

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

VALIDACIÓN BIOLÓGICA DEL CAUDAL ECOLÓGICO DETERMINADO POR LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS Y DEL CAUDAL BÁSICO DE MANTENIMIENTO: CASO DEL RÍO BUREO

MATÍAS PEREDO-PARADA.¹
DIANA QUEVEDO TEJADA.²
MARCELO VILLARROEL LEÓN.³
GUSTAVO SALCEDO SANDOVAL.⁴
CLAUDIO QUEZADA ROMEGIALLI.⁵

1. RESUMEN

La Dirección General de Aguas en Chile (DGA) establece un caudal ecológico mínimo al momento de otorgar derechos de agua con el fin de mantener la ecología del sistema fluvial. Este caudal ecológico se obtiene mediante métodos exclusivamente hidrológicos, los cuales no necesariamente presentan un fundamento ecológico, por lo tanto, se hace necesario realizar una validación biológica de estos métodos. El objetivo de este estudio es validar biológicamente los dos métodos hidrológicos de la Dirección General de Aguas para 3 especies ícticas nativas y compararlos con la conceptualización biológica del método hidrológico Caudal Básico de Mantenimiento en un tramo del río Bureo.

Los tres métodos hidrológicos de determinación del caudal ecológico fueron aplicados para un tramo del río Bureo (Región del Biobío) asociándolo a la estación fluviométrica Río Bureo en Mulchén. Posteriormente, se determinó el Hábitat Potencial Útil de tres especies nativas mediante simulación del hábitat físico.

Los resultados indican que los métodos aplicados por la DGA no mantienen la distribución temporal intranual del hábitat fluvial bajo condiciones naturales para dos de las tres especies, llegando incluso a invertir su estacionalidad.

Se puede concluir que es necesario revisar la conceptualización ecológica de los métodos de la DGA, con énfasis a la cota superior propuesta en un 20% del caudal medio anual.

¹Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, Universidad de Santiago de Chile–
matias.peredo@usach.cl

²Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, Universidad de Santiago de Chile–
diana.quevedo@usach.cl

³ Profesional, Plataforma de Investigación EcoHyd Ltda

⁴ Profesional, Plataforma de Investigación EcoHyd Ltda

⁵ Fish and Stable Isotope Laboratory, Instituto de Ciencias Naturales Alexander Von Humboldt,
Universidad de Antofagasta.

2. INTRODUCCIÓN

El artículo 129 bis 1 de la Ley 20.017 de 2005, que modificó el Código de Aguas, señala que “al constituir los derechos de aprovechamiento de aguas, la Dirección General de Aguas (DGA) velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo...”

La DGA define al caudal ecológico mínimo como aquel “Caudal que debe mantenerse en un curso fluvial o en específico en cada sector hidrográfico, de tal manera que los efectos abióticos (disminución del perímetro mojado, profundidad, velocidad de la corriente, incremento en la concentración de nutrientes, entre otros) producidos por la reducción de caudal no alteren las condiciones naturales del cauce, impidiendo o limitando el desarrollo de los componentes bióticos del sistema (flora y fauna), como tampoco alteren la dinámica y funciones del ecosistema”.

De esta definición se deduce que el caudal ecológico es entendido como un caudal que debe mantenerse para que la alteración de aspectos físicos de escurrimiento, generada por la reducción del caudal, no produzca alteraciones sobre aspectos ecológicos.

Según el código de aguas (DGA 2008), el caudal ecológico se calculaba como el 10% del caudal medio anual, con un tope del 20% del caudal medio anual. Sin embargo, el reglamento 14 del Ministerio del Medio Ambiente (2012) fijó nuevos criterios para su determinación: 20% del caudal medio mensual con un tope del 20% del caudal medio anual, lo cual dota a este caudal ecológico de una variabilidad mensual. Este criterio fue ajustado en la modificación de dicho reglamento publicado el 15 de enero del 2015. Dicha modificación se basó en “que, la aplicación de los criterios establecidos en el artículo 3° de dicho reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo, han demostrado no ser los más idóneos para cumplir con la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente”. El nuevo criterio se basa en determinar el 50% del caudal mensual con una probabilidad de 95% de excedencia acotado por el 10% del caudal medio anual y el 20% del caudal medio anual como límite inferior y superior, respectivamente.

