

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL PEZ NATIVO *PERCILIA IRWINI*

ALEX GARCÍA¹
CATTERINA SOBENES^{1,2}
OSCAR LINK³
EVELYN HABIT¹

RESUMEN

Se determinó en forma experimental el modelo bioenergético de la tasa metabólica estándar (SMR) y la tasa metabólica activa (AMR) para la especie nativa de agua dulce *Percilia irwini* como herramienta para estudios de ecodinámica. El experimento consistió en exponer a los peces a velocidades de 5, 15, 25 y 35 cm s⁻¹, mientras se registraba el contenido de oxígeno disuelto en el agua. La SMR fue 230,4 mg O₂ h⁻¹ kg⁻¹. Se encuentra que la velocidad del escurrimiento tiene poca incidencia en el metabolismo activo cuando el pez puede apoyarse en el fondo para mantener su posición, pero es el factor principal cuando debe nadar para mantener su posición. Se discute cómo el alcance metabólico y la capacidad de nado se relacionan con la respuesta de los peces a los pulsos de caudal producidos durante la operación de represas.

¹Estudiante doctorado, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción - mail: alexgarcia@udec.cl

¹Estudiante doctorado, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción, ²Departamento de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Universidad Católica de la Santísima Concepción - mail: csobenes@udec.cl

³Profesor asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción - mail: olink@udec.cl

¹Profesor asistente, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción - mail: ehabit@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

Percilia irwini es una especie de pez endémico de Chile, de pequeño tamaño (6,0 cm longitud total típica; 9,6 cm longitud máxima), que se encuentra presente sólo en las cuencas de los ríos Biobío y Andalién en la región del Biobío (Habit y Belk, 2007). Es una especie que está clasificada como en peligro (Minsegespres, 2008). Una de las principales amenazas a esta especie es la operación de las represas como centrales hidroeléctricas de punta o ‘hydropeaking’, principalmente en la época de estiaje (García et al., 2011). En la zona media del río Biobío, la operación de la central hidroeléctrica Pangué produce fluctuaciones de caudal que se observan hasta 100 km aguas abajo y que cambian la distribución y calidad del hábitat físico para *P. irwini* (García et al., 2011). A pesar de la relevancia que tiene la conservación de *P. irwini*, en la actualidad no existen estudios que relacionen la fisiología de esta especie con diferentes flujos de caudal. En particular, estudios de respirometría con individuos que cubran un rango amplio de tallas y velocidades pueden dar indicios sobre su tasa metabólica y su capacidad de nado. Así, estudios fisiológicos pueden ser relacionados con condiciones hidráulicas en el río Biobío, y pueden ser aplicadas como una herramienta ecohidráulica para caracterizar efectos potenciales de los pulsos de caudal sobre especies en peligro de extinción.

Los modelos bioenergéticos han sido utilizados para caracterizar la tasa metabólica estándar (SMR) y la tasa metabólica activa (AMR) para diversas especies. La SMR es el consumo de energía mínimo para un pez en reposo, mientras que la AMR es el costo energético total asociado al nado y pueden ser expresados como $\text{mg O}_2 \text{ h}^{-1}$ ó cal h^{-1} (mg de oxígeno o calorías consumidas por hora) o por unidad de peso del pez como $\text{mg O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. SMR puede ser expresado como un único valor para una especie (a cierta temperatura), mientras que AMR está determinado por la temperatura, la masa del pez, y la velocidad a la que esté expuesto (Boisclair y Tang, 1993; Ohlberger et al., 2005). Las tasas metabólicas estándar y activa determinan aspectos tales como maduración, crecimiento, territorialidad, interacciones predador-presa y dispersión, que son claves en el desarrollo y la sobrevivencia de los peces. Peces con una tasa metabólica estándar mayor maduran antes y tienden a ser más dominantes (McCarthy, 2000). AMR está directamente relacionada con la capacidad de nado, donde las especies mejor adaptadas a velocidades altas tienen un costo energético menor al nadar. La energía asociada al metabolismo activo es muy variable y puede llegar a constituir el 40% de la energía total de un pez (Hölker y Breckling, 2002). Por lo tanto, es relevante determinar un modelo para la AMR que permita relacionar el gasto energético con las condiciones del flujo y/o los patrones de movimiento de los peces. Por otro lado, un mayor alcance metabólico, es decir, la diferencia entre el gasto energético máximo y mínimo, significa más energía disponible para los peces para crecer y/o reproducirse.

