

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SEPTIEMBRE DE 2012**

**ESTIMACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN CUENCAS NO  
AFORADAS EN URUGUAY**

***Magdalena Crisci, María Dolores Bejarano, Álvaro Sordo, Christian Chreties y Luis Garrote***

*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Uruguay.*

*Escuela de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.*

*Grupo Hidr@m Universidad Politécnica de Cartagena, España.*

*mcrisci@fing.edu.uy, lolesbejarano@yahoo.es, sordoward@hotmail.com, chreties@fing.edu.uy, l.garrote@upm.es*

**RESUMEN:**

En este artículo se analiza y discute la situación actual del Uruguay en cuanto a la estimación de caudales ambientales en sus cursos de agua. En particular, se analizan los casos de cuencas cuya superficie es inferior a 1000 Km<sup>2</sup>, que para Uruguay tienen principal interés, ya que en muchas de ellas existe una fuerte regulación debido a la existencia de represas de riego. La aplicación de cualquier metodología para la estimación de caudales ambientales (incluso las más simples), implican el conocimiento de una serie histórica de caudales naturales. Esta información usualmente no se dispone en el país (para cuencas inferiores a 1000 Km<sup>2</sup>) y por lo tanto se hace necesario establecer metodologías de estimación o regionalización de caudales. Este trabajo plantea una metodología de regionalización de caudales naturales basada en información física e hidrológica de las cuencas, utilizando como caso piloto la cuenca del río Negro (Uruguay) con cierre en la represa “Dr. Gabriel Terra”, que permita la aplicación de los métodos hidrológicos de caudales ambientales en cuencas escasamente aforadas. A partir de los resultados obtenidos en la regionalización de los caudales naturales y de los datos de caudal registrados en algunas estaciones de aforos existentes en la cuenca, se plantea estimar el régimen de caudales ambientales asociado a cualquier sub-cuenca no aforada.

**ABSTRACT:**

In this paper analysis and discussion regarding the current status of the estimation procedures of local rivers environmental flows will be introduced. More specifically, we analyse the case of watersheds with less than 1000 km<sup>2</sup> in area. Many of these basins are intensely regulated due to the presence of dams for irrigation. The estimation of environmental flows through any available methodology –even the simplest ones- requires a historical series of natural flows. For our case study this piece of information is seldom available, hence the need to set up an alternative calculation procedure. This paper will introduce a flow regionalization methodology based on watershed physical and hydrological input data –along with a pilot study case for the Rio Negro Basin at Dr. Gabriel Terra power dam- intended to ground further studies on environmental flows for poorly gauged watersheds. Given the results from the regionalization of environmental flows and actual runoff data available from any recording station located within the basin the goal is to estimate the un-gauged watershed environmental runoff regime.

**PALABRAS CLAVES:** caudal ambiental, regionalización de caudales, ecosistemas fluviales.

## **INTRODUCCIÓN**

Si bien en la bibliografía especializada se reportan variadas definiciones de caudales ambientales, existe acuerdo en la comunidad internacional respecto a que su caracterización en un curso de agua es una herramienta imprescindible para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca asociada. En Uruguay, desde el punto de vista normativo, no existe definición, estimación ni restricción en relación a los caudales ambientales de los cursos fluviales. No obstante, a partir de fines de 2009, con la promulgación de la ley 18.610 de Política Nacional de Aguas, se pone en práctica el Plan Nacional de Gestión de Recursos Hídricos que implica revisar las formas y criterios técnicos para la concesión de usos de recursos hídricos. En este contexto, las autoridades nacionales competentes, comenzaron a concretar algunos pasos iniciales a fin de incorporar el concepto de caudales ambientales como herramienta en la gestión. Dado que en Uruguay existe poca o nula experiencia en la estimación de caudales ecológicos, la primera etapa, que está en ejecución, se basa en la evaluación técnica de diferentes metodologías de estimación de caudal ecológico y la viabilidad de su aplicación a las condiciones (hidro-climáticas, ecológicas, económicas, sociales, legales) de nuestro país.