Existen métodos hidrológicos para determinar el caudal ecológico que han sido aceptados por la comunidad internacional siendo catalogados como con conceptualización holística (Tharme 2003), es decir, consideran al río como un “todo”, ya que se basan en los parámetros del hidrograma que hay que mantener según el paradigma del régimen natural (Poff *et al.* 1997). Uno de ellos es el método del Caudal Básico de Mantenimiento (QBM, Palau 1994, Alcázar y Palau 2010).

Este método consiste en determinar un caudal ecológico basado en la superposición de 6 parámetros que en conjunto mantienen las consideraciones ecológicas asociadas al régimen hidrológico de acuerdo al paradigma del régimen natural (Poff *et al.* 1997). El primer parámetro es el caudal básico (Qb) el cual busca mantener condiciones mínimas de escurrimiento basados en los registros históricos. El segundo parámetro es el caudal de acondicionamiento (Qa), el cual es un caudal suplementario para cubrir los requerimientos ambientales de determinadas especies, actividades, etc. que el caudal básico no es capaz de satisfacer. El tercer parámetro es el caudal de mantenimiento (Qmt); dicho parámetro busca mantener la estacionalidad natural del hidrograma, ajustando mensualmente el caudal básico y el caudal de acondicionamiento. El cuarto parámetro es el caudal generador (Qg), el cual busca mantener las crecidas ordinarias formadoras de la

morfología del cauce. El cuarto parámetro es el caudal máximo (Q_{max}); dicho parámetro busca mantener las crecidas mayores que permiten la interacción entre el río y la zona ripariana. Finalmente, el sexto y último parámetro, tasa de variación (T_a) busca determinar las máximas tasas de variación diarias de caudal permitidas.

Los métodos utilizados por la DGA, al ser exclusivamente hidrológicos y presentar límites inferior y superior, parecieran no tener un fundamento ecológico ni morfológico, es decir, no abordaría aspectos fundamentales del concepto del caudal ecológico, según la propia definición de la Dirección General de Aguas.

En este sentido, se hace necesario validar los métodos propuestos por la DGA para determinar el caudal ecológico para las condiciones locales de especies acuáticas y procesos hidromorfológicos. Un método posible para realizar una validación biológica de un caudal es mediante la determinación del Hábitat Potencial Útil (HPU).

El HPU es la cantidad de hábitat físico de una especie acuática presente en un tramo de río. Esta hábitat físico se calcula a partir de una simulación hidráulica, a escala de microhábitat, de un tramo de río y de la preferencia de hábitat de la especie ante parámetros hidrodinámicos (velocidad media de la columna de agua, profundidad y tipo de sustrato), la cual se denomina como curva de preferencia de hábitat físico. De esta forma, esta curva de preferencia resulta ser una función de transferencia que transforma los resultados de una simulación hidráulica en Hábitat Potencial Útil. Así es posible asociar a un caudal el Hábitat Potencial Útil para un tramo de río en particular. Todo este proceso es denominado como simulación de hábitat físico.

El objetivo de este estudio es validar biológicamente los dos métodos hidrológicos de la Dirección General de Aguas para 3 especies ícticas nativas (*Trichomycterus chiltoni*, *Percilia irwini* y *Galaxias maculatus*) y compararlos con la validación biológica del método hidrológico Caudal Básico de Mantenimiento en un tramo del río Bureo.

Una correcta validación sería aquella que el HPU determinado para cada método se comporte en forma similar a las condiciones naturales, es decir, que mantenga la estacionalidad.

3. METODOLOGÍA

Área de estudio

El río Bureo se encuentra en la VIII región del Biobío cercano a la ciudad de Mulchén, al sur-oeste de Los Ángeles. Está ubicado en la subcuenca del mismo nombre, la que a su vez forma parte de la cuenca del río Biobío. La subcuenca del río Bureo abarca desde el nacimiento del río en la cordillera hasta el punto donde confluye con el río Biobío. El tipo de régimen hidrológico es pluvial en el punto de análisis, concentrándose los mayores caudales medios mensuales en la época invernal (mes de julio) producto de las precipitaciones. La figura 1 muestra zona de estudio y las estaciones fluviométricas que fueron utilizadas en el estudio hidrológico.

