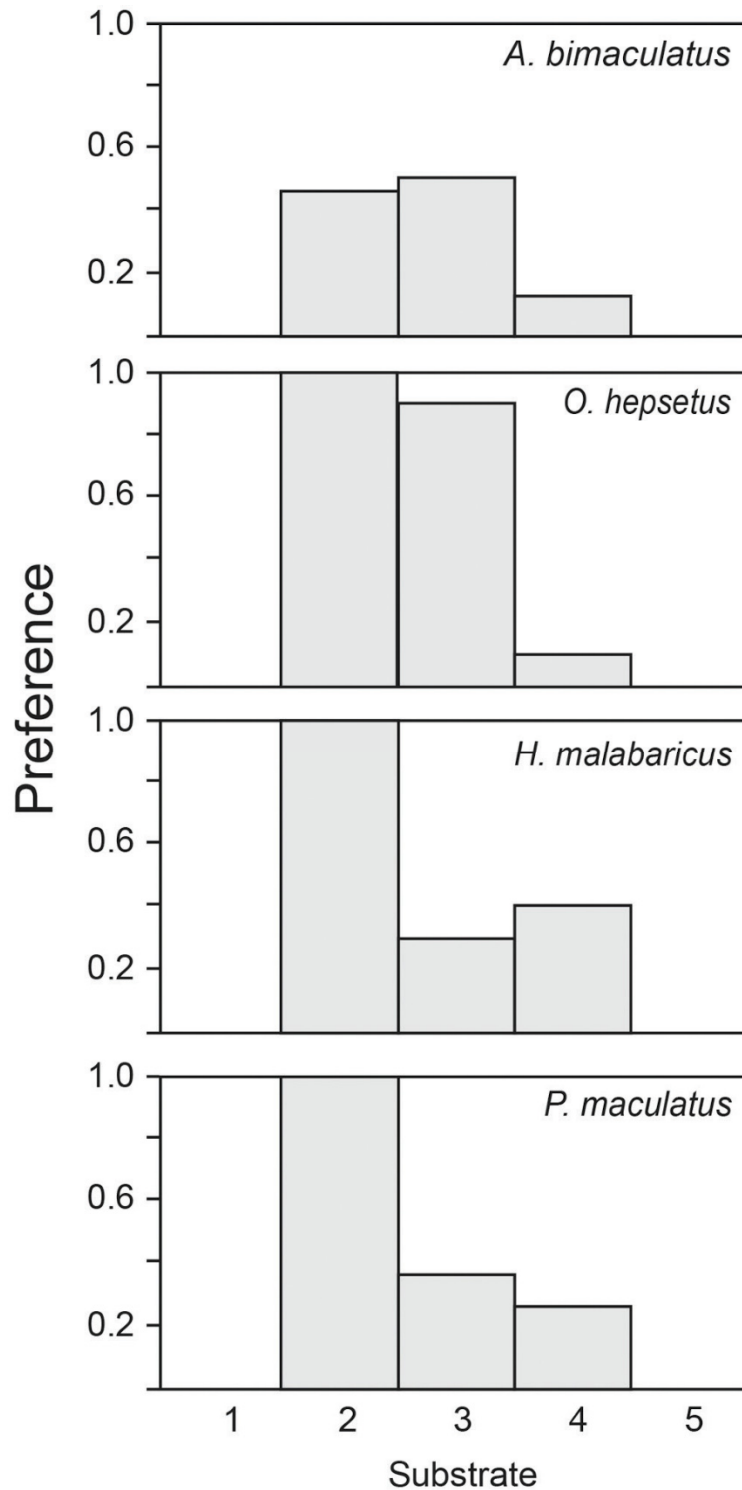


Figura 21. Curvas de preferencia de sustrato para *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos), *Oligosarcus hepsetus* (dientudo), *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) elaboradas por Costa et al. (2013). (1, clay; 2, mud; 3, sand; 4, boulder/cobble/gravel; 5, bedrock).

Modelo de hábitat

A partir de la combinación del modelo hidráulico, las curvas de preferencia y los caudales naturales, se procedió al cálculo del Hábitat Potencial Útil (HPU). El HPU nos informa sobre la cantidad de hábitat utilizable por cada especie/estadio en función del caudal circulante. Dicho hábitat, en este estudio, se obtiene como el valor ponderado de hábitat total dividida por la longitud del tramo de río. Por lo tanto, sus unidades son m²/m.

Por otro lado, la HPU no se trató en términos absolutos, sino que se utilizó la relación HPU/HPU_{max}, donde la HPU_{max} representa la HPU máxima que puede albergar ese tramo en condiciones de caudal natural. Por lo tanto, la relación HPU-Caudal se proporciona en términos relativos atendiendo al porcentaje de HPU que se genera con cada caudal respecto al HPU_{max}. El uso del porcentaje de HPU_{max} en lugar de los valores de HPU absolutos permiten, por un lado, equiparar la habitabilidad de las diferentes especies a un rango de valores homogéneo entre si y, por otro, seleccionar el caudal ecológico mínimo necesario para mantener una proporción de hábitat adecuado.

Establecimiento de criterios y cálculo del régimen de caudales ecológicos

El establecimiento de un régimen de caudales ecológicos mínimo requiere que se establezcan unos criterios de selección o umbrales sobre las curvas HPU_{max}-Caudal. En el presente proyecto, los regímenes de caudales ecológicos se han establecido con base a unos umbrales de HPU comprendidos entre el rango 50-80% del HPU_{max}. Es decir, el caudal ecológico mínimo es aquel que permite mantener un HPU igual o superior al 50-80% respecto al HPU_{max} del tramo en condiciones de caudal natural. El objetivo de presentar un rango de caudales ecológicos no es otro que facilitar la posterior toma de decisiones en el proceso de implantación del régimen de caudales ecológicos, en el que han de tenerse en cuenta todos los usuarios del agua. El cálculo de ese rango nos permite conocer de manera objetiva las consecuencias, en términos de habitabilidad, de reducir el caudal circulante.

El establecimiento de un verdadero régimen de caudales requiere asumir la variabilidad temporal natural. Debido a ello, el cálculo de los modelos de hábitat se ha establecido en el rango de caudales entre el caudal nulo y el caudal medio calculado para el río Tebicuary en Villa Florida a partir de las series de caudal natural. Finalmente, a partir de las curvas obtenidas, se han calculado los caudales necesarios para cumplir con los umbrales establecidos.

Por último, cabe mencionar que los requerimientos de caudal para cumplir con los criterios establecidos, varían de una especie a otra. Por tanto, el caudal ecológico mínimo se ha propuesto en función del estadio más exigente, es decir, aquel que necesita el caudal más alto para mantener una habitabilidad dentro del rango 50-80% del HPU_{max}.

3.2.3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del modelo hidráulico, de simulación de hábitat, es decir, las curvas HPU-Caudal, tomando en todos los casos el HPU_{max} como referencia y, finalmente, se presentan los regímenes de caudales ecológicos calculados de acuerdo a los dos umbrales de pérdida de hábitat establecidos.

El caudal observado durante la campaña de campo (Mongelós et al., 2015) fue $55.34 \text{ m}^3/\text{s}$, en la que la anchura media fue 215 m y la profundidad media 2.17 m (Figura 22A). En la Figura 22B/C se muestran los patrones de profundidad y velocidad modelados mediante Rhyhabsim en las condiciones de caudal observadas por Mongelós et al. (2015), respectivamente.

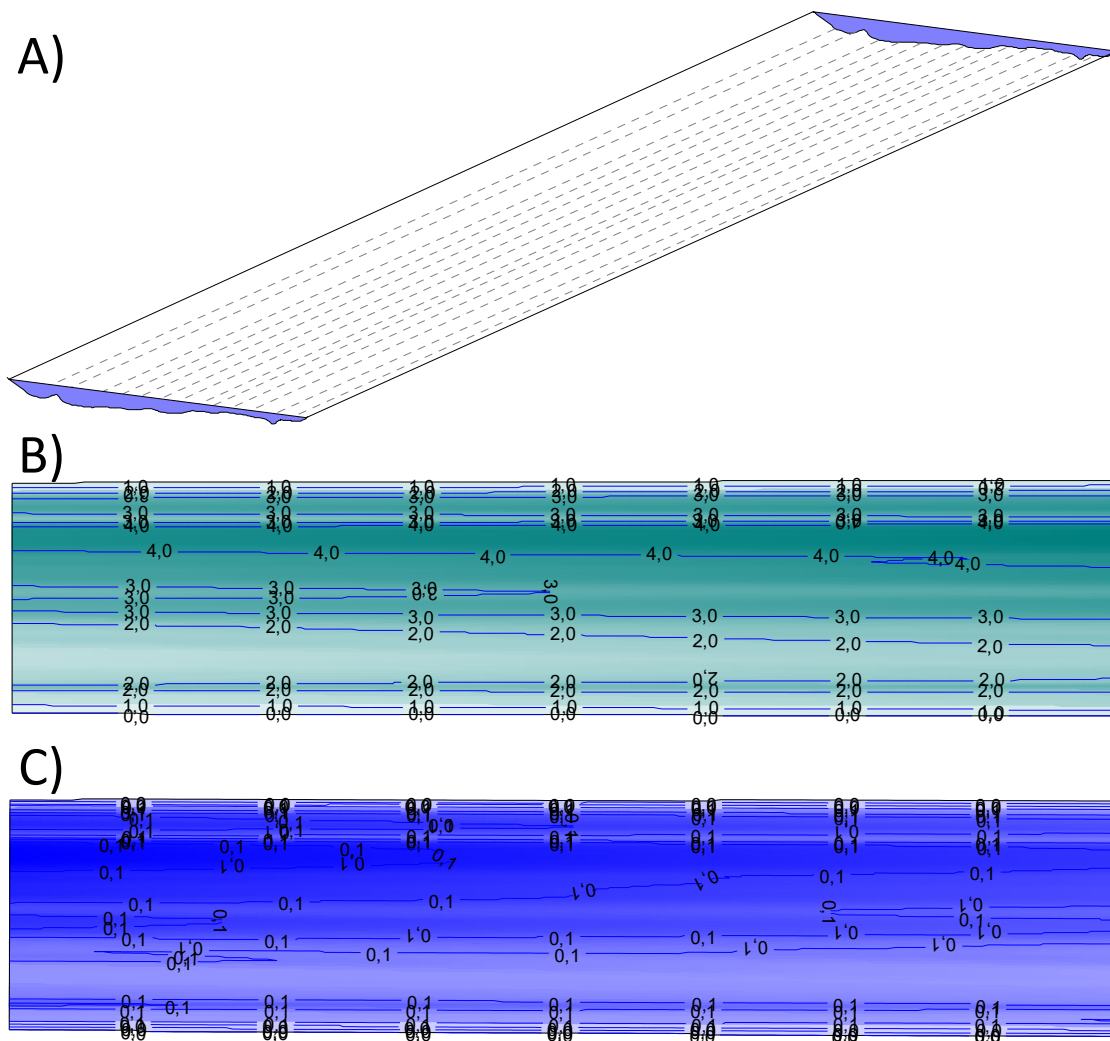


Figura 22. A) Vista isométrica del tramo de estudio del río Tebicuary en Villa Florida mediante Rhyhabsim en las condiciones de caudal observadas durante la campaña de campo (Mongelós et al., 2015). B) Profundidad con $Q=55.34 \text{ m}^3/\text{s}$. C) Velocidad con $Q=55.34 \text{ m}^3/\text{s}$.

Atendiendo a los resultados de este estudio, el caudal medio del río Tebicuary en Villa Florida para el periodo comprendido entre 1974 y 2002 ha sido $359.76 \text{ m}^3/\text{s}$. Por tanto, para realizar la simulación de hábitat se han llevado a cabo diferentes simulaciones con caudales desde 0 hasta $360 \text{ m}^3/\text{s}$ en intervalos de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 23 se presenta la

variación del HPU respecto al HPU_{max} de *P. maculatus* (azul), *H. malabaricus* (verde), *O. hepsetus* (marrón) y *A. bimaculatus* (morado) para los caudales comprendidos entre 0 y 360 m^3/s .