En los últimos años se han desarrollado internacionalmente diversas metodologías para definir caudales ambientales en cursos fluviales. Tharme (2003), recopila 207 métodos y los agrupa en cuatro categorías: hidrológicos, hidráulicos, de simulación de hábitat y holísticos. Los primeros constituyen el abordaje más simple para la estimación de caudales ambientales, ya que están centrados únicamente en el análisis de series temporales de caudales naturales de un curso de agua, sin considerar explícitamente otras dimensiones (ecológicas, sociales, económicas). Los métodos hidráulicos toman en cuenta la dinámica hidrológica y en base a información topo-batimétrica detallada del curso de agua, permiten cuantificar la variabilidad temporal y espacial del caudal y de otras variables hidráulicas como velocidad, profundidad, radio hidráulico, etc. La importancia de estos métodos radica en que varios de los aspectos que viabilizan la permanencia de determinadas especies en un ecosistema, están fuertemente condicionados por el régimen temporal de dichas variables hidráulicas. Los métodos de simulación de hábitat o eco-hidrológicos combinan los análisis hidráulicos con la modelación detallada de la cantidad e idoneidad de hábitat acuático utilizable para un organismo objetivo. En ellos se simula la variación de la profundidad, velocidad del agua, sustrato, etc. en función del caudal y se relacionan dichas variables con las curvas de preferencia de hábitat de la especie objetivo. Los métodos holísticos se basan en una evaluación del ecosistema en su conjunto, incorporando componentes bióticos y abióticos. Este enfoque requiere de un abordaje interdisciplinario e incluye metodologías que se basan en decisiones de paneles expertos. Se destaca por incorporar las consecuencias socioeconómicas en los usuarios del agua, así como las consecuencias biofísicas en el ecosistema.

## **VIABILIDAD DE APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CAUDALES AMBIENTALES EN URUGUAY**

Desde el punto de vista técnico, las metodologías más completas y adecuadas para la correcta gestión de los recursos hídricos son las de tipo holísticas. Sin embargo, la información de detalle requerida para su concreción no se dispone en la gran mayoría (o totalidad) de las cuencas del Uruguay y difícilmente pueda generarse en el corto y mediano plazo, debido esencialmente a limitaciones económicas.

Por su parte, en el caso de los métodos de simulación de hábitat, la limitante que actualmente existe en nuestro país radica en que no se dispone de ninguna curva de preferencia de especies, ni siquiera para aquellas especies características de los principales ecosistemas. Las curvas de preferencia de las especies constituyen el principal elemento vinculante entre las necesidades del ecosistema y el régimen hidrológico. Más allá del manifiesto interés de las autoridades competentes en concretar

estudios específicos para la determinación de dichas curvas de preferencia, al menos en el presente y a corto plazo, el Uruguay debe recurrir a métodos de tipo hidrológico o hidráulico.

La mayor parte de los métodos hidrológicos se basan en establecer un caudal o una serie de caudales característicos del régimen natural, lo que implica disponer de información de series históricas no alteradas (mensuales, diarias u horarias) con un nivel de calidad adecuado. Esto tiene asociado para el Uruguay dos limitaciones: 1) solamente están aforadas las cuencas mayores a 1000 Km<sup>2</sup>; 2) en aquellas cuencas aforadas, existe alta incertidumbre en la medición de caudales bajos. Este trabajo aborda la primera dificultad; evaluando y proponiendo una metodología de base hidrológica para estimar caudales ecológicos en cuencas no aforadas. Las cuencas de superficie inferior a 1000 Km<sup>2</sup> tienen para Uruguay principal interés, ya que en la mayoría de ellas existe una fuerte regulación debido a la existencia de represas de riego que almacenan más del 85% del volumen total de agua otorgada a los diferentes usuarios.

## **OBJETIVOS**

Analizar y evaluar una metodología de regionalización de caudales basada en información física e hidrológica disponible, que permita la aplicación de los métodos hidrológicos de caudales ambientales en cuencas escasamente aforadas. Para ello, se utilizó como cuenca piloto la cuenca del río Negro, con cierre en la represa hidroeléctrica “Dr. Gabriel Terra”, planteándose los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una caracterización y clasificación de los caudales naturales existentes (ciclo medio anual mensual) en la cuenca del río Negro con cierre en la mencionada represa.
- Estimar el régimen de caudal ambiental de las subcuencas aforadas dentro de la cuenca de estudio, utilizando diferentes metodologías del tipo hidrológicas y realizar una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos por las mismas.

En base a ello discutir y proponer los caudales ambientales en sub-cuencas no aforadas.