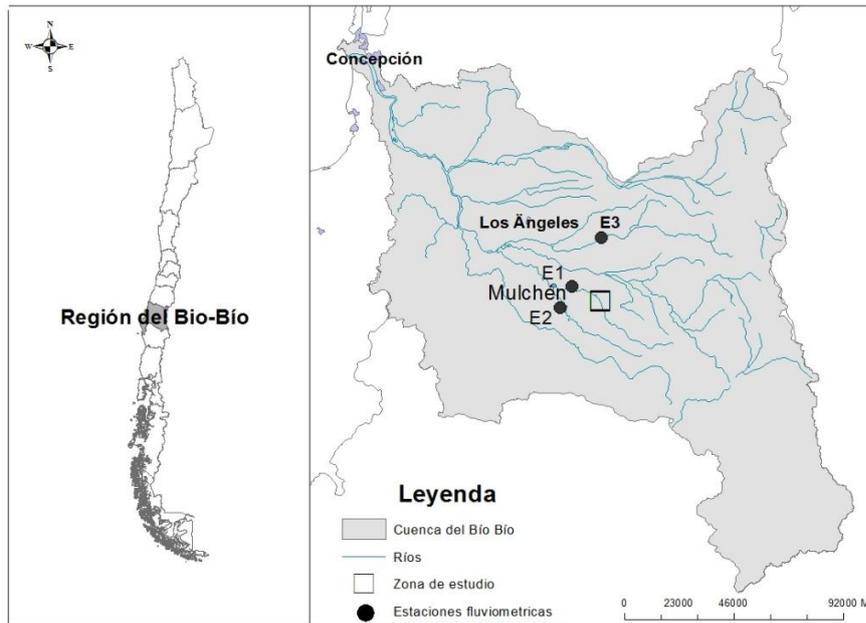


Figura 1. Zona de estudio y estaciones fluviométricas utilizadas.

Determinación de los regímenes de caudal ecológico mediante método DGA

Al tramo de estudio se asoció la estación fluviométrica “Río Bureo en Mulchén” (E1). Dicha estación tiene registro desde 1929 a 2010. Se realizó un análisis de consistencia de los datos usando las estaciones Río Mulchén en Mulchén (E2) y Río Duqueco en Villicura (E3) para el análisis de consistencia y relleno de datos faltantes.

Se determinaron los caudales ecológicos de la DGA según reglamento 14 del Ministerio de Medio Ambiente (Q_{ec2012}), utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{ec2012} = \max[Q_{mmi}; Q_{ma}] \quad (1)$$

En donde

Q_{mmi} es el caudal caudal medio mensual para el mes i

Q_{ma} es el caudal medio anual

Además, se calculó el caudal ecológico según la modificación del 2015 (Q_{ec2015}) para nuevos derechos de agua, utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{ec2015} = \begin{cases} 0,1 * Q_{ma} & \text{Si } 0,5 * Q_{95} \leq 0,1 * Q_{ma} \\ 0,5 * Q_{95} & \text{Si } 0,1 * Q_{ma} \leq 0,5 * Q_{95} \leq 0,2 * Q_{ma} \\ 0,2 * Q_{ma} & \text{Si } 0,5 * Q_{95} \geq 0,2 * Q_{ma} \end{cases} \quad (2)$$

En donde:

– Q_{ma} es el caudal medio anual

- Q_{95} es el caudal mensual asociado a una probabilidad de excedencia igual al 95%

Determinación del régimen de caudal ecológico mediante el método del Caudal Básico de Mantenimiento.

El Caudal Básico de Mantenimiento (QBM) fue implementado siguiendo la metodología de Palau (1994), Alcázar y Palau (2010) y Palau y Alcázar (2010) en el río Bureo (Peredo-Parada *et al.* 2014).

En dicho estudio (Peredo-Parada *et al.* 2014), los parámetros caudal básico (Q_b), caudal de mantenimiento (Q_{mt}), caudal máximo (Q_m) y la tasa de variación fueron obtenidos exclusivamente de la información hidrológica corregida y rellenada de la estación Bureo en Mulchén. Particularmente, el caudal máximo fue obtenido como el caudal de máximo diario para un periodo de retorno de 25 años determinando mediante el ajuste de la función Gamma.

El caudal generador (Q_g) se obtuvo a través de una modelación hidráulica del tramo de estudio, empleando información de secciones transversales a una escala típica de estudios de caudal ecológico, aforos y cotas de lámina de agua para distintos caudales. A partir de dicha información, se estimó el coeficiente de manning asociada a cada sección transversal. Posteriormente, mediante la ecuación de manning, se determinó el caudal asociado a la condición de bankfull.