El objetivo de este trabajo es describir un modelo bioenergético para SMR y AMR para el pez nativo *P. irwini*. Se entrega el alcance metabólico y se da una caracterización preliminar de su capacidad de nado, que puede ser relacionada con la respuesta de los peces a los pulsos de caudal producidos durante la operación de represas, la principal amenaza para la conservación de esta especie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Mantenimiento de peces en cautiverio y respirometría

Los peces fueron capturados en el río Biobío y mantenidos en acuarios de vidrio en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción, en condiciones adecuadas para su experimentación (Sobenes et al., en revisión). Se trabajó con nueve individuos, con tallas entre 4,2 y 7,4 cm de largo total. Los experimentos se realizaron en un respirómetro de tipo Blazka (Blazka et al. 1960) inmerso en un tanque de 40 l con temperatura estable. El respirómetro fue construido en acrílico y consiste de un cilindro exterior de 40 cm de largo con un diámetro de 8,89 cm y un cilindro interior de 26 cm de largo y 5,71 cm de diámetro (Figura 1). La velocidad dentro del respirómetro fue controlada por medio de un variador de frecuencia (Siemens, Micromaster 420) conectado a una bomba eléctrica (Little Giant 3E-12NR) que recirculaba el agua. La velocidad del agua dentro del cilindro interior fue calibrada con un tubo pitot estático. La velocidad en el respirómetro podía ser ajustada entre 0 y 40 cm s^{-1} , equivalente a números de Reynolds entre 0 y 23000. La temperatura y la concentración de oxígeno disuelto en el respirómetro fueron registrados cada 5 segundos con una sonda StirrOX-G y un oxímetro InoLab Oxi730 (WTW) conectados a un computador con el software MultiLab Pilot ®.