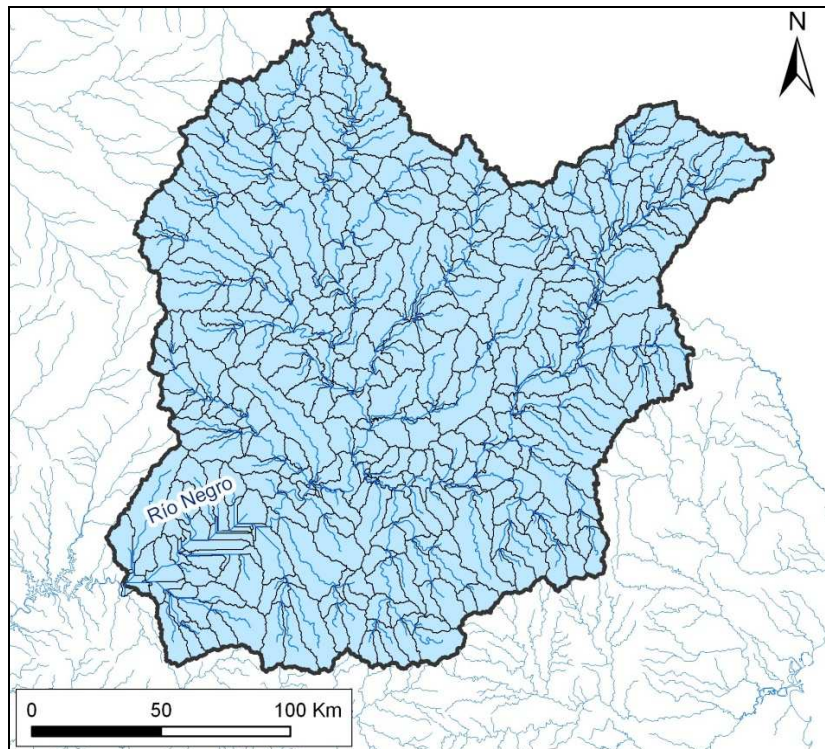
## **METODOLOGÍA**

A continuación se describe la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados.

### **Caracterización y clasificación de los caudales naturales en la cuenca del río Negro**

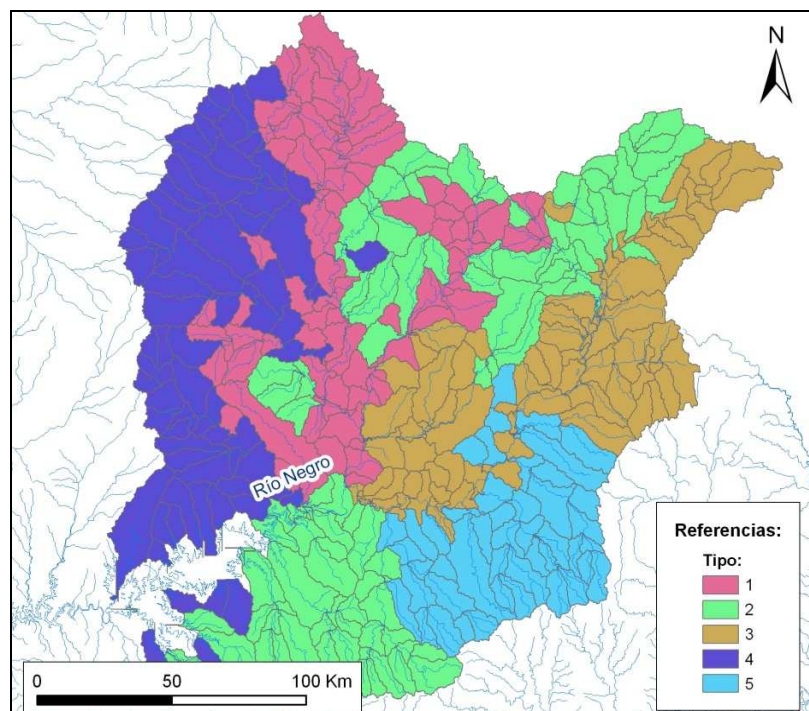
La cuenca del río Negro con cierre en la represa “Dr. Gabriel Terra” ocupa aproximadamente 40.000 km<sup>2</sup>. Para la caracterización y clasificación del régimen hidrológico natural en la cuenca, se subdividió la misma en 423 subcuencas, en función de los cauces afluentes definidos a escala 1:50.000. En la Figura 1 se presenta el resultado de esta subdivisión.

Para cada una de las subcuencas identificadas, se determinó la serie de caudales mensuales en el período 1924-2009 a partir de la aplicación en forma agregada del modelo hidrológico de Temez (Temez, 1977). Para ello se contó con información de precipitación mensual en la cuenca en el período 1924-2009, información de evapotranspiración potencial y una caracterización del almacenamiento máximo del suelo en cada subcuenca. El modelo involucra la fijación de cuatro parámetros cuyos valores fueron tomados del análisis de regionalización presentado en el trabajo de Failache et al. (2006).