Debido a que el caudal de acondicionamiento (Q_a) se define como un caudal suplementario y que para el área de estudio no hay conocimiento de alguna actividad recreativa que amerite o necesite la incorporación de este caudal, se consideró que Q_a es nulo para la determinación del caudal de mantenimiento.

Determinación del Hábitat Potencial Útil

La validación biológica se realizó basada en la simulación del hábitat físico para las especies *Trichomycterus chitoni*, *Percilia irwini* y *Galaxias maculatus*. La elección de estas especies se basó en que son especies nativas y que consideran especies de hábitos bentónicos (*T. chitoni* y *P. irwini*) y de hábitos pelágicos (*G. maculatus*).

Se implementó un modelo de simulación del hábitat físico en 1D (PHABSIM, Bovee *et al.* 1998, Waddle 2001) en un tramo de 312 metros, definiéndose 18 perfiles transversales (según Payne *et al.* 2004). El criterio para calibrar y validar dicho modelo fue que la diferencia entre la cota observada y simulada no sea mayor a 5 y 8 cm., respectivamente. La calibración del modelo mostró diferencias entre la cota de la lámina observada y la simulada en torno a los 2,3 cm. La validación mostró diferencia en torno a los 3,6 cm, con lo cual se aceptaron como correctas tanto la calibración, como la validación.

Las curvas de preferencia de hábitat físico (datos no publicados) fueron obtenidas mediante 4 muestreos durante abril del 2013 y diciembre 2014, usando metodología de recolección acorde al hábito del pez. Para *T. chitoni* se colectaron mediante pesca eléctrica, mientras *P. irwini* y *G. maculatus* se realizó observación mediante buceo.

Se simuló el hábitat físico para el rango de caudales medios mensuales de interés obteniendo la curva de habitabilidad (curva que relaciona el caudal con el Hábitat Potencial Útil). A partir de

esta curva se obtuvo el Hábitat Potencial Útil (HPU) y el Hábitat Potencial Idóneo (HPI), el cual es el HPU máximo para el rango de caudales simulado. El HPU se determinó para el caudal ecológico Q_{ec2012} , Q_{ec2015} y para QBM. Además se determinó el HPU para el caudal mensual con una probabilidad igual a 50% ($Q_{50\%}$). Los HPU de los distintos caudales ecológicos se contrastaron con el HPU asociado al $Q_{50\%}$.

4. RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra el régimen de caudales asociado a una probabilidad de excedencia del 50% (régimen natural), el caudal básico de mantenimiento (QBM) y el caudal ecológico determinado bajo el reglamento 14 del MMA (Q_{ec2012}) y su modificación del 2015 (Q_{ec2015}).

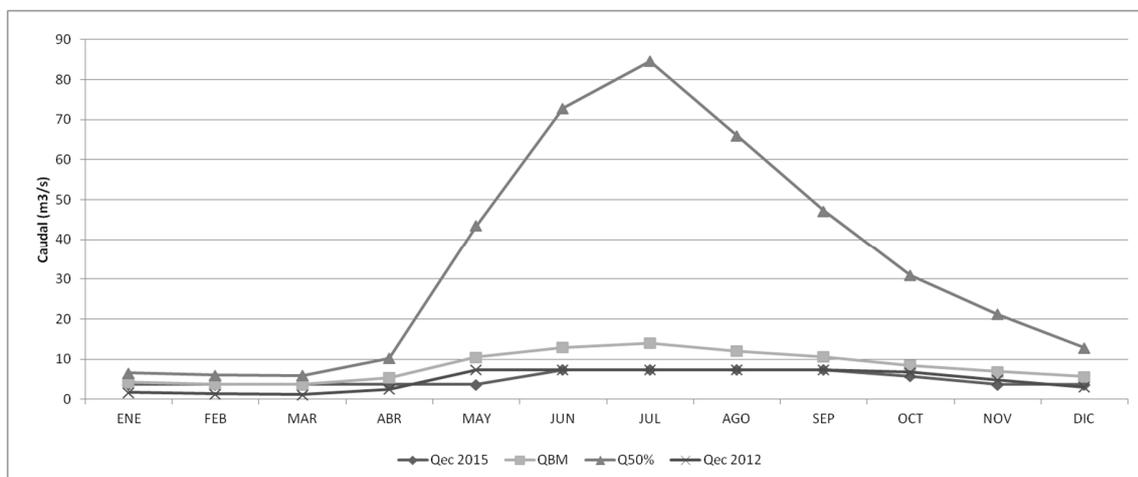


Figura 2. Caudales en régimen natural ($Q_{50\%}$), Caudal Básico de mantenimiento (QBM), y caudales ecológicos determinados por el reglamento 14 (Q_{ec2012}) y su modificación del 2015 (Q_{ec2015})