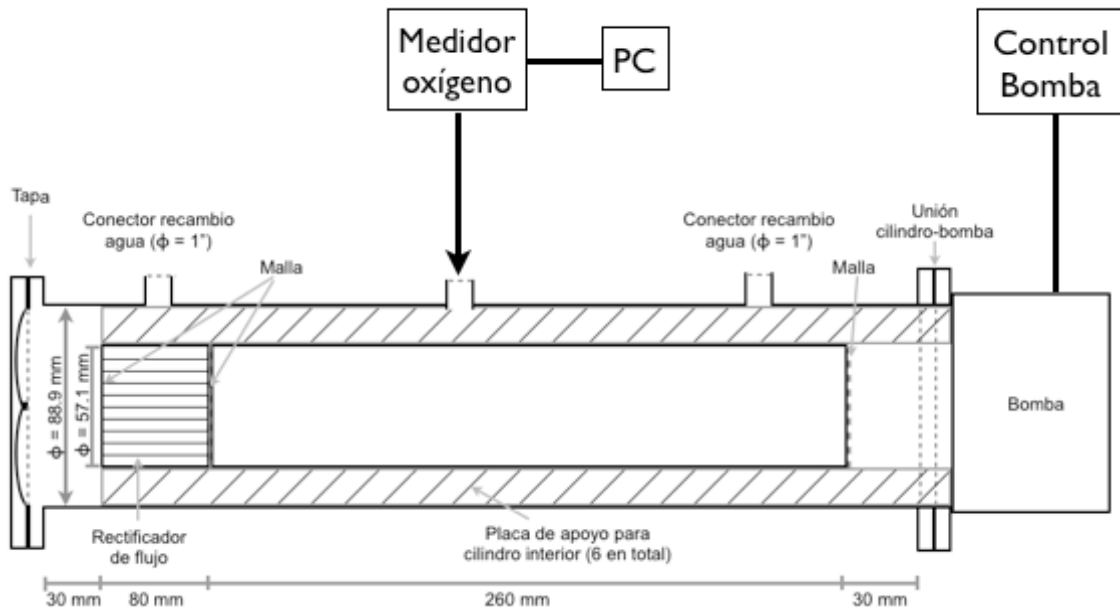


Figura 1: Esquema de la instalación experimental.

Procedimiento experimental

Los experimentos se realizaron en verano de 2011 a $19,5 \pm 0,5$ °C, que es la temperatura media en verano en los hábitats que ocupa *P. irwini* en la zona media del río Biobío. Las tasas de consumo de oxígeno de cada pez fueron registradas a velocidades de 5, 15, 25 y 35 cm s^{-1} . Cada pez fue expuesto a velocidades bajas en el respirómetro por 24 horas para

evaluar su comportamiento en condiciones experimentales antes de realizar las mediciones de oxígeno. Al siguiente día, el experimento comenzó con el cierre hermético del respirómetro y el registro de oxígeno disuelto en el agua. El pez era expuesto a cada una de las velocidades (5, 15, 25 y 35 cm s⁻¹) por 1 hora, con descansos de 30 minutos a 2 cm s⁻¹ entre mediciones. El agua dentro del respirómetro era cambiada cuando los niveles de oxígeno disuelto bajaban a 8 mg l⁻¹. Después de las mediciones, el pez era retirado del respirómetro, pesado ($\pm 0,01$ g), medido (± 1 mm), devuelto a su acuario y alimentado de forma normal. Luego se realizaba una medición de oxígeno disuelto sin el pez para determinar el consumo de oxígeno basal (bacterias).

Análisis de datos

La respiración total (R_T , mg O₂ l⁻¹ h⁻¹) fue calculada por la regresión lineal entre la concentración de oxígeno disuelto en el agua versus tiempo, donde la pendiente de la regresión representa la respiración total. La respiración del pez se obtiene restando la respiración total menos la bacteriana (R_B , mg O₂ h⁻¹). Por lo tanto, la tasa de consumo de oxígeno (MO , en mg O₂ h⁻¹) de cada pez queda dada por la siguiente ecuación:

$$MO = (R_T - R_B) V_R \quad (1)$$

Donde V_R es el volumen del respirómetro (2,75 l). Las tasas de consumo de oxígeno peso específicas (es decir, tasas de consumo de oxígeno divididas por unidad de peso de los individuos) fueron comparadas con el test t de Student ($\alpha=0.05$) para evaluar diferencias significativas en la respiración de los peces.

Modelo bioenergético

SMR peso específica fue estimada extrapolando la regresión de MO peso específica a velocidad nula (0 cm s⁻¹) (Brett, 1964). AMR fue definida como una función potencia de la masa del pez y la velocidad del flujo (Boisclair y Tang, 1993; Ohlberger et al., 2005), según se muestra en la ecuación 2:

$$AMR = a M^b U^c \quad (2)$$

Donde AMR es la tasa metabólica activa (mg O₂ h⁻¹), M es la masa del pez (g), U es la velocidad del flujo (cm s⁻¹), a , b , c son coeficientes a determinar. El modelo se aplicó a los datos registrados a 5 y 15 cm s⁻¹ en forma independiente de los datos registrados a 25 y 35 cm s⁻¹ para evaluar el efecto del cambio en la forma de mantener una posición (apoyándose a velocidades bajas y nadando a velocidades mayores) sobre el AMR. Los modelos fueron (log) linealizados (Boisclair y Tang, 1993) y los parámetros fueron calculados en InfoStat (Di Rienzo et al., 2010). El alcance metabólico fue estimado como la diferencia entre las tasas de consumo a 35 y 5 cm s⁻¹. Se ajustó una regresión lineal a esta diferencia para determinar la tendencia del alcance metabólico con la masa del pez.