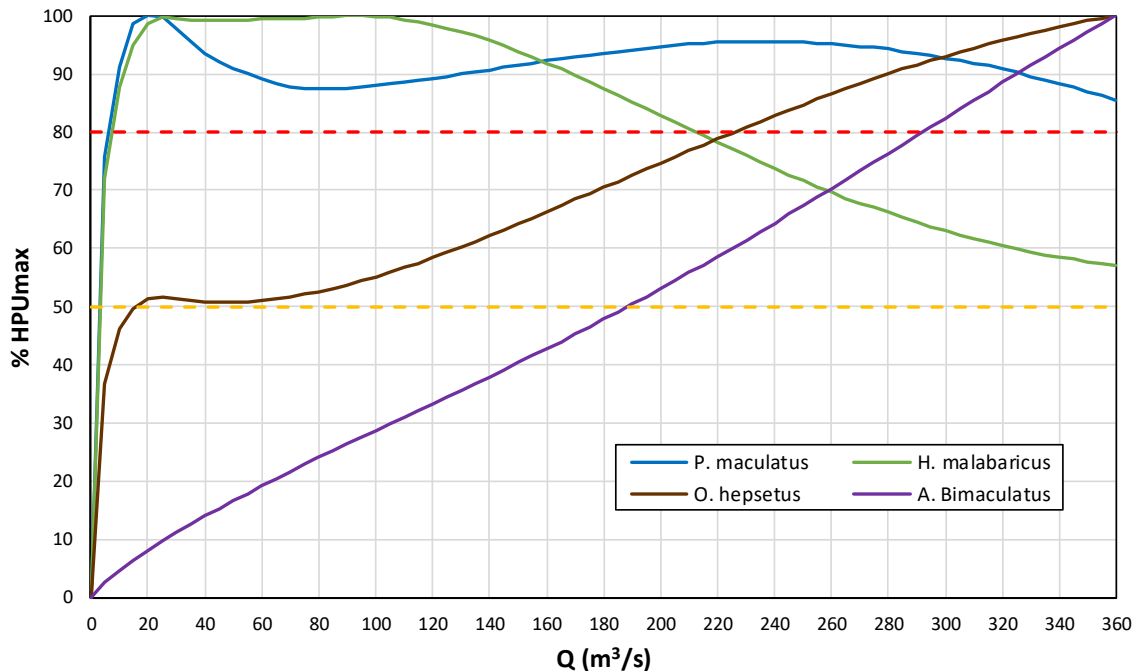


Figura 23. Variación del HPU respecto al HPU_{max} de *P. maculatus* o bagre amarillo (azul), *H. malabaricus* o tararira (verde), *O. hepsetus* o dientado (marrón) y *A. bimaculatus* o sardina de dos puntos (morado) para los caudales comprendidos entre 0 y 360 m^3/s . Las líneas horizontales representan los umbrales propuestos para la selección de los caudales ecológicos: 80% HPU_{max} (rojo) y 50% HPU_{max} (naranja).

En la curva obtenida para *P. maculatus* o bagre amarillo (azul) y *H. malabaricus* o tararira (verde), el HPU_{max} se ha alcanzado con caudales relativamente bajos y a partir de ahí la habitabilidad se mantiene constante o incluso disminuye, debido principalmente al aumento de la velocidad del agua más allá del óptimo considerado para estas especies (Figura 23). En el caso del *O. hepsetus* o dientado (marrón), se observa que, aunque la curva es creciente desde el caudal nulo hasta el caudal máximo simulado, existe un claro punto de inflexión con caudales en torno a 20 m^3/s , coincidiendo prácticamente con el umbral del 50% del HPU_{max} . A partir de este valor, el aumento de HPU con el caudal adquiere una pendiente menos acusada. Por último, para *A. bimaculatus* o sardina de dos puntos (morado), se observa como la curva presenta una pendiente más constante en todo el rango de caudales simulados. Esta curva no presenta máximos y los puntos de inflexión no son tan acusados, es decir, un aumento del caudal se ve traducido en un aumento constante del hábitat para esta especie.

Teniendo en cuenta los criterios establecidos para determinar el régimen de caudales, el caudal ecológico necesario para cumplir el umbral del 50% y el 80% del HPU_{max} en el caso del *P. maculatus* (azul) y *H. malabaricus* (verde) ha sido de 5 y 10 m^3/s , lo que supone un

1.4% y 2.8% del caudal medio natural, respectivamente (Tabla 13; Figura 23). En el caso de *O. hepsetus* (marrón), el caudal ecológico necesario para cumplir el umbral del 50% y el 80% del HPU_{max} ha sido de 20 y 230 m³/s, lo que supone un 5.6% y 63.9% del caudal medio natural, respectivamente (Tabla 13; Figura 23). Por último, el caudal ecológico necesario para cumplir el umbral del 50% y el 80% del HPU_{max} en el caso del *A. bimaculatus* (morado) ha sido de 190 y 295 m³/s, lo que supone un 52.8% y 81.9% del caudal medio natural, respectivamente (Tabla 13; Figura 23).

	Nombre común	Caudal Natural	Caudal Ecológico (50%)	Porcentaje Natural	Caudal Ecológico (80%)	Porcentaje Natural
<i>P. maculatus</i>	Bagre amarillo	360	5.0	1.4%	10.0	2.8%
<i>H. malabaricus</i>	Tararira		5.0	1.4%	10.0	2.8%
<i>O. hepsetus</i>	Dientudo		20.0	5.6%	230.0	63.9%
<i>A. bimaculatus</i>	Sardina de dos puntos		190.0	52.8%	295.0	81.9%

Tabla 13. Regímenes de caudales ecológicos correspondientes al tramo de estudio del río Tebicuary en Villa Florida. La tabla incluye los caudales ecológicos calculados para distintas especies y de acuerdo a los dos umbrales propuestos, así como el porcentaje que los caudales ecológicos suponen respecto al caudal medio natural del periodo comprendido entre 1974 y 2002. Todos los datos de caudal en m³/s.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que las dos especies nativas del Tebicuary (*Astyanax bimaculatus* y *Oligosarcus hepsetus*) son las más restrictivas en cuanto a requerimientos de caudales ecológicos que las dos especies nativas y comerciales del Tebicuary (*Hoplias malabaricus* y *Pimelodus maculatus*).

3.2.4. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes del presente estudio:

- Las curvas HPU-Caudal han presentado puntos de inflexión claros a partir de los cuales el aumento del HPU con el caudal presenta una pendiente relativamente reducida (*Oligosarcus hepsetus*), nula (*Pimelodus maculatus*) o incluso decreciente (*Hoplias malabaricus*). En estos casos, el hábitat no sería un factor tan limitante ya que los caudales ecológicos representan porcentajes reducidos respecto al caudal en régimen natural.
- En contraste, para la especie *Astyanax bimaculatus*, se observa que el HPU aumenta con pendientes prácticamente constantes en todo el rango de caudales modelados ya que un aumento de caudal lleva asociado un aumento de la profundidad hasta valores óptimos o próximos al óptimo de acuerdo con las curvas de preferencia. Paralelamente, las velocidades no aumentan por encima de valores que disminuyan

la habitabilidad significativamente. Por tanto, el caudal va a ser un factor muy limitante para mantener la condición física del hábitat por lo que una reducción del mismo tiene consecuencias importantes para la habitabilidad. Debido a ello, los caudales ecológicos calculados suponen porcentajes relativamente elevados respecto al caudal medio, siendo superiores al 52%.

3.3. Síntesis y propuesta de caudales ecológicos en la cuenca

En el presente documento se ha obtenido el régimen de caudales ecológicos en la cuenca del río Tebicuary por diferentes métodos: hidrológicos y biológicos.

En cuanto a los métodos hidrológicos se han aplicado cuatro algoritmos de caudales ambientales (método del caudal básico original (Qbas1), método del caudal básico con variante (Qbas2), método de las medias móviles de 21 días (Qmm21) y método de las medias móviles de 21 días (Qmm25) y a partir de los resultados de cada uno de ellos se ha propuesto una combinación lineal de dichos valores para obtener un caudal ambiental ponderado por tramos (Qamb). Este caudal ambiental se ha obtenido para cada una de las 9 subcuencas en que se ha dividido la cuenca del río Tebicuary para los tres escenarios de cálculo (situación actual y dos escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5).

En cuanto a los métodos biológicos el régimen de caudales ecológicos se ha obtenido mediante la aplicación de métodos de simulación de hábitat utilizando para las modelizaciones hidráulicas el software RHYHABSIM (Jowett, 1989) en un tramo de 1 km de longitud aguas abajo del puente de Villa Florida. En este caso no se dispone de curvas de preferencia de especies específicas para el río Tebicuary, el desarrollo de las mismas supondría la realización de diversos estudios para la obtención de nuevos datos que exceden los alcances del presente proyecto. Se ha optado por emplear curvas de preferencia desarrolladas en otros estudios específicos, concretamente se han utilizado las curvas desarrolladas por Costa et al. (2013) para dos especies nativas del Tebicuary: *Astyanax bimaculatus* (sardina de dos puntos) y *Oligosarcus hepsetus* (dientudo) así como dos especies nativas y comerciales del Tebicuary: *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo).

A modo de resumen de los resultados obtenidos y para facilitar la comparación de los diferentes métodos, en la Tabla 14 se presentan los caudales ecológicos obtenidos para la situación actual en Villa Florida (subcuenca SC-7).

		Caudal ecológico	Porcentaje natural
Métodos hidrológicos	Qbas1	98.8	28.9%
	Qbas2	84.5	24.8%
	Qmm21	93.4	27.4%
	Qmm25	95.8	28.1%
	Q_AMB	93.1	27.3%
Métodos biológicos	<i>P. maculatus</i> (Bagre amarillo)	10.0	2.8%
	<i>H. malabaricus</i> (Tararira)	10.0	2.8%
	<i>O. hepsetus</i> (Dientudo)	230.0	63.9%
	<i>A. bimaculatus</i> (Sardina de dos puntos)	295.0	81.9%

Tabla 14. Comparación de los caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos y biológicos en Villa Florida para la situación actual (m³/s).

Como resultado de los métodos hidrológicos se puede apreciar que los cuatro métodos aplicados producen resultados dentro del mismo rango, aunque los basados en medias móviles tienden a dar cifras algo más bajas (10-20%).

En cuanto a los resultados obtenidos por métodos biológicos para las cuatro especies disponibles, se observa que para las especies nativas del Tebicuary (Dientudo y sardina de dos puntos) el requerimiento de caudales es muy superior al obtenido para las especies comerciales (Bagre amarillo y tararira) y por encima del doble de los obtenidos por métodos hidrológicos. Esta divergencia confirma las hipótesis iniciales acerca de la aplicabilidad de este tipo de métodos sin disponer de curvas de preferencia ajustadas a las características de cada especie para el tramo de la cuenca objeto de estudio, como se puede ver en estos resultados, el empleo de curvas de preferencia de las mismas especies pero obtenidas en otros ríos parece que no representa adecuadamente el comportamiento de las mismas en el río Tebicuary.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Bovee, K.D., 1982. A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Instream flow Information Paper No. 12, FWS/OBS-82/26. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C.
- Costa, M.R., Mattos, T.M., Borges, J.L., Araújo, F.G., 2013. Habitat preferences of common native fishes in a tropical river in Southeastern Brazil. *Neotropical Ichthyology*, 11(4):871-880.
- Jowett, I.G., 1989. River hydraulic and habitat simulation, RHYHABSIM computer manual. New Zealand Fisheries Miscellaneous Report 49. Ministry of Agriculture and Fisheries, Christchurch, New Zealand.
- Mongelós, S., Wehrle, A., Ferrira, F., Idoyaga, R., Caballero, G., Céspedes, J., Fariña, D., 2015. Conservación del caudal ambiental en la cuenca del río Tobicuary. IV Congreso Paraguayo de Recursos Hídricos, Asunción, Paraguay.

APÉNDICE 3

REGÍMENES DE CAUDALES POR SUBCUENCAS

1. RÉGIMEN DE CAUDALES POR SUBCUENCAS



Figura 1. Subcuencas consideradas para el modelado de la cuenca del Tebicuary.