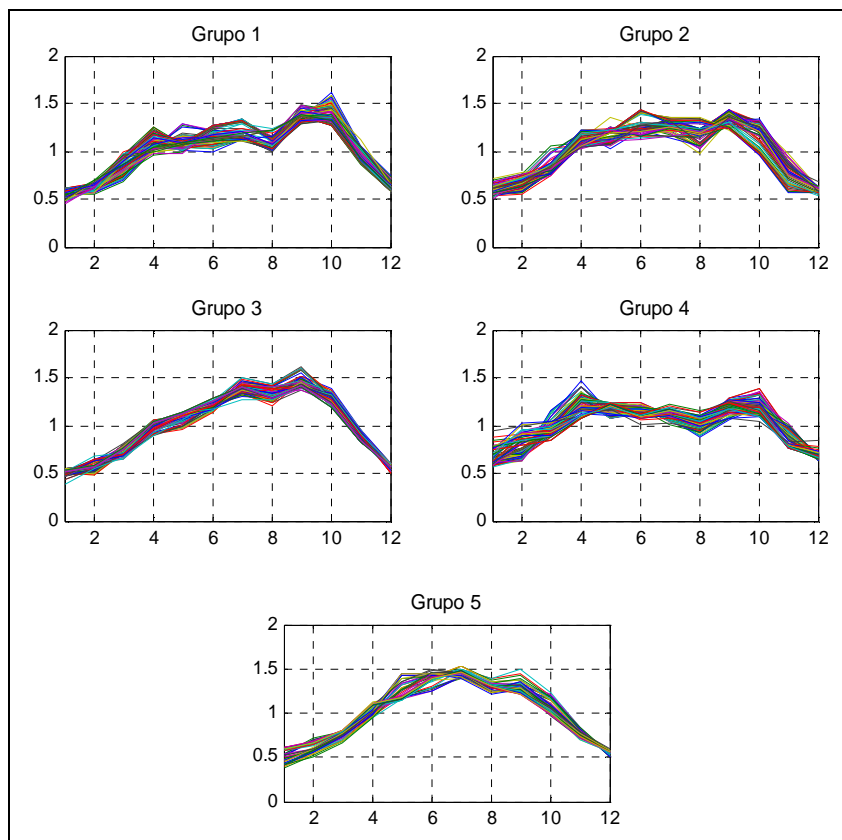


**Figura 1.-** Subcuencas afluentes escala 1:50.000

Una vez obtenidas dichas series de caudales para todas las subcuencas, se realizó un análisis cluster de 12 variables (correspondiendo cada una de ellas a cada mes) con el objetivo de definir y agrupar los diferentes tipos de régimen hidrológico existentes en la cuenca. Se definieron así 5 tipos de régimen hidrológico. En la Figura 2 se presenta la distribución espacial de los mismos en la cuenca, mientras que en la Figura 3 la forma del ciclo medio anual (normalizado por el caudal medio mensual) correspondiente a cada uno de los 5 tipos. Como puede apreciarse, los 5 tipos presentan menores escurrimientos en verano y mayores en los restantes meses, en especial invierno. Este comportamiento, inverso al marcado ciclo medio de evapotranspiración que se registra en Uruguay, es concordante con que el ciclo medio de precipitaciones no presenta estacionalidad.



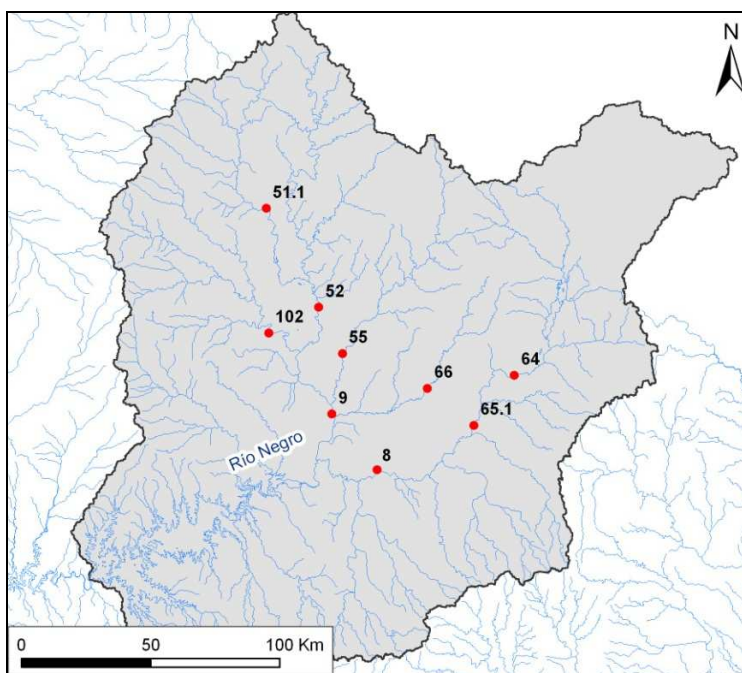
**Figura 2.-** Distribución de los tipos de régimen hidrológicos definidos