3. RESULTADOS

Todos los peces se mantuvieron reposando en la base del respirómetro para flujo en régimen laminar (2 cm s^{-1}). A velocidades de 5 y 15 cm s^{-1} ($Re < 8600$) los peces podían mantener su posición apoyándose con sus aletas y nadando con movimientos esporádicos de su aleta caudal (i.e. la aleta de la cola). A velocidades de 25 y 35 cm s^{-1} ($Re = 14275$ y 19985 respectivamente) la actividad natatoria aumentó rápidamente.

El consumo de oxígeno fue diferente entre las cuatro velocidades consideradas ($t < -4.0$, $p < 0.001$ en todos los casos) y aumentó con la masa del pez y la velocidad del flujo. La Figura 2 muestra MO_{pe} peso específico en función de la velocidad del flujo. La extrapolación de estos datos a velocidad nula indica que SMR peso específica es $230.4 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ (límites al 95%: $210.6 - 252.1 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $t = 122$, $p < 0.0001$).

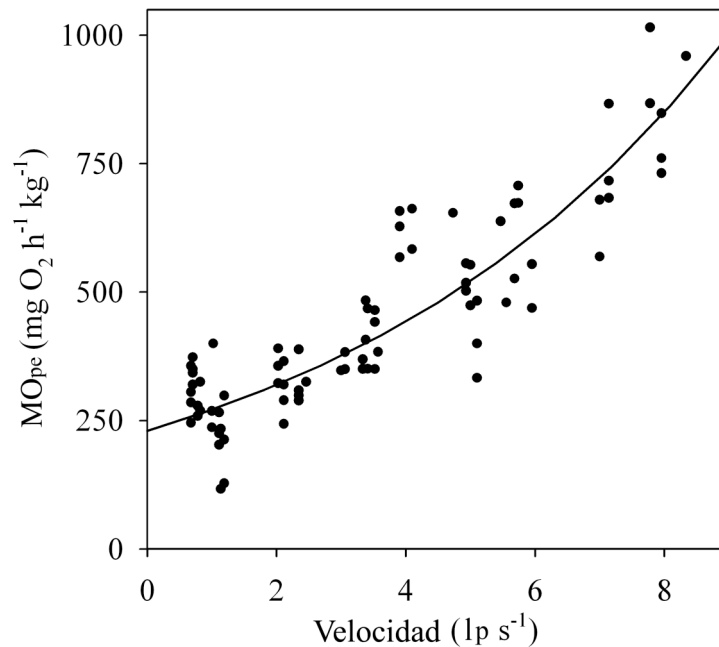


Figura 2: Consumo de oxígeno peso específico (MO_{pe} kg^{-1}) relacionado con velocidad relativa (como longitud de pez 'lp' por segundo).

La masa y la velocidad del flujo explican el 86 y 83% de la variabilidad de AMR para *P. irwini* a velocidad baja y alta, respectivamente (Tabla 1). Los modelos de AMR indican que el costo de mantener una posición a velocidades bajas está determinado principalmente por el peso, mientras que el costo de nadar a velocidades altas está determinado principalmente por la velocidad (Figura 3 y Tabla 1). La Figura 3.a muestra la representación de AMR (ambos modelos) como función de la masa y la velocidad. La Figura 3.b muestra un buen ajuste de los modelos para AMR con los datos observados. La Figura 4 indica el alcance metabólico, donde se observa que los peces más pequeños consumen menos oxígeno (por unidad de peso) nadando a velocidades altas (35 cm s^{-1}). Además, la diferencia entre consumo de oxígeno por unidad de peso máximo (35 cm s^{-1}) y mínimo (5 cm s^{-1}) es inversamente proporcional a la masa y puede ser ajustado a la ecuación lineal: $\Delta MO = 814 - 168M$ ($\text{mg O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) ($R^2 = 0.72$, $F_{1,47} = 121$, $p < 0.001$).