SUBCUENCA	NOMBRE EXTENSO-DESCRIPCIÓN
SC-1	Alto Tebicuary I (hasta Yuty aprox.)
SC-2	Alto Tebicuary II (hasta confluencia del Pirapó)
SC-3	Cuenca del Pirapó
SC-4	Medio Tebicuary I
SC-5	Alto Tebicuary Mi (hasta Iturbe aprox.)
SC-6	Bajo Tebicuary Mi
SC-7	Medio Tebicuary II (hasta Villa Florida)
SC-8	Bajo Tebicuary I
SC-9	Bajo Tebicuary II

Tabla 1. Hidrotoponimia utilizada en cada subcuenca.

1.1. Subcuenca 1

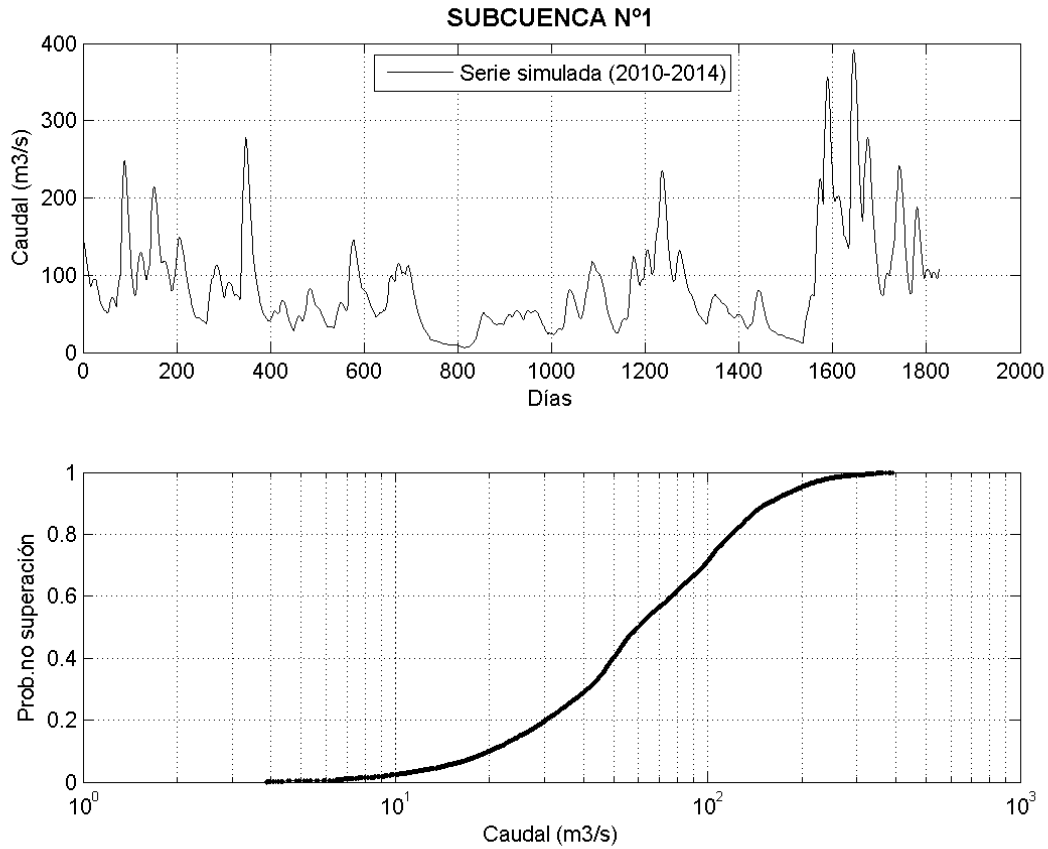


Figura 2. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-1.

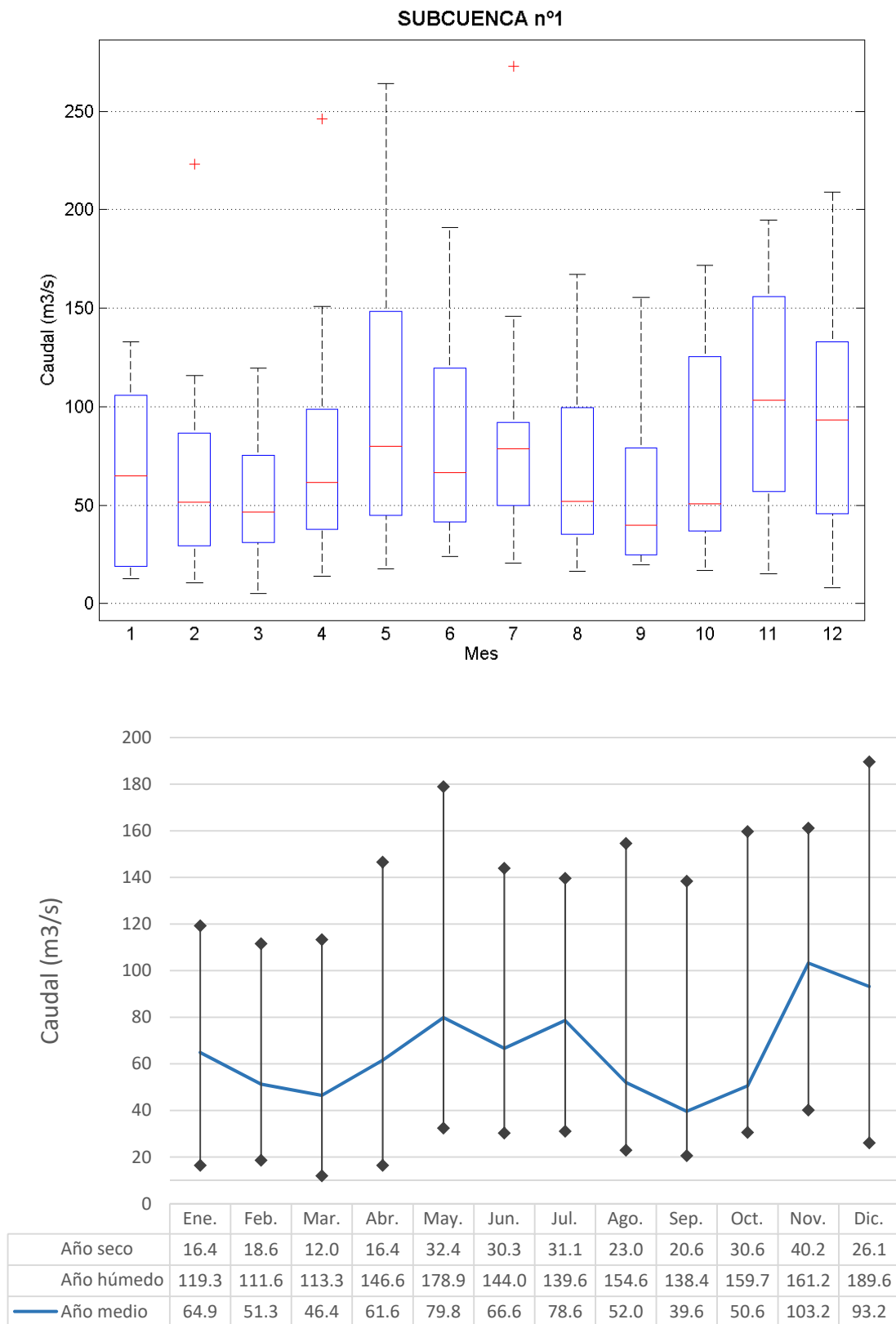


Figura 3. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-1.

1.2. Subcuenca 2

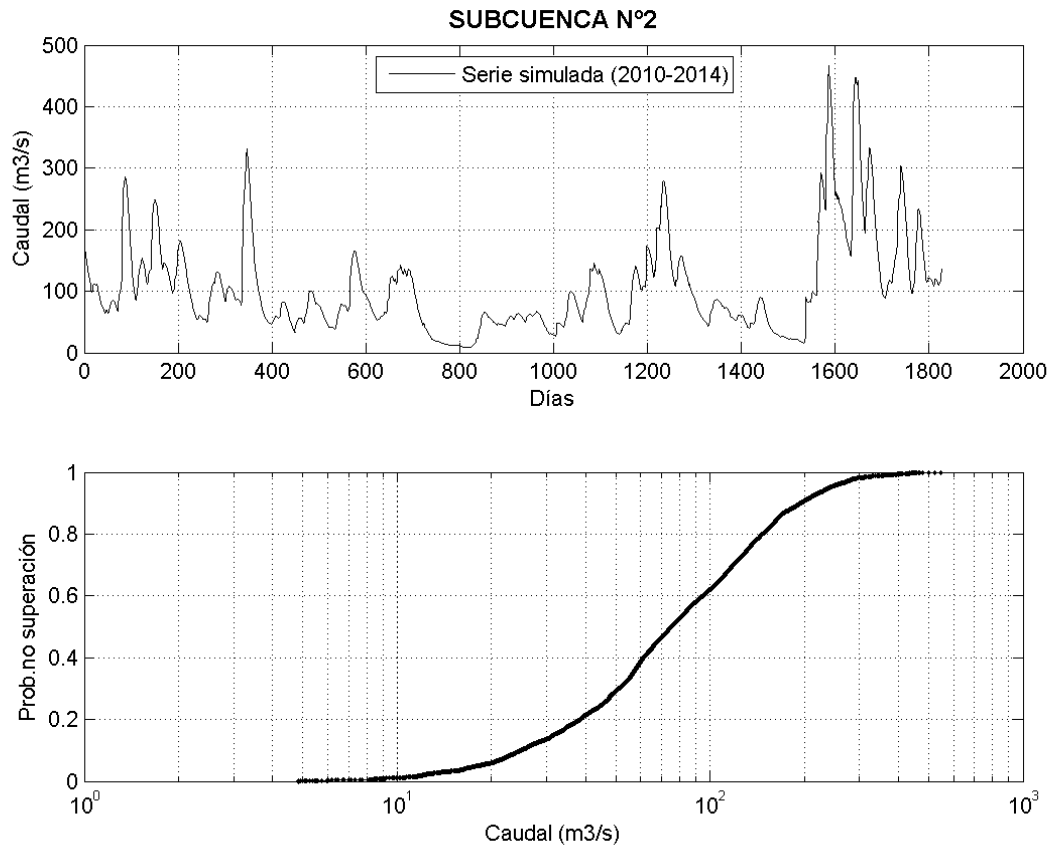


Figura 4. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-2.