**Figura 3.-** Ciclo medio anual normalizado de caudales de las subcuencas correspondientes a cada grupo

### Estimación del régimen de caudal ambiental en subcuencas aforadas

En la Figura 4 se presenta la localización de las estaciones de aforo existentes (9 estaciones) en la cuenca de estudio, en las cuales fueron aplicadas las metodologías de estimación de caudal ambiental, utilizando para ellos datos diarios de caudal en el período 1975-1988.



**Figura 4.-** Estaciones de aforo existentes en la cuenca con datos disponibles

Cabe destacar, que si bien se dispone de información en el período 1975-2012, fue seleccionado el período 1975-1988, ya que hasta esa fecha, resulta razonable asumir que los caudales circulantes son naturales, i.e.: no están modificados por usuarios del recurso en la cuenca. En efecto, a partir de fines de la década de 1980, la cuenca ha registrado una intensificación creciente en el uso del recurso fundamentalmente con dos objetivos: 1) uso agrícola (construcción de represas para almacenamiento de agua para riego, fundamentalmente de arroz) y 2) expansión de las plantaciones forestales de pino y eucaliptos en la cuenca alta del río Negro.

**Tabla 1.- Metodologías hidrológicas consideradas**

<b>Métodos que establecen un único valor de caudal ambiental</b>													
Montana (Tennat, 1976)	Se basa en fijar como caudal ambiental un valor entre 10% (umbral mínimo para organismos acuáticos) y 30% (rango entre bueno y óptimo para organismos acuáticos) del caudal medio anual del curso.												
7Q10	Propone determinar el caudal ambiental como el caudal mínimo promedio con duración de 7 días y período de retorno de X años.												
Porcentajes de excedencia	Propone determinar el caudal ambiental como un porcentaje de excedencia del mismo, a través de las curvas de excedencia, que consisten en curvas de distribución de frecuencias acumuladas que muestran el porcentaje del tiempo que un caudal específico es igualado o superado durante un periodo de tiempo: día, mes año o todo el período de registro.												
Aquatic Base Flow (ABF) o método NEFM.	Propone calcular el como la media aritmética de los valores de la mediana calculada para los caudales medios diarios del mes más seco de cada año de la serie considerada.												
QMA	Fija un valor de caudal mínimo que corresponde a un porcentaje del caudal medio anual (QMA) . Por ejemplo el 10%QMA, 25%QMA 30%QMA.												
Q25	Propone calcular el como la media de los valores mínimos anuales de la series de caudales medios de 25 días consecutivos.												
<b>Métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año</b>													
NGPRP	Los caudales ecológicos se calculan, para cada mes, como los caudales medios diarios que son igualados o superados el 90% del tiempo, una vez descartados los caudales extremos secos y húmedos, con la excepción de los meses húmedos en que el caudal mínimo recomendado corresponde al caudal que es igualado o superado el 50% del tiempo. Los caudales extremos secos y húmedos fueron considerados como aquellos menores al percentil y mayores al percentil 90 respectivamente.												
QMM	Se define el caudal ambiental para cada mes como el 30% del valor medio mensual.												
<b>Métodos que establecen un régimen completo de caudales ecológicos</b>													
IHA (Richter, 1997)	Caracteriza al régimen natural a través de una serie de parámetros y se fija para cada uno de ellos un rango de variabilidad natural (RVA) en el que el nuevo régimen debería estar comprendido para no alterar más de lo aceptable el estado del río.												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Grupo</th> <th>Parámetro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grupo 1 Magnitud de los caudales mensuales</td> <td>Caudal medio diario de cada mes del año</td> </tr> <tr> <td>Grupo 2 Magnitud y duración de los caudales extremos anuales</td> <td>Caudal mínimo anual de 1 día Caudal máximo anual de 1 día Caudal mínimo anual de 3 días Caudal máximo anual de 3 días Caudal mínimo anual de 7 días Caudal máximo anual de 7 días Caudal mínimo anual de 30 días Caudal máximo anual de 30 días Caudal mínimo anual de 90 días Caudal máximo anual de 90 días</td> </tr> <tr> <td>Grupo 3 Momento de ocurrencia