Tabla 1: Modelos de AMR para *Percilia irwini* ($p < 0.001$ en ambos casos).

Modelo	Estimador a (EE)	95% IC		Estimador b (SE)	95% IC		Estimador c (SE)	95% IC		R^2	F
		Menor	Mayor		Menor	Mayor		Menor	Mayor		
1	0.16 (0.06)	0.12	0.21	1.16 (0.08)	1.01	1.32	0.23 (0.06)	0.11	0.36	0.86	128.6
2	0.026 (0.25)	0.008	0.083	0.77 (0.06)	0.65	0.89	0.97 (0.17)	0.63	1.30	0.83	98.1

Los parámetros incluyen su error estándar (EE) y el intervalo de confianza al 95%.

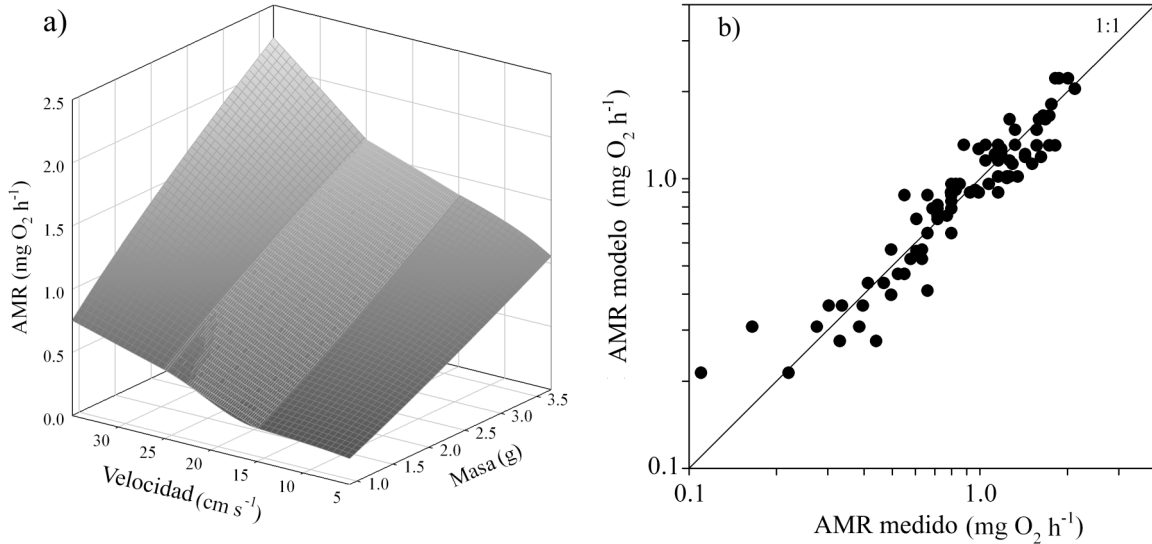


Figura 3: a) Modelo de AMR para *P. irwini* para velocidad baja y alta. A la derecha está el Modelo 1 ($F_{2,42}=128.6$, $p < 0.0001$, $R^2=0.85$) para velocidad ≤ 15 cm s⁻¹, a la izquierda está el modelo 2 ($F_{2,39}=98.1$, $p < 0.0001$, $R^2=0.83$) para la velocidad entre 25 to 35 cm s⁻¹. La zona de transición entre los modelos fue interpolada linealmente y se representa con el gris más claro. b): Ajuste entre AMR modelado y medido.