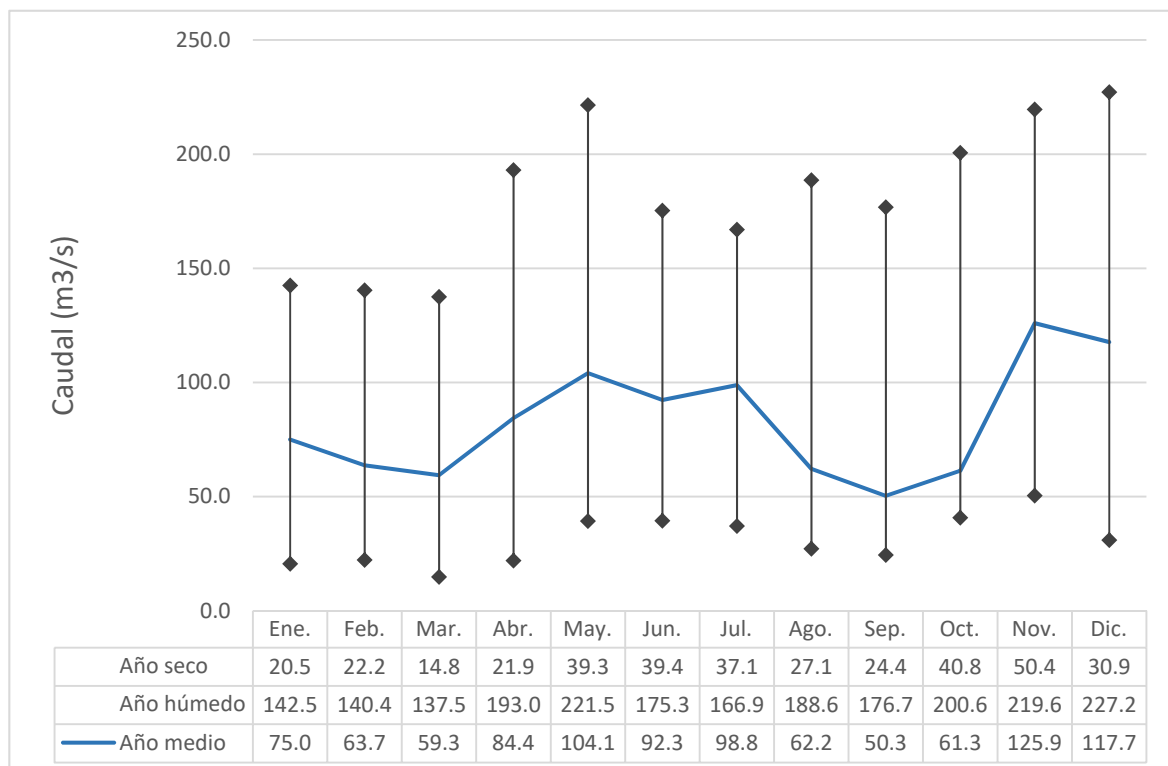
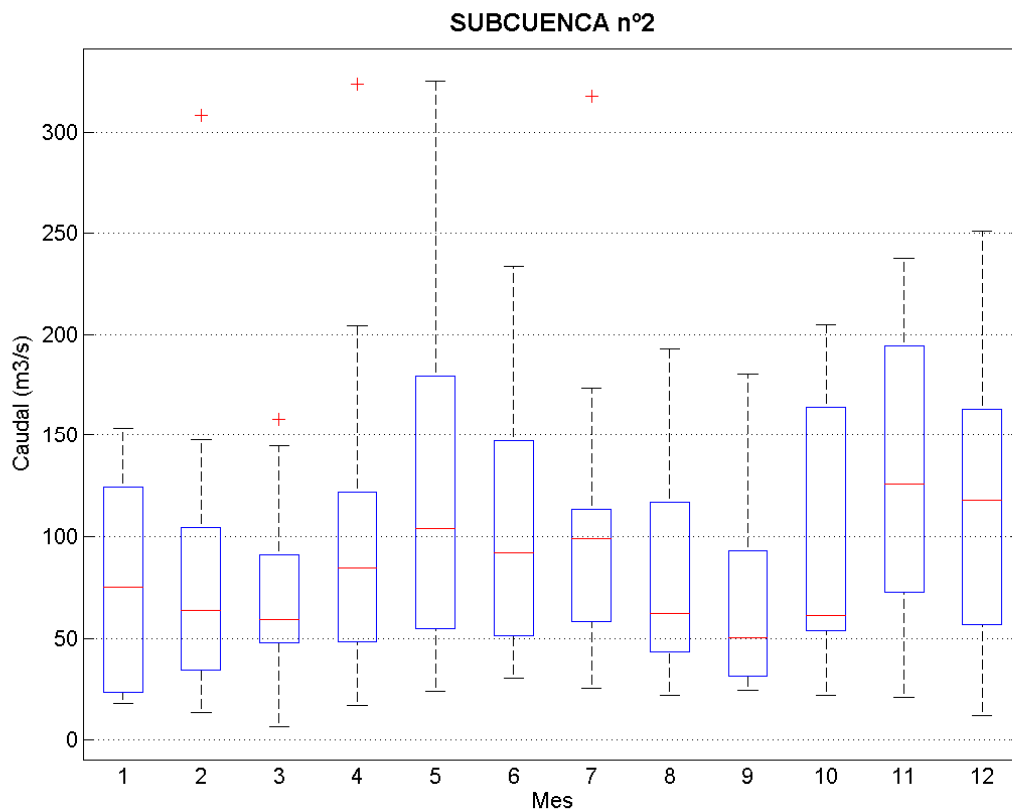


Figura 5. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-2.

1.3. Subcuenca 3

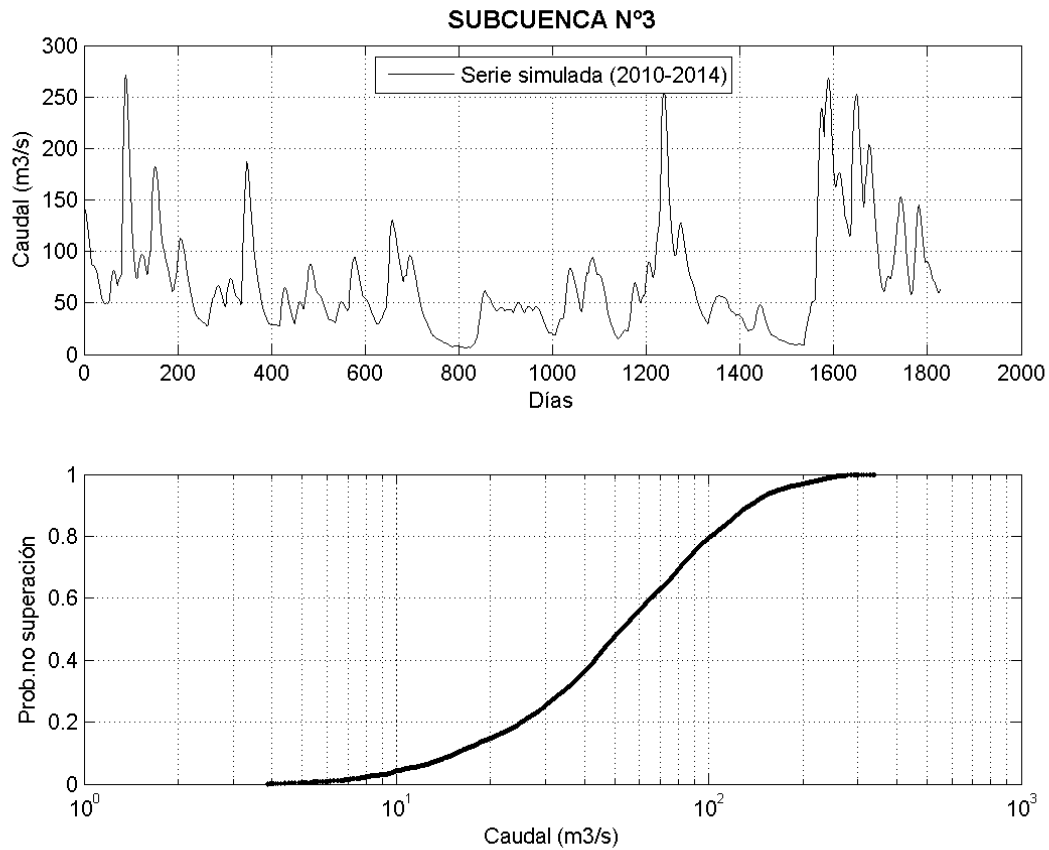


Figura 6. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-3.

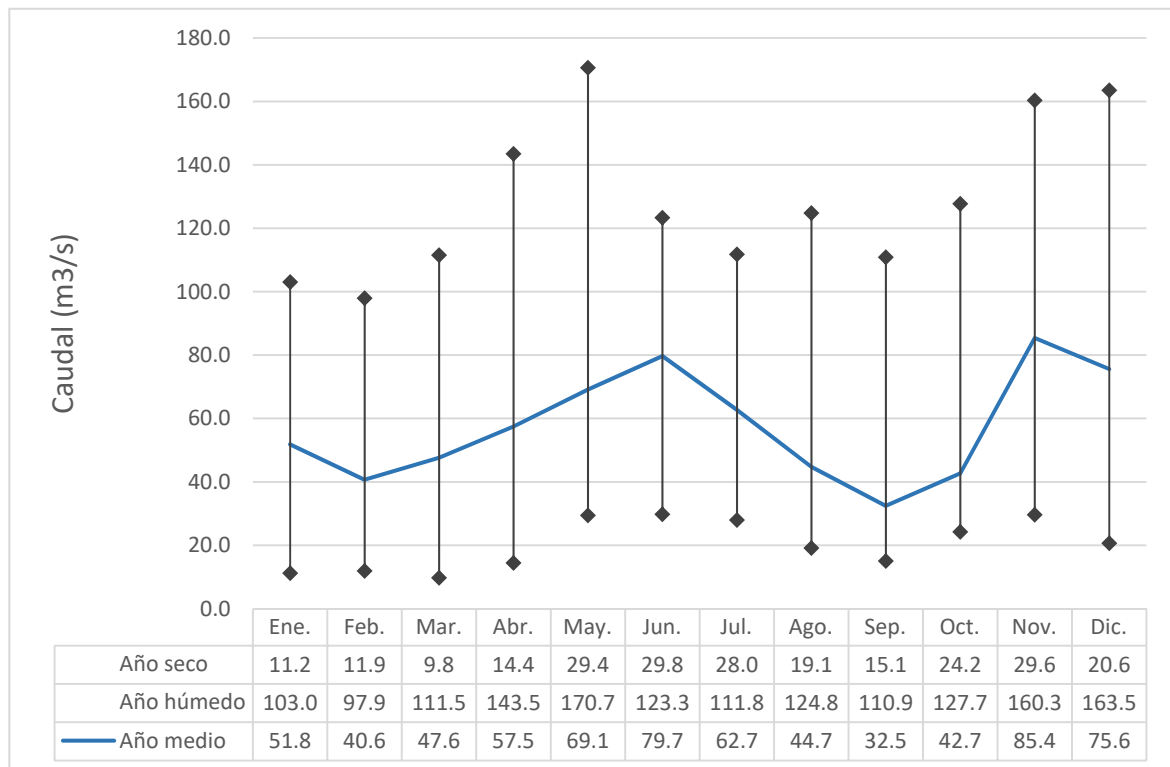
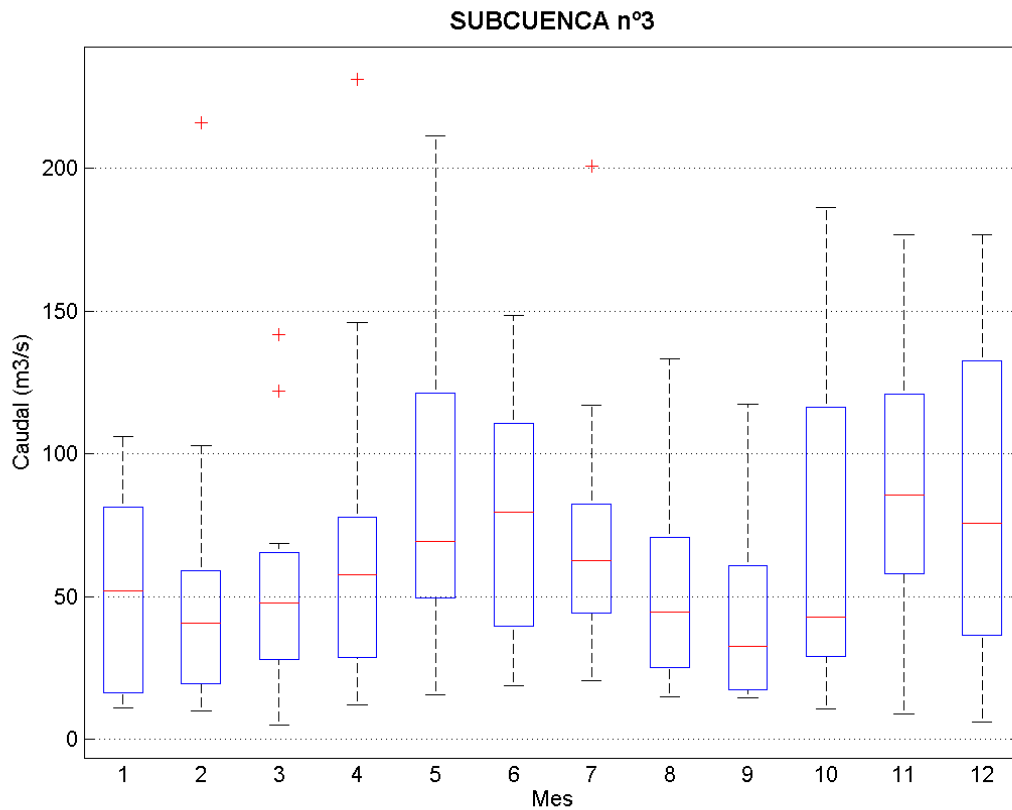


Figura 7. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-3.