de los caudales extremos anuales</td> <td>Fecha del máximo caudal de cada año Fecha del mínimo caudal de cada año</td> </tr> <tr> <td>Grupo 4 Frecuencia y duración de los pulsos de caudales altos y bajos</td> <td>Número de pulsos altos de cada año Número de pulsos bajos de cada año Duración media de los pulsos altos de cada año Duración media de los pulsos bajos de cada año</td> </tr> <tr> <td>Grupo 5 Tasa y frecuencia de los cambios de caudal</td> <td>Promedio de las tasas de cambio de caudal ascendentes de días consecutivos de cada año Promedio de las tasas de cambio de caudal descendentes de días consecutivos de cada año Cantidad de tasas de cambio positivas de cada año Cantidad de tasas de cambio negativas de cada año</td> </tr> </tbody> </table>	Grupo	Parámetro	Grupo 1 Magnitud de los caudales mensuales	Caudal medio diario de cada mes del año	Grupo 2 Magnitud y duración de los caudales extremos anuales	Caudal mínimo anual de 1 día Caudal máximo anual de 1 día Caudal mínimo anual de 3 días Caudal máximo anual de 3 días Caudal mínimo anual de 7 días Caudal máximo anual de 7 días Caudal mínimo anual de 30 días Caudal máximo anual de 30 días Caudal mínimo anual de 90 días Caudal máximo anual de 90 días	Grupo 3 Momento de ocurrencia de los caudales extremos anuales	Fecha del máximo caudal de cada año Fecha del mínimo caudal de cada año	Grupo 4 Frecuencia y duración de los pulsos de caudales altos y bajos	Número de pulsos altos de cada año Número de pulsos bajos de cada año Duración media de los pulsos altos de cada año Duración media de los pulsos bajos de cada año	Grupo 5 Tasa y frecuencia de los cambios de caudal	Promedio de las tasas de cambio de caudal ascendentes de días consecutivos de cada año Promedio de las tasas de cambio de caudal descendentes de días consecutivos de cada año Cantidad de tasas de cambio positivas de cada año Cantidad de tasas de cambio negativas de cada año
	Grupo	Parámetro											
	Grupo 1 Magnitud de los caudales mensuales	Caudal medio diario de cada mes del año											
	Grupo 2 Magnitud y duración de los caudales extremos anuales	Caudal mínimo anual de 1 día Caudal máximo anual de 1 día Caudal mínimo anual de 3 días Caudal máximo anual de 3 días Caudal mínimo anual de 7 días Caudal máximo anual de 7 días Caudal mínimo anual de 30 días Caudal máximo anual de 30 días Caudal mínimo anual de 90 días Caudal máximo anual de 90 días											
	Grupo 3 Momento de ocurrencia de los caudales extremos anuales	Fecha del máximo caudal de cada año Fecha del mínimo caudal de cada año											
Grupo 4 Frecuencia y duración de los pulsos de caudales altos y bajos	Número de pulsos altos de cada año Número de pulsos bajos de cada año Duración media de los pulsos altos de cada año Duración media de los pulsos bajos de cada año												
Grupo 5 Tasa y frecuencia de los cambios de caudal	Promedio de las tasas de cambio de caudal ascendentes de días consecutivos de cada año Promedio de las tasas de cambio de caudal descendentes de días consecutivos de cada año Cantidad de tasas de cambio positivas de cada año Cantidad de tasas de cambio negativas de cada año												

Las metodologías de determinación de caudales ecológicos seleccionadas para su aplicación en este caso piloto son algunas de las más difundidas a nivel mundial en lo que respecta a métodos hidrológicos. Las mismas se dividen en 3 categorías: métodos que establecen un único valor de caudal ambiental para todo el año, métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año (ciclo medio anual) y métodos que establecen un régimen completo de caudales ecológicos. En la Tabla 1 se presentan las metodologías aplicadas en la cuenca del río Negro.

Es importante destacar que la mayor parte de estos métodos hidrológicos se basan en observaciones, mediciones o resultados obtenidos para determinadas especies de peces, dispersión de contaminantes, recuperación de ríos, etc., ninguna de las cuales fue desarrollada en base a datos de Uruguay y por lo tanto no necesariamente son directamente aplicables en los cursos de nuestro país. Además, los mismos no incorporan una relación explícita entre los componentes hidrológicos y biológicos, lo que constituye una de sus principales limitantes desde el punto de vista teórico.