Se aprecia que el QBM presenta mayores caudales mensuales que los dos métodos de caudales ecológicos propuestos por la DGA, además de una temporalidad mensual más semejante al régimen natural ($Q_{50\%}$).

Se presentan a continuación los resultados del HPU para las especies estudiadas en este río.

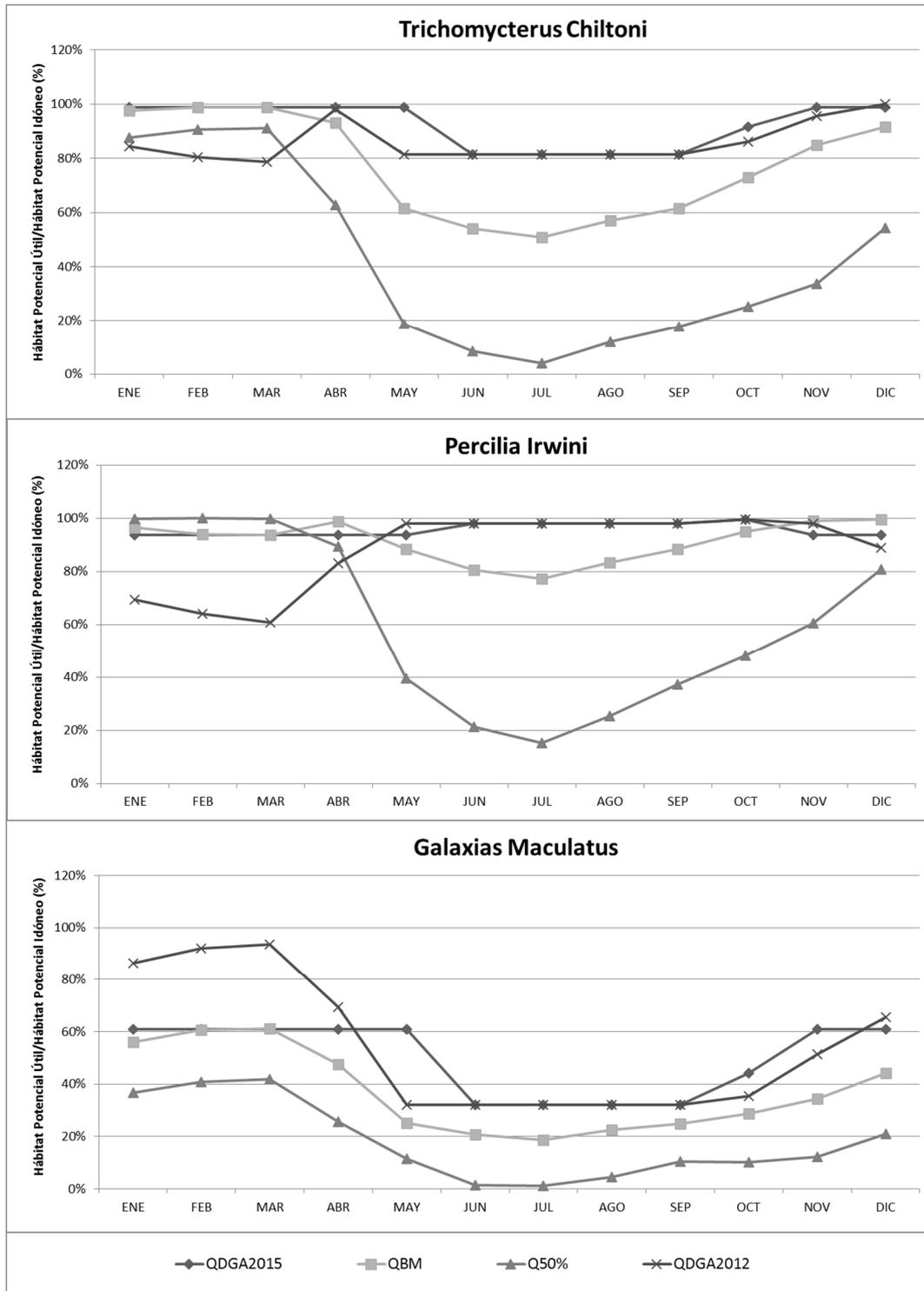


Figura 3 Hábitat Potencial Útil relativo (%) mensual para las especies *T. chiltoni*, *P. irwini* y *G. maculatus* asociado al régimen natural (Q_{50%}), Caudal Básico de Mantenimiento (QBM), caudal ecológico según el reglamento 14 (MMA) (Q_{ec2012}) y su modificación del 2015 (Q_{ec2015}).

En la totalidad de las especies estudiadas se aprecia que, para condiciones de régimen natural ($Q_{50\%}$), el HPU es mayor en condiciones de estiaje que en condiciones invernales. Particularmente, en condiciones de estiaje el HPU es del orden de 90% del HPI para *T. chiltoni*; un 95% del HPI para *P. irwini* y un 40% del HPI para *G. maculatus*. Mientras que en periodo invernal, el HPU decae considerablemente a valores por debajo del 20% del HPI para las tres especies.

El caudal básico de mantenimiento (QBM), aumenta el HPU en todos los meses del año, y además, mantiene la temporalidad intranual de la variación del HPU en condiciones naturales, en las tres especies estudiadas.

El Q_{ec2015} , también aumenta el valor del HPU en todos los meses, sin embargo, en el caso del *T. chiltoni*, la variación intranual es mínima manteniendo un HPU casi constante a lo largo del año, mostrando una diferencia con el comportamiento estacional del régimen natural. Para *P. irwini*, el caso es similar, pero esta vez el comportamiento intranual se invierte levemente, mostrando mayor HPU en época invernal y un menor HPU en estiaje. Para *G. maculatus* no presenta mayor diferencia con las condiciones naturales.

El Q_{ec2012} , es el método que presenta mayores diferencias. Para *T. chiltoni* presenta HPU menores que la condición natural en meses de estiaje. Además presenta un comportamiento casi constante a lo largo del año. Para *P. irwini*, el comportamiento intranual es completamente opuesto al comportamiento natural, evidenciando una inversión de la disponibilidad de hábitat presente en el tramo de río para el régimen de caudales. En caso de *G. maculatus*, el comportamiento del HPU es similar a las condiciones naturales.