1.4. Subcuenca 4

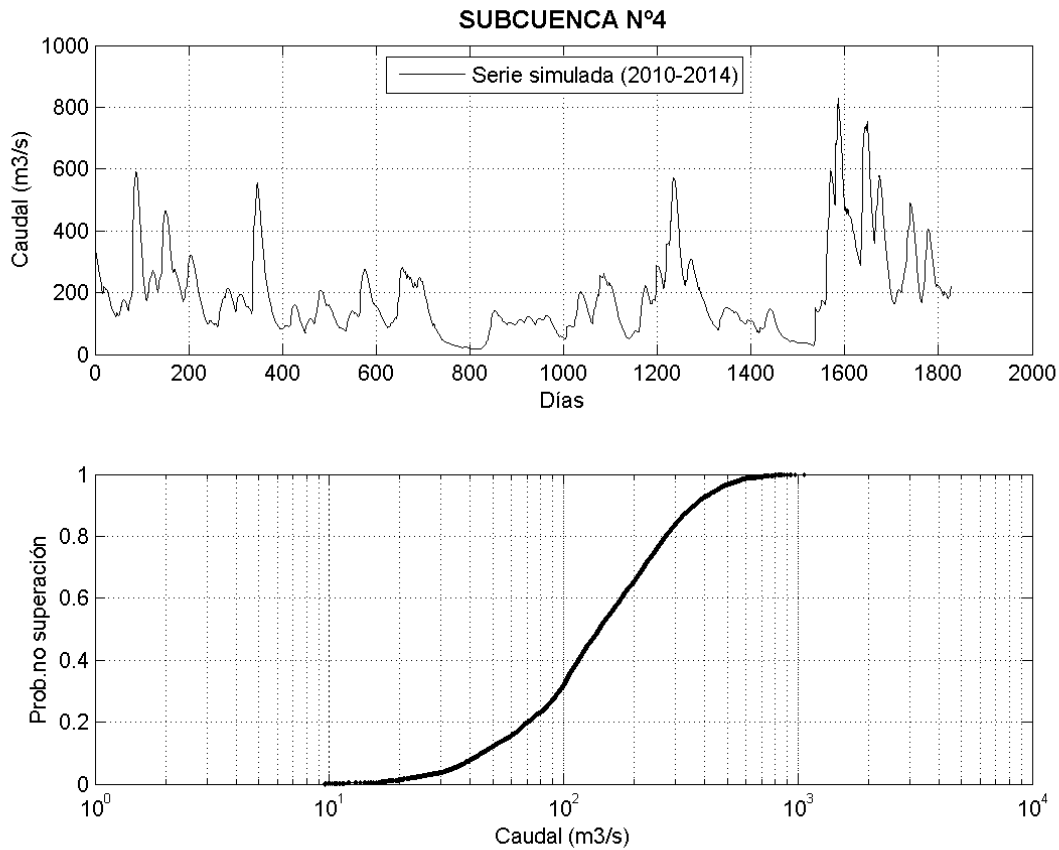


Figura 8. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-4.

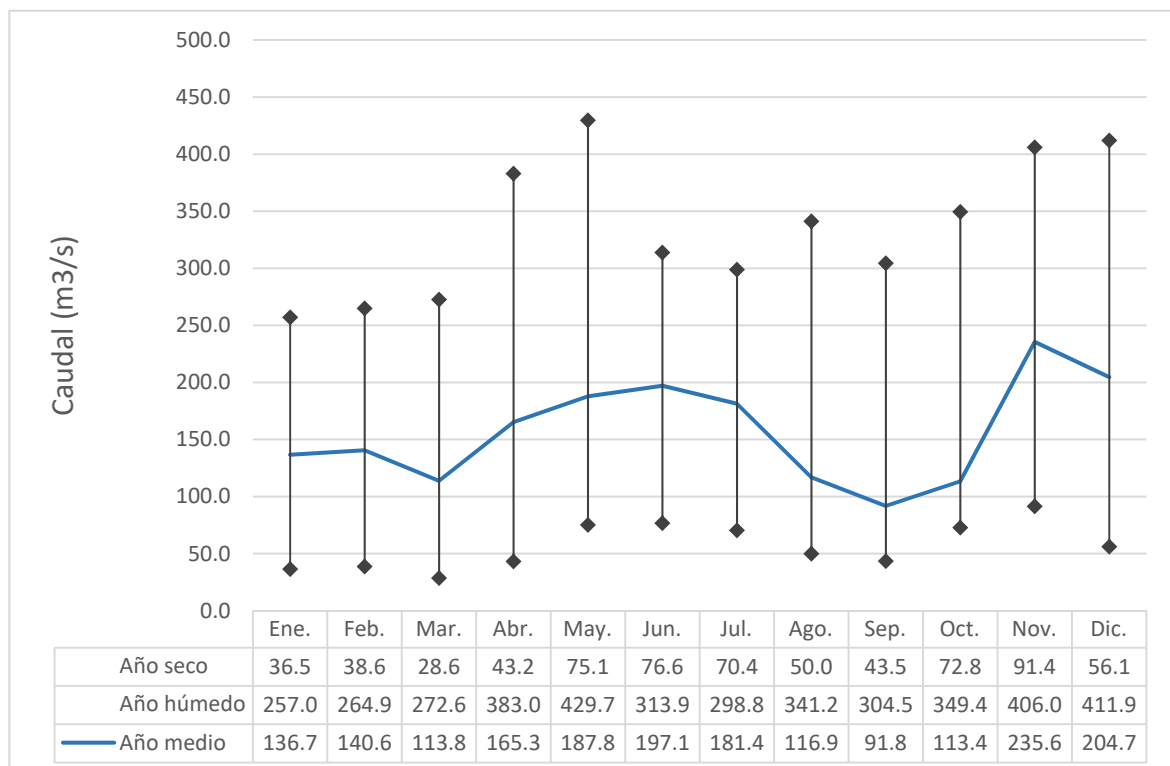
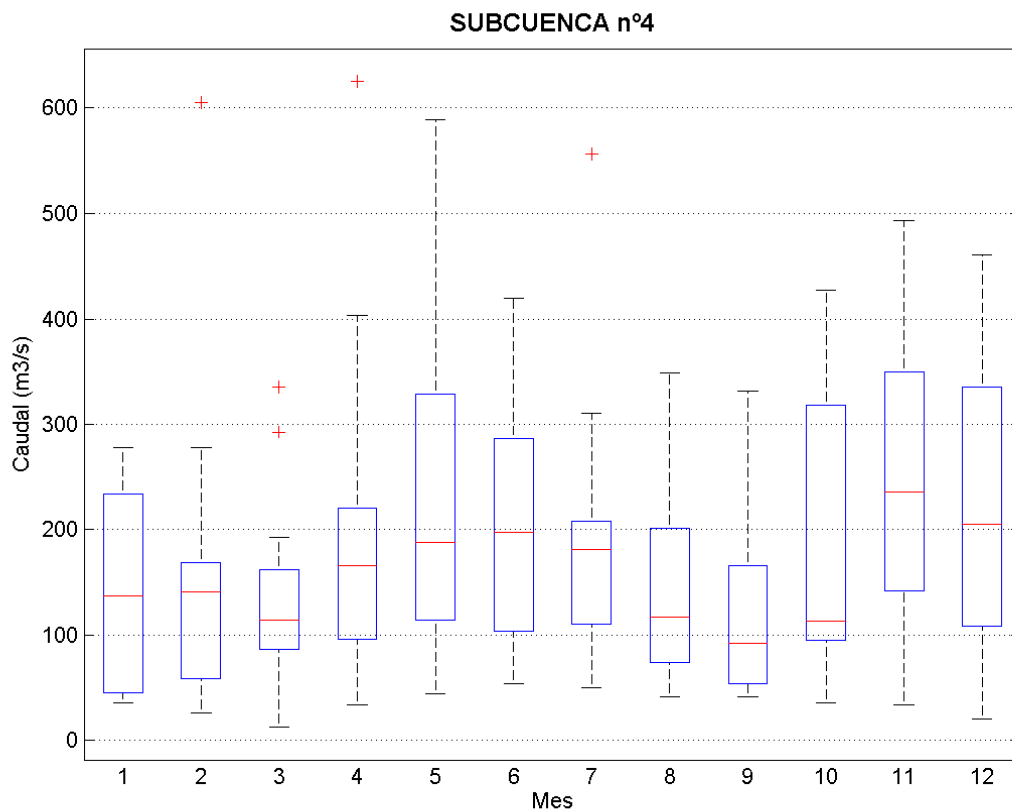


Figura 9. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-4.

1.5. Subcuenca 5

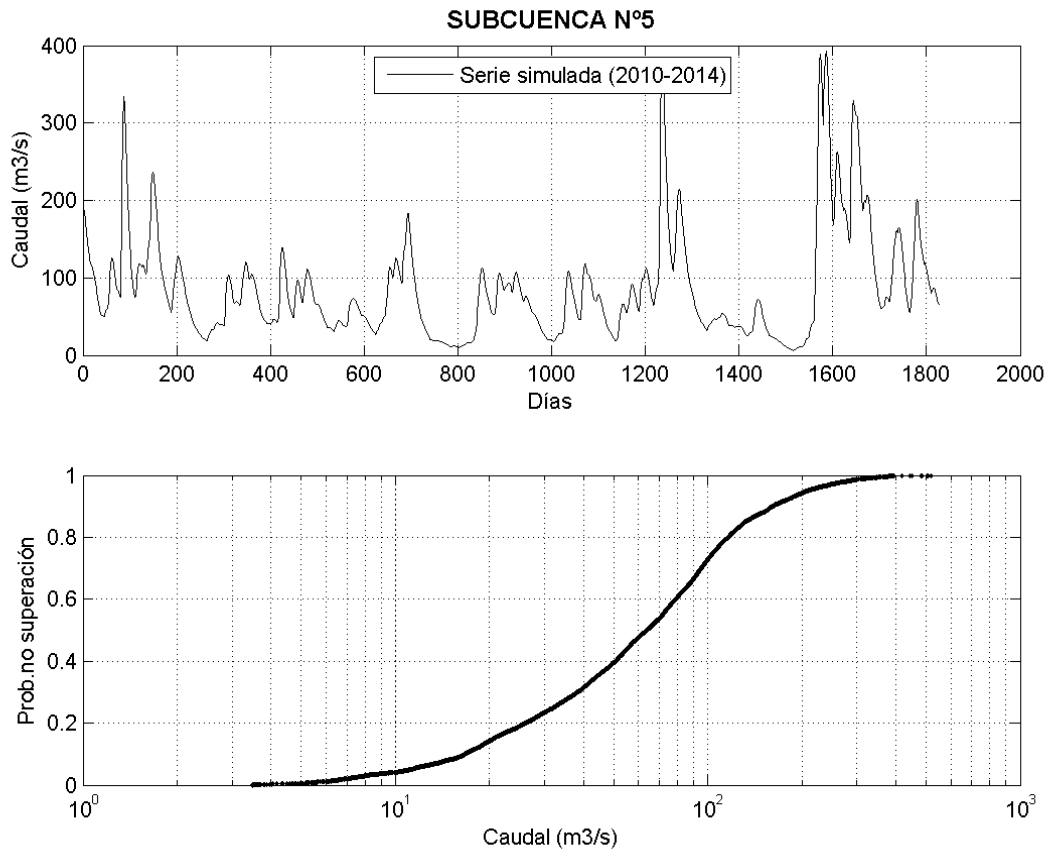


Figura 10. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-5.