Por su parte, el método de Richter es el único que considera los cinco componentes del régimen de caudales - magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio - reconocidos como claves en la conservación de la biodiversidad y la integridad ecológica de los ecosistemas fluviales (Poff and Ward, 1989; Karr, 1991; Richter et al., 1996; Poff et al., 1997; Bunn and Arthington, 2002; Lytle and Poff, 2004). Este método presenta condiciones más flexibles para su aplicación fuera del sitio de desarrollo, ya que los parámetros propuestos intentan representar una amplia gama de necesidades ecosistémicas, permitiendo seleccionar los parámetros más representativos de un ecosistema particular. Respecto a su aplicación en este caso de estudio, se determinó un régimen de caudales ecológicos a partir de algunos de los parámetros de Richter, los que se definen en la Tabla 2. Esta selección se realizó siguiendo la propuesta presentada en el trabajo “Caudales ambientales a escala regional: una metodología basada en la clasificación de la variabilidad hidrológica natural” (Bejarano, M.D. et al, 2010).

**Tabla 2.- Régimen de caudal ecológico planteado a partir de los parámetros de Richter**

<b>Caudal mínimo</b>
Años normales: Percentil 10 (“Mínimo anual del caudal medio de 90 días”)
Años normales: Percentil 10 (“Mínimo anual del caudal medio de 30 días”)
<b>Fluctuación estacional de caudales</b>
Años normales: “Ciclo mediano mensual” * Factor proporcionalidad años normales
Años Secos: “Ciclo mediano mensual” * Factor proporcionalidad años secos
<b>Caudal máximo de estiaje</b>
Percentil75 (“Caudal medio Enero”), Percentil75 (“Caudal medio Febrero”), Percentil75 (“Caudal medio Marzo”)
<b>Caudal de avenida</b>
Magnitud y Frecuencia: ajuste a una función de distribución Gumbel de la serie del parámetro “Máximo anual del caudal medio de 1 día” y selección de los caudales correspondientes a 2 años de período de retorno
Momento: Percentil75 (“Fecha del máximo caudal de cada año”)
Duración: Percentil10 (“Duración media de los pulsos altos de cada año”)
Tasas de cambio: intervalo Percentil25-Percentil75 de “Promedio de las tasas de caudal ascendentes de cada año” y “Promedio de las tasas de caudal descendentes de cada año”

*Nota: Entre comillas se indican los parámetros de Richter*

## RESULTADOS

A continuación se presentan, a modo comparativo, los resultados obtenidos mediante las diferentes metodologías consideradas para la estación de aforo caracterizada por el número 8, ver Figura 4 (en adelante “Estación 8”). Los resultados encontrados para las restantes estaciones resultan similares a los presentados para esta estación. En la Tabla 3 se presentan los resultados de la aplicación de los métodos que establecen un único valor de caudal ambiental. Se observa que existe una gran variabilidad en los resultados obtenidos por los diferentes métodos, presentando diferencias de un orden de magnitud. En todos los casos los métodos de QMA y ABF son los más restrictivos mientras que los métodos correspondientes a los caudales de excedencia junto con el Q25 suelen ser los menos restrictivos. El 7Q10 se sitúa en una posición intermedia entre los mismos.

**Tabla 3.-** Resultados de las metodologías que establecen un único valor de caudal ambiental ( $m^3/s$ ) - Estación 8

7Q10	Q95	Q90	Q85	ABF	10%QMA	25%QMA	30%QMA	Q25
10.7	2.6	4.5	6.6	26.1	12.9	32.2	38.7	4.6

Por su parte, en la Tabla 4, se presentan los resultados correspondientes a las metodologías que establecen un valor de caudal ambiental por cada mes del año. Finalmente, en la Tabla 5 se resumen los resultados de la aplicación de la metodología del régimen completo de caudales ecológicos. (parámetros de Richter)

**Tabla 4.-** Resultados de las metodologías que establecen un valor por mes de caudal ambiental ( $m^3/s$ ) – Estación 8

Método/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
NGPRP	5.7	6.6	6.6	42.7	61.7	99.2	132.9	165.8	82.2	31.9	22.9	7.8
QMM	12.5	16.1	18.7	28.1	32.7	51.5	71.4	73.8	47.4	61.1	33.8	17.2

**Tabla 5.-** Resultados de la metodología propuesta basada en los parámetros de Richter que proporciona un régimen completo de caudales ecológicos – Estación 8