5. DISCUSIÓN

Se observa que la determinación del caudal ecológico mediante métodos hidrológicos es sencilla en los tres casos en estudio, sin embargo, los resultados pueden resultar dispares desde el punto de vista ecológico. Se aprecia que existen especies que el comportamiento intranual del HPU no resultaría adecuado para sus hábitos reproductivos.

Bajo el objetivo del concepto de caudal ecológico definido por la DGA, el cual es que las alteraciones físicas del escurrimiento no alteren las condiciones biológicas, se esperaría que el HPU del caudal ecológico se comporte en forma similar a las condiciones naturales, es decir, que los mayores HPU ocurran en meses de estiaje y los menores en meses invernales.

En este sentido, el Q_{ec2015} y Q_{ec2012} , presenta comportamientos distintos para las especies *T. chiltoni* y *P. irwini*, ya sea, mostrando un HPU casi constante a lo largo del año, o bien, invirtiéndolo con respecto a condiciones naturales.

Para el primer caso, es sabida la eliminación, por parte de la comunidad científica nacional e internacional, la determinación del caudal ecológico como un caudal constante a lo largo del año, ya que evitaba mantener condiciones constantes a lo largo del año, hecho que también fue reconocido por la DGA, modificando el método para determinar el caudal ecológico desde uno constante (10% del caudal medio anual) a uno con variación estacional. Sin embargo, dicha modificación pareciera no ser suficiente para asegurar un comportamiento estacional (mensual) del HPU.

Con respecto a la inversión del comportamiento temporal del HPU, esto se hace evidente tanto en el método Q_{ec2012} , en donde la inversión ocurre principalmente en época de estiaje, con lo cual la determinación del caudal ecológico mensual igual al 20% del caudal medio mensual pareciera no ser adecuado para mantener la ecología en estiaje.