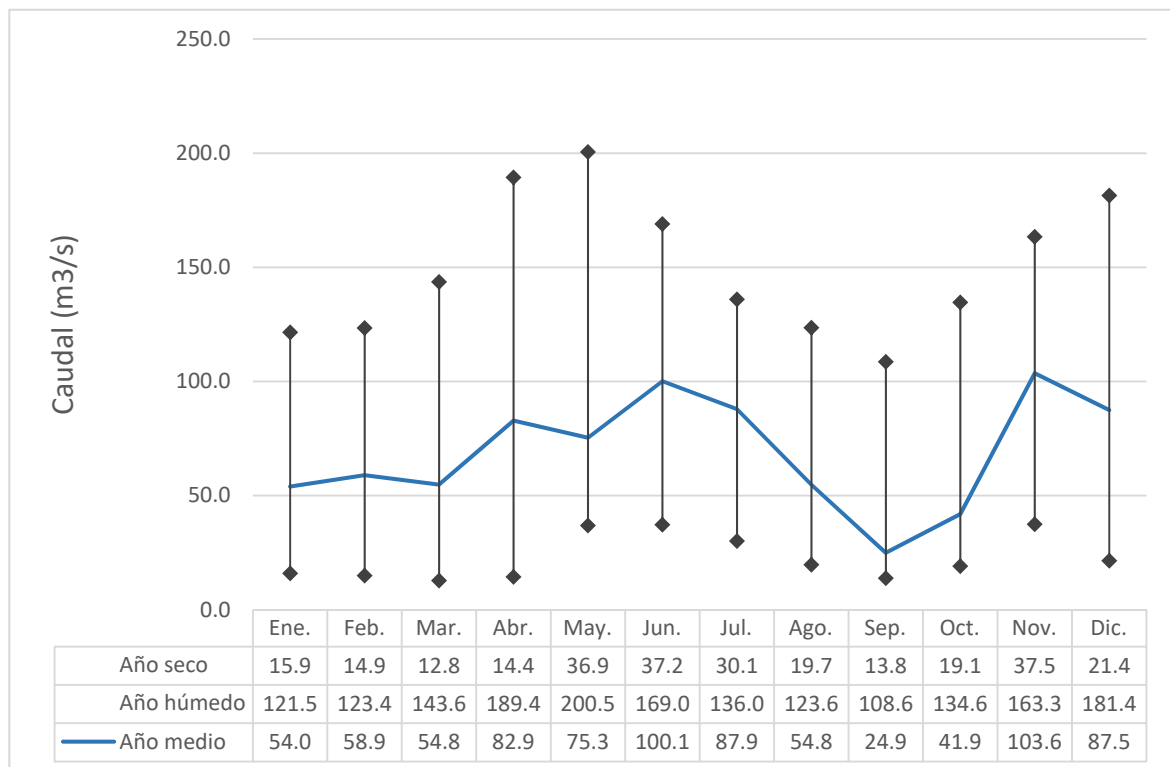
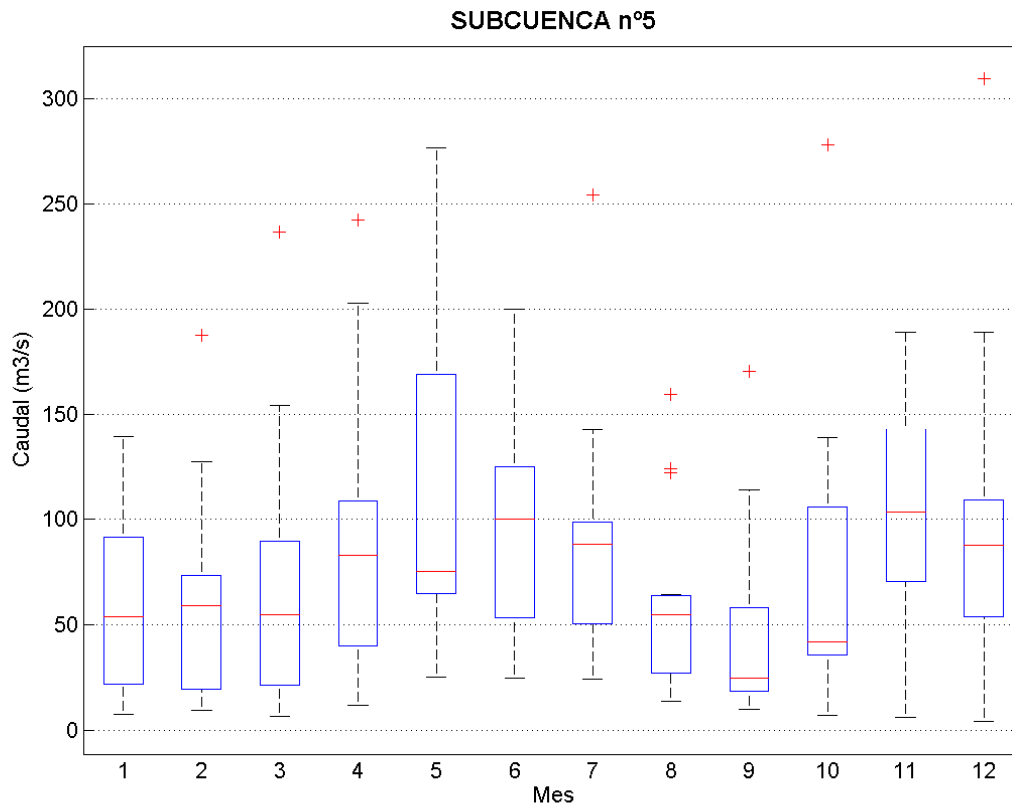


Figura 11. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-5.

1.6. Subcuenca 6

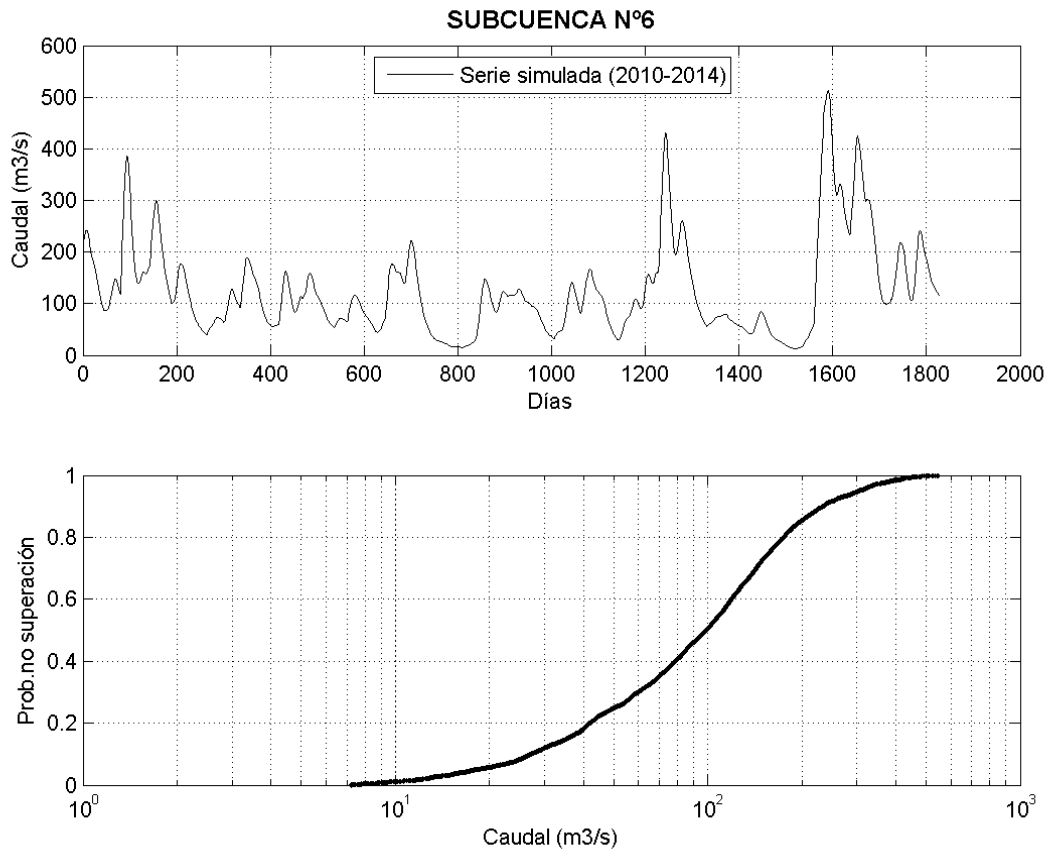


Figura 12. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-6.

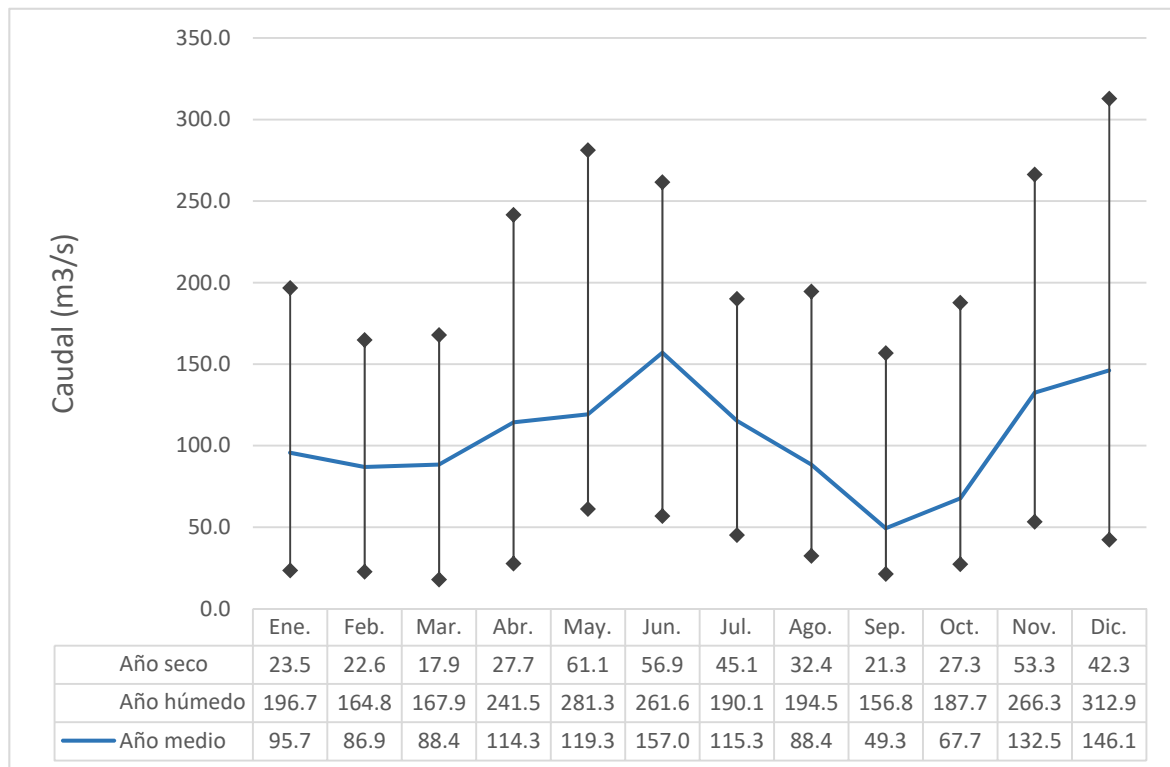
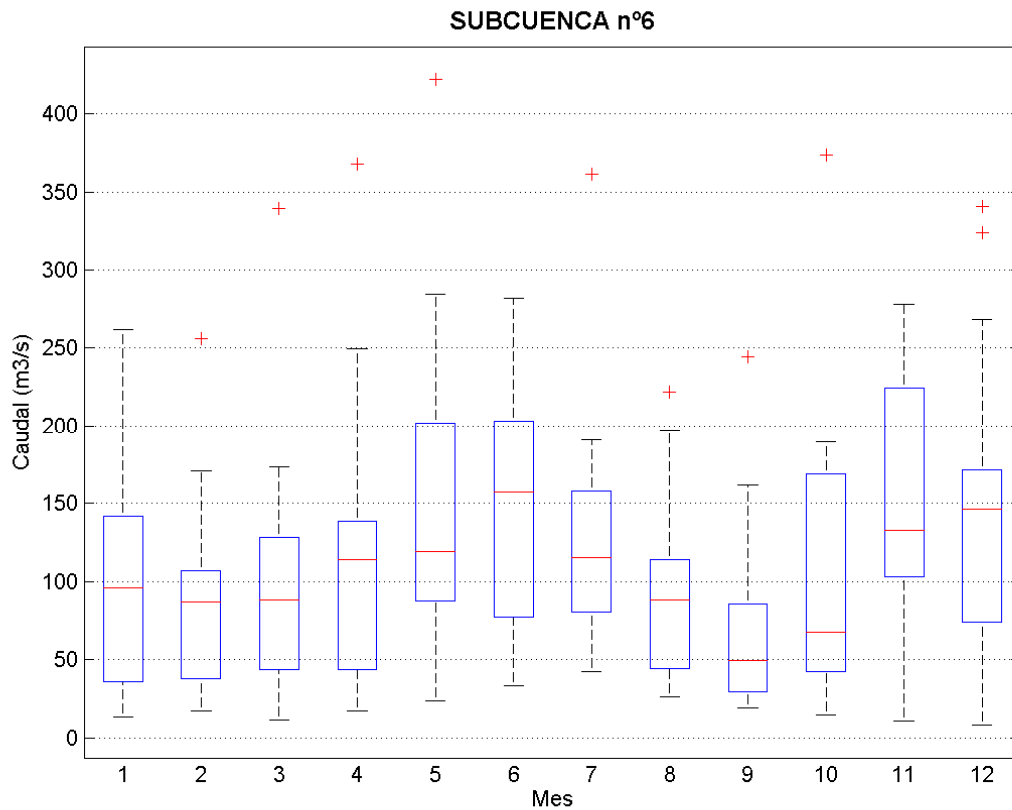


Figura 13. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-6.