<b>Caudal mínimo</b>												
Años normales:	4.4											
Años secos:	1.2											
<b>Fluctuación estacional de caudales</b>												
Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Normales:	4.4	7.7	13.6	23.4	49.8	81.6	136.0	147.2	70.1	127.6	62.2	14.5
Secos:	1.2	2.1	3.7	6.4	13.6	22.3	37.1	40.1	19.1	34.8	17.0	4.0
<b>Caudal máximo de estiaje</b>												
Enero:	17.0											
Febrero:	69.2											
Marzo:	73.4											
<b>Caudal de avenida</b>												
Magnitud:	854.4											
Frecuencia:	2.0											
Momento:	280.0											
Duración:	6.9											
Tasa de cambio ascendente:	6.4		8.5									
Tasa de cambio descendente:	-6.7		-4.7									

*Nota: Los caudales se encuentran en  $m^3/s$ , las frecuencias en días y el resto de los parámetros son adimensionales.*



Estos resultados muestran que en la mayoría de los casos el régimen de caudales ecológicos obtenido por el método NGPRP se asemeja al establecido como el percentil 10 del parámetro de Richter “Caudal mínimo de 90 días” (años normales) y que el régimen de caudales ecológicos dado por el método de QMM suele ser inferior a los mismos y similar superior al percentil 10 del parámetro de Richter “Caudal mínimo de 30 días” (años secos). Asimismo, los resultados obtenidos por los métodos NGPRP y QMM también presentan diferencias significativas entre si, en todos los meses del año.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en la regionalización de los caudales naturales, es posible estimar, el régimen hidrológico natural asociado a cualquier sub-cuenca no aforada, en función del grupo al que pertenezca y de los datos de caudal registrados en las estaciones de aforo existentes dentro de dicho grupo. Obtenido dicho régimen natural de caudales, es posible la aplicación de cualquiera de las metodologías hidrológicas consideradas.

Respecto a los métodos hidrológicos aplicados, puede concluirse que las diferentes propuestas arrojan valores de caudal ambiental significativamente diferentes, dificultando la selección de una metodología como más adecuada.

Asimismo, la mayor parte de dichos métodos se basan en observaciones, mediciones o resultados obtenidos para determinadas especies de peces, dispersión de contaminantes, recuperación de ríos, etc., no necesariamente equivalentes a las de Uruguay. Por su parte, el método de régimen completo de Richter considera los cinco componentes del régimen de caudales - magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio - reconocidos como claves en la conservación de la biodiversidad y la integridad ecológica de los ecosistemas fluviales. El mismo presenta condiciones más flexibles para su aplicación fuera del sitio de desarrollo, ya que los parámetros propuestos intentan representar una amplia gama de necesidades ecosistémicas.

Los elementos mencionados, sumados a la gran variabilidad hidrológica que caracteriza a los cursos de agua en Uruguay sugieren al método de Richter como el más adecuado para ser aplicado en el país. Sin embargo, su correcta aplicación requiere de información acerca de la vinculación que existe entre las necesidades de los ecosistemas con los diferentes componentes del régimen hidrológico mencionados. Si bien, dicha información no se encuentra actualmente disponible en el país, existe interés y compromiso por parte de las instituciones competentes en generarla a corto plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados principales de este trabajo se consiguieron en el marco de una estancia de investigación del primer autor en UPM-España en el marco de la Acción de Coordinación VIAGUA (410AC0399) financiada por CYTED (Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).

## REFERENCIAS

**Bejarano, M. et al.** (2010). “Flow regime patterns and their controlling factors in the Ebro basin (Spain)”. *Journal of Hydrology* 385, 323-335.

**Bunn, S.E., Arthington, A.H.** 2002. “Principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity”. *Environ. Manage.* 30.

**Failache, N et. al** (2006). “Calibración y regionalización de un modelo de balance hídrico mensual en cuencas uruguayas utilizando un algoritmo genético multiobjetivo” XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IHAR-LAD.

**Karr, J.R.** 1991. “Biological Integrity: A Long-Neglected Aspect of Water Resource Management”. Ecological Applications 1.

**Lytle, D.A., Poff, L.N.** 2004. “Adaptation no natural flow regime”. Trends Ecology Evolution 19.

**Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard K.L., Richter B.D., Sparks R.E. & Stromberg J.C.** 1997. “The natural flow regime”. BioScience, 47.

**Poff, N.L., Ward, J.V.** 1989. “Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns”. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 46.

**Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R., Braun, D.P.** (1997). “How much water does a river need?”. Freshwater Biology, 37, 231-249.

**Tharme, R.E.** (2003) “A global perspective on environmental flowassessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers” River Res. Applic. 19: 397–441.

**Temez J.R.**(1977). “Modelo matemático de transferencia precipitación aportación”. *ASINEL* 1977.

**Tennant, D.L.** 1976. ‘Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources’, in Osborn, J.F. and Allman, C.H. (Eds), Proceedings, Symposium and Special