Tanto la inversión del HPU como que éste permanezca constante, pareciera no ser de un método hidrológico en específico (Q_{ec2012} o Q_{ec2015}), sino más bien por la cota superior impuesta para ambos métodos (20% del caudal medio anual), el cual impide aumentar el caudal en época de invierno y disminuir el HPU. Por contrario, el QBM no presenta dicha restricción logrando mantener el comportamiento temporal del HPU en las tres especies.

Es necesario tener en cuenta que la validación biológica aquí expuesta solo se remite a tres especies icticas, donde se intentó abordar especies de comportamiento pelágicos (*G. maculatus*) y comportamiento bentónicos (*T. chiltoni* y *P. irwini*). Con lo cual se hace necesario profundizar en este tipo de validación incluyendo otros componentes del sistema fluvial, como macroinvertebrados, flujos de nutrientes, flujos de energía, flujos de sedimentos, zona hiporreica, zona ripariana, flujo térmico, etc. En este sentido, también se quiere dar a entender que los resultados mostrados referentes al aumento del HPU al reducir el caudal, podrían verse como beneficioso para estas especies, sin embargo, esto no puede ocurrir durante todo el año, ya que es necesario compatibilizar con los componentes mencionados anteriormente.

6. CONCLUSION

Se determinó el caudal ecológico mediante tres métodos hidrológicos, los cuales resultaron ser sencillos de determinar.

En general los tres métodos utilizados presentaron aumentos en el Hábitat Potencial Útil con respecto a condiciones naturales. Sin embargo, las diferencias radican en el comportamiento mensual del Hábitat Potencial Útil. Dentro de los métodos hidrológicos implementados, el Caudal Básico de Mantenimiento conserva el comportamiento intranual de las condiciones naturales para las tres especies (Hábitat Potencial Útil cercano al máximo en estiaje y menores en invierno).

Los dos métodos utilizados por la Dirección General de Aguas (Q_{ec2012} y Q_{ec2015}) presentan diferencias con el comportamiento intranual del Hábitat Potencial Útil, en algunos casos manteniéndolo constante a lo largo del año y en otros invirtiendo su variación estacional.

Se aprecia que el método del Caudal Básico de Mantenimiento presenta mayor conceptualización ecológica que ambos métodos de la Dirección General de Aguas, siendo su limitante la imposición de no excedencia del 20% del caudal medio anual.

Se puede concluir que es necesario revisar la conceptualización ecológica de los métodos de la Dirección General de Aguas, con énfasis a la cota superior propuesta en un 20% del caudal medio anual.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcázar J. y A. Palau. 2010. Establishing environmental flow regimes in a Mediterranean watershed based on a regional classification. *Journal of Hydrology* 388:41–5.

Bovee K., B. Lamb, J. Bartholow, C. Stalnaker, J. Taylor y J. Henrisen. 1998. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004 viii 131 p.

DGA. 2008. Manual de Norma y Procedimientos para la administración de Recursos Hídricos.

Ley 20.017 de 16 de junio de 2005. Modifica el Código de Aguas.

Palau A. 1994. Los mal llamados caudales "ecológicos". Bases para una propuesta de cálculo. *Obra Pública* n1 28 (Ríos II), 84-95.

Palau A. y J. Alcázar. 2010. The Basic Flow Method for Incorporating Flow Variability in Environmental Flows. *River Research and Applications*. doi: 10.1002/rra.1439.

Payne T.R., S.D. Eggers y D.B. Parkinson. 2004. The Number of Transects Required to Compute a Robust PHABSIM Habitat Index. *Hydroecol. Appl.* Tome 14 Vol. 1, 27-53.

Peredo-Parada M., G. Salcedo y D. Quevedo. 2014. Determinación del caudal ecológico mediante el método Caudal Básico de Mantenimiento en el río Bureo. XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Agosto, 2014. Santiago, Chile.

Poff. L., D. Allan, M. Bain, J. Karr, K. Prestegard, B. Richter R. Sparks y J. Stromberg. 1997. The Natural Flow Regime. *BioScience* 47(11): 769-784.

Tharme R. 2003. A Global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19: 397–441 pp.

Waddle T. 2001. PHABSIM for Windows. User's Manual and Exercises. U.S. Geological Survey USGS. Midcontinent Ecological Science Center. Open File Report 01-340. 299 p.