1.7. Subcuenca 7

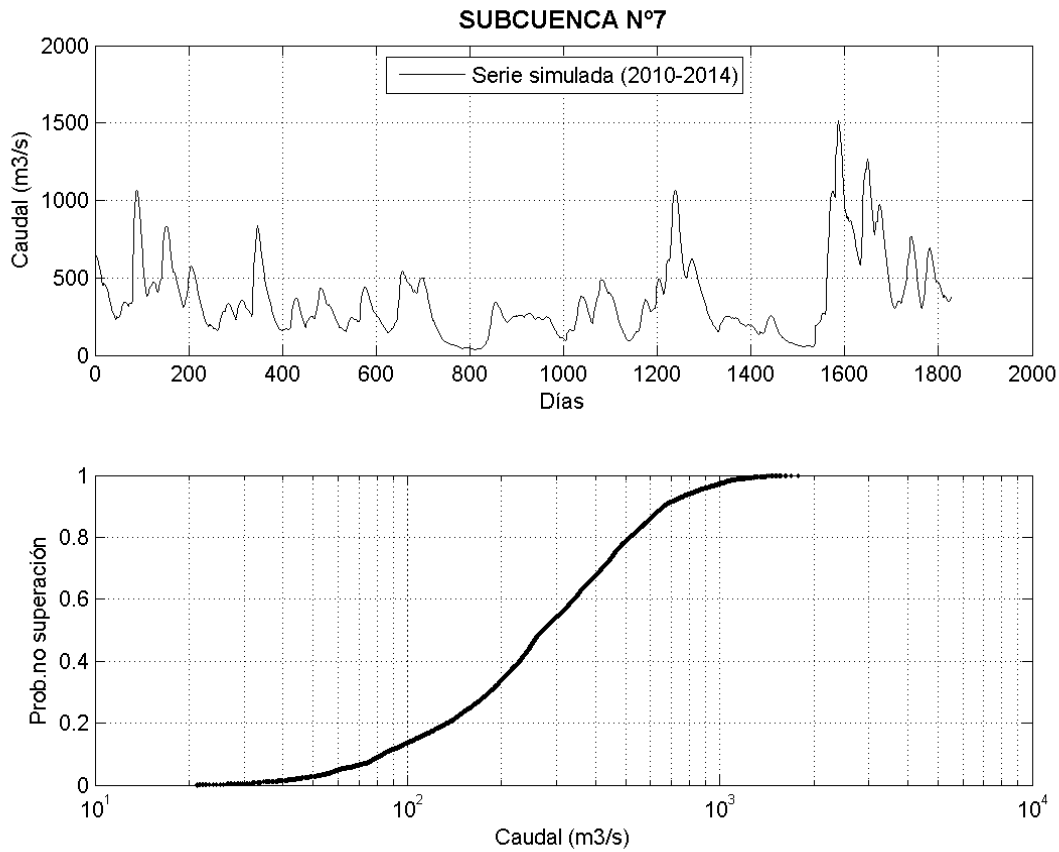


Figura 14. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-7.

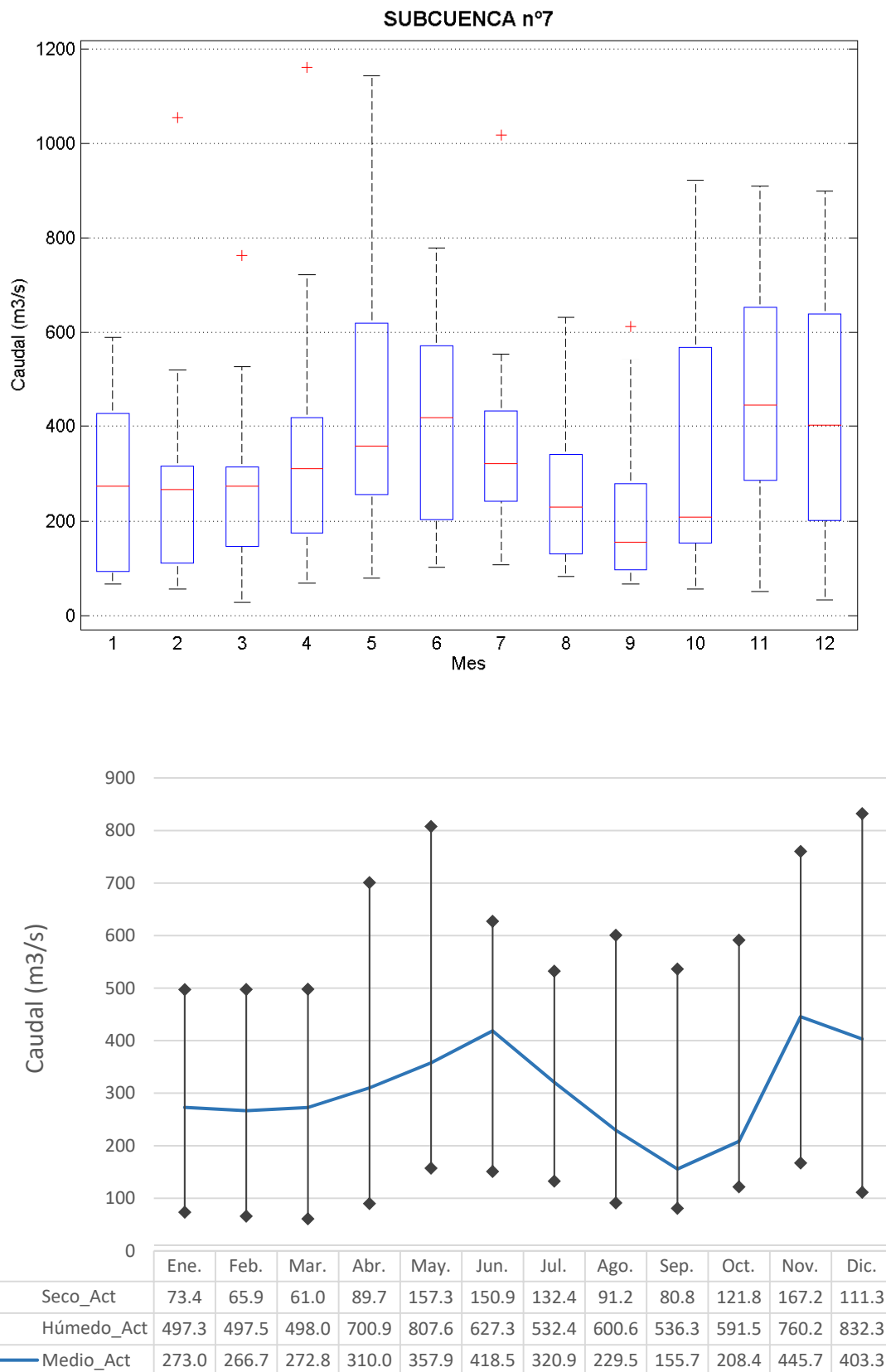


Figura 15. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-7.

1.8. Subcuenca 8

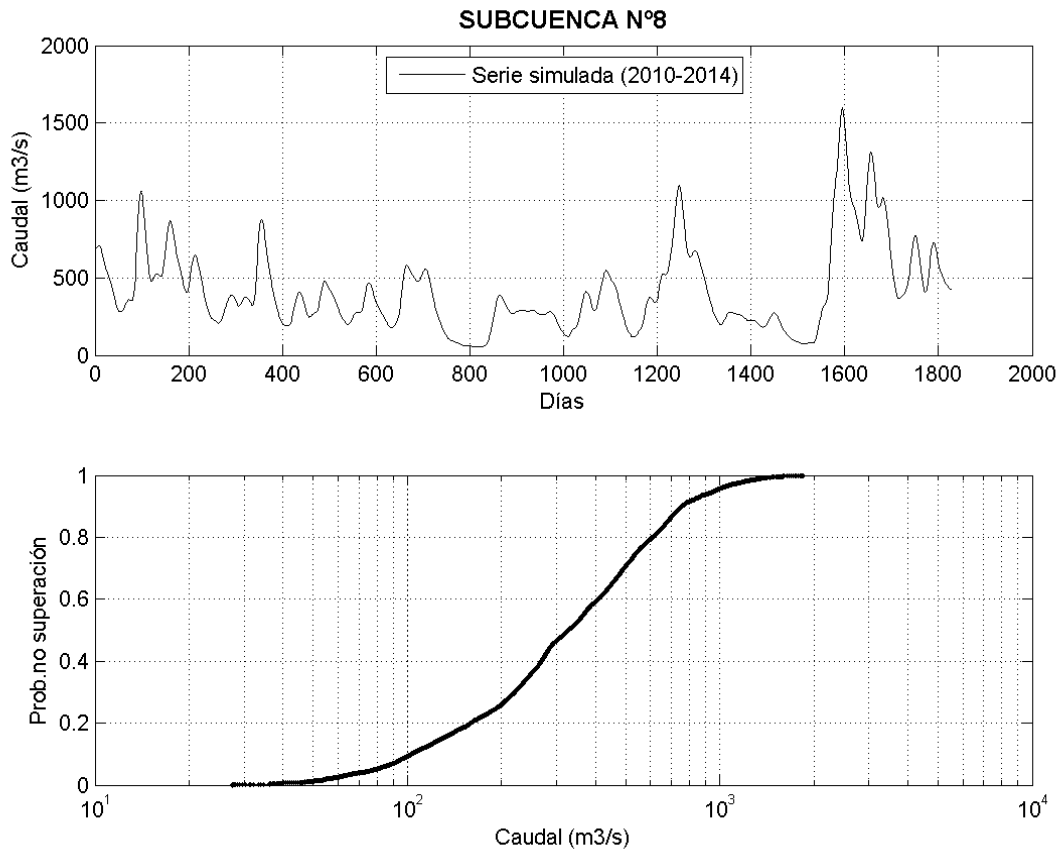


Figura 16. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-8.

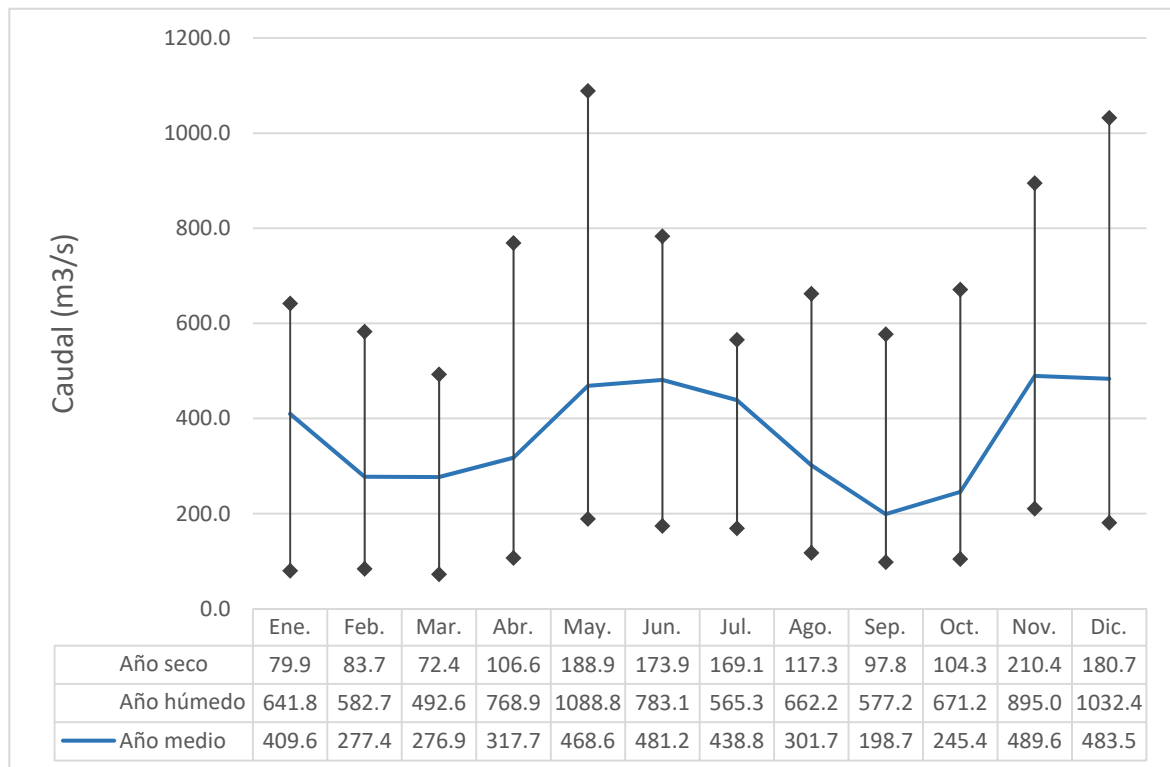
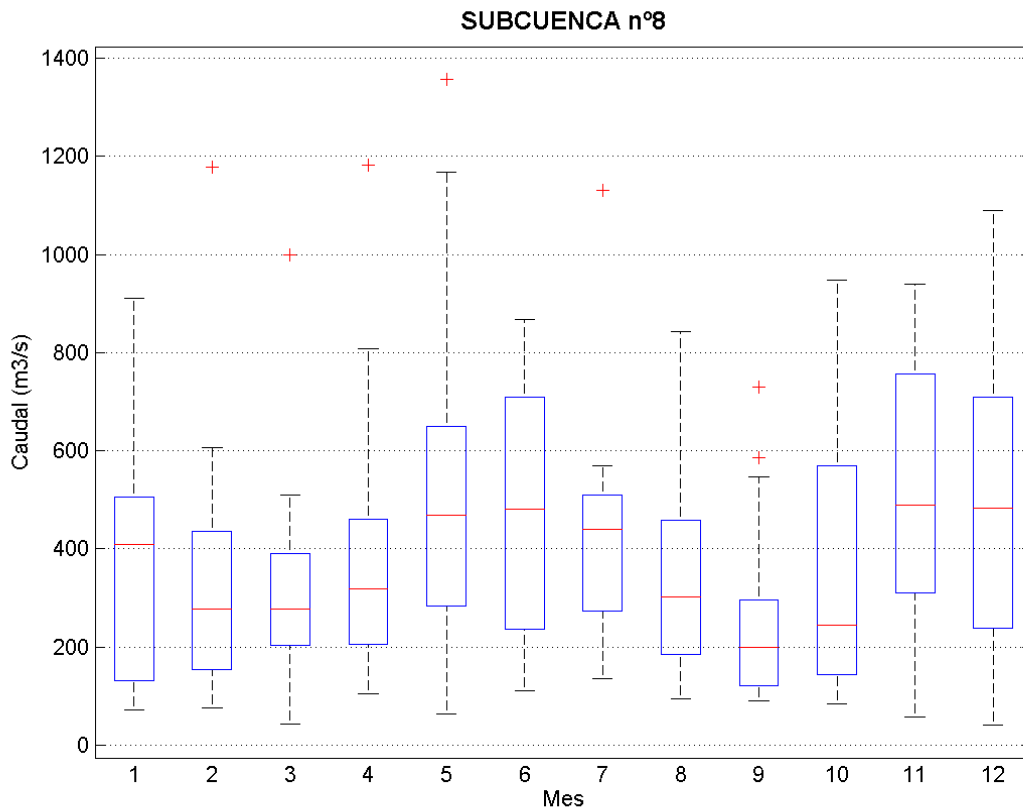


Figura 17. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-8.

1.9. Subcuenca 9

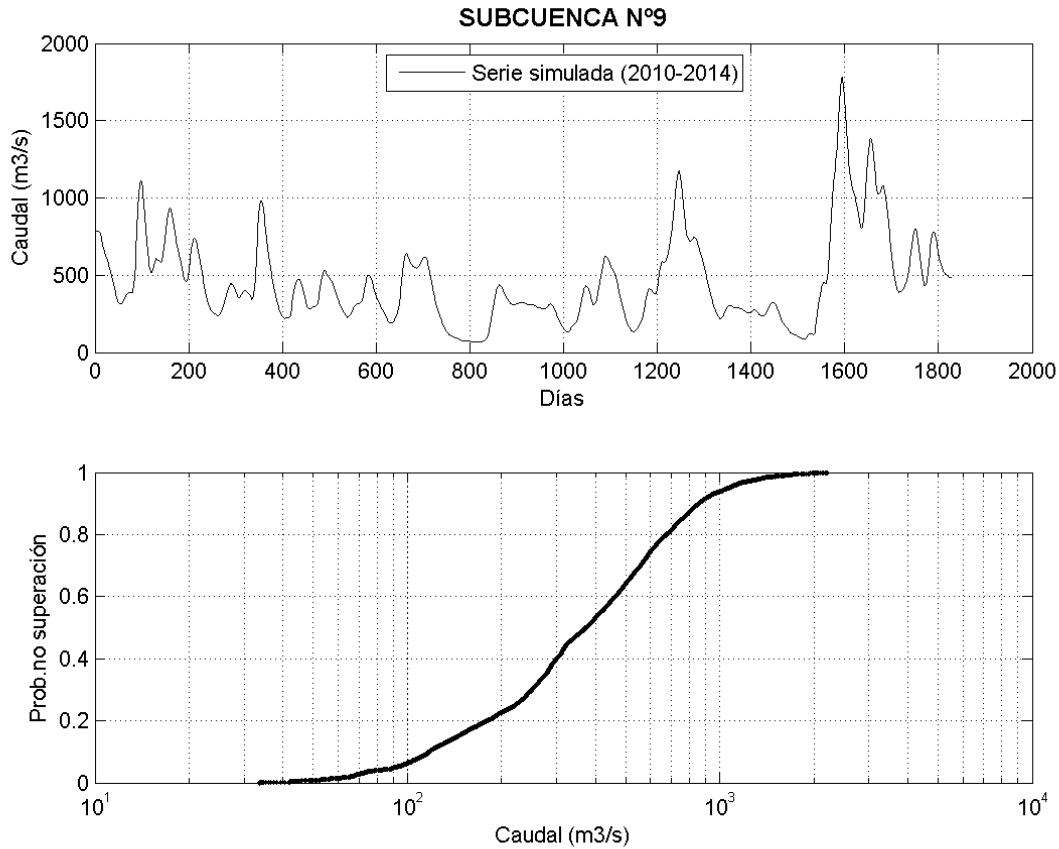


Figura 18. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-9.

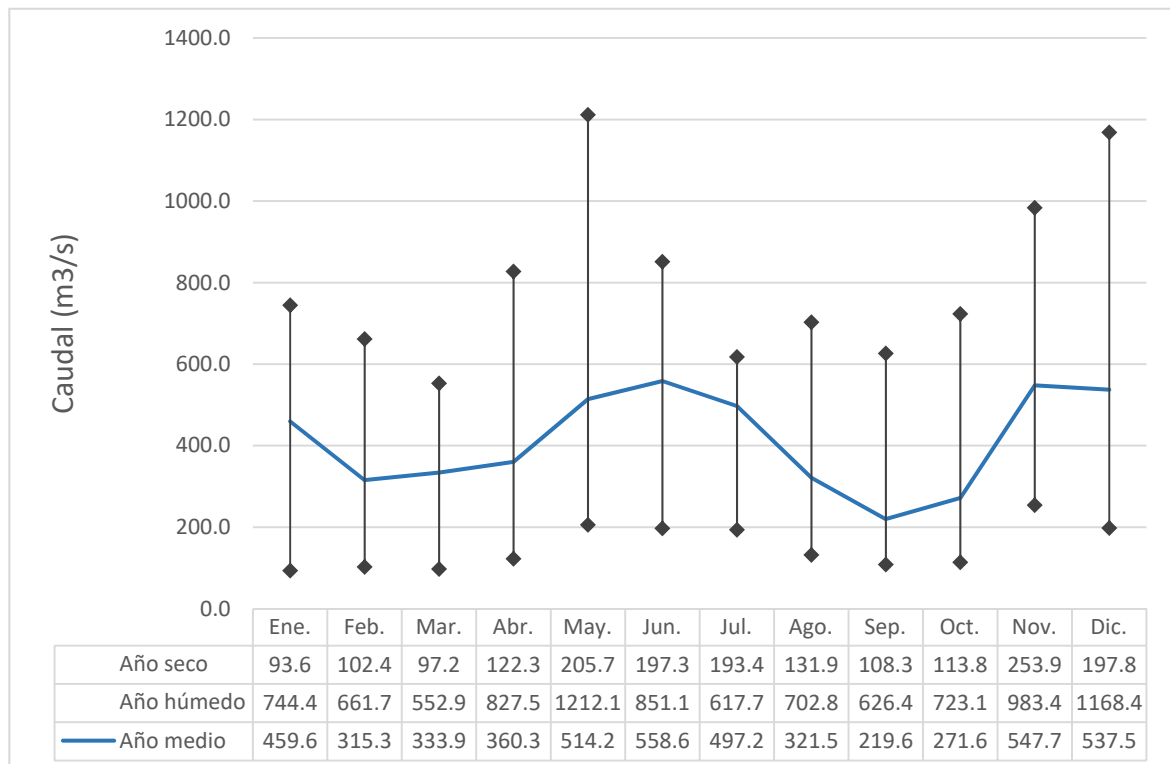
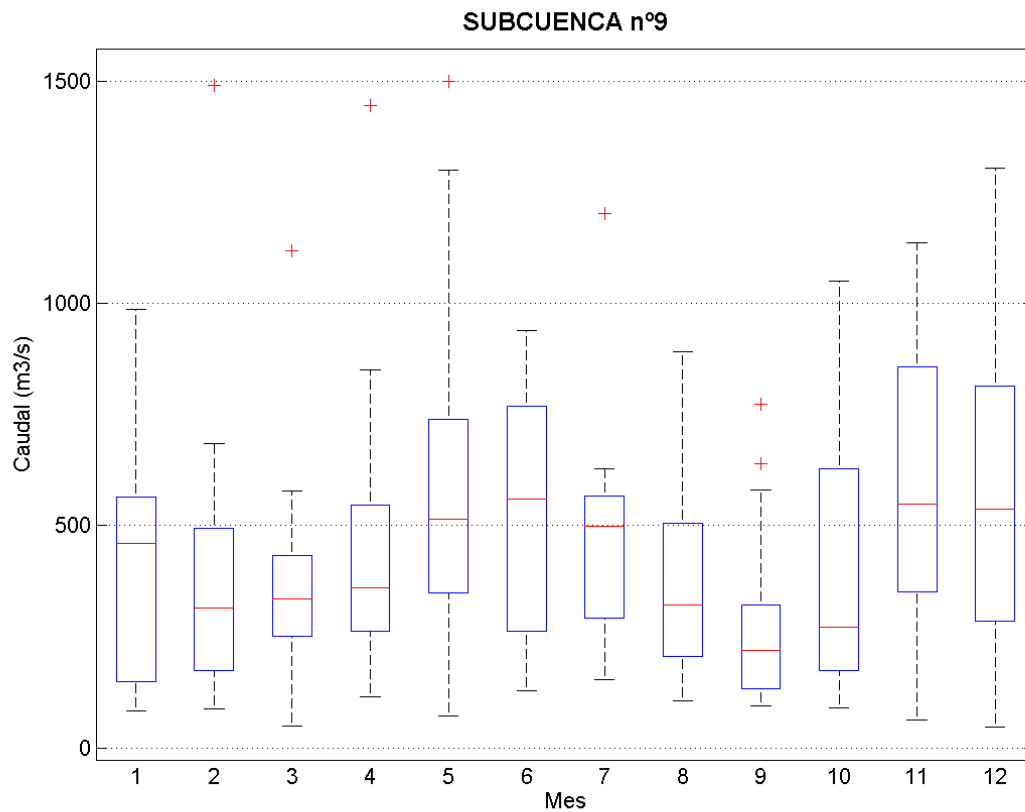


Figura 19. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-9.