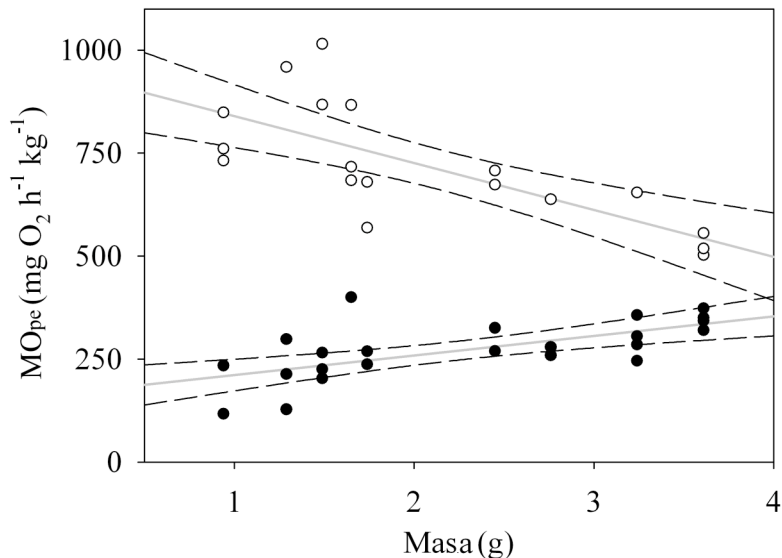


Figura 4: MO peso específico relacionado con la masa del pez. Los puntos representan mediciones de MO por unidad de peso del pez, las líneas sólidas son líneas de regresión a los datos (para 5 y 35 cm s⁻¹) y las líneas segmentadas representan el intervalo de confianza del 95% para las regresiones.

4. DISCUSIÓN

La estimación de SMR igual a $230.4 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ para *P. irwini* a $19.5 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ representa los niveles mínimos de gasto energético que se puede observar para un pez en reposo. Este valor es comparable al de otras especies similares (Clausen, 1936), pero es mayor que para especies que viven en la columna de agua como el salmón Atlántico (*salmo salar*, $112 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ a $18.6 \text{ }^\circ\text{C}$, Maxime et al 1989). Este experimento además muestra que los peces más pequeños presentan un alcance metabólico (por unidad de peso) mayor, lo que indica un mayor potencial para crecer y reproducirse, tal como lo reportaron Aedo et al. (2009) para *P. irwini* en los ríos Andalién y Biobío.

El AMR de *P. irwini* está más influenciado por la masa del pez a velocidades bajas (15 cm s^{-1}) y por la velocidad a velocidades más altas (25 y 25 cm s^{-1}). Esto se produce por el cambio en el comportamiento para mantener una posición al pasar del estado de reposo al estado de nado forzado para una velocidad cercana a los 15 cm s^{-1} ($\text{Re}=8600$). En particular, el modelo de AMR para velocidades altas para *P. irwini* es similar al de una carpa (*Cyprinus carpio*, $b=0,8$; $c=0,95$) (Ohlberger et al., 2005). El exponente de la masa menor que 1 (modelo 2) indica que los peces más grandes necesitan proporcionalmente menos energía que los pequeños para nadar, mientras que el exponente mayor que 1 (modelo 1) indica que los más pequeños necesitan proporcionalmente más energía para mantener una posición a velocidades bajas. Una especie está mejor adaptada para nadar mientras más bajo es el exponente para la velocidad. *Percilia irwini* se encuentra en grandes abundancias en rápidos de hasta $1,5 \text{ m s}^{-1}$ en la zona media del río Biobío (García et al., 2011); sin embargo, de este experimento se desprende que esta especie no es capaz de soportar velocidades tan altas. Esto significa que los individuos observados en rápidos necesariamente permanecen gran parte del tiempo entre la graba o a una distancia corta sobre el lecho, dentro (o cerca de) la subcapa laminar.

Las condiciones de flujo variable que ocurren en el río Biobío debido a la operación de la central hidroeléctrica Pangué cambian los perfiles de velocidad y pueden disminuir el espesor de la subcapa laminar, con una consiguiente exposición de los peces a velocidades y fuerzas de arrastre mayores que en condiciones previas. Esta situación puede arrastrar individuos hacia aguas abajo o al menos aumentar el gasto energético necesario para mantener una posición o para moverse en el río. Por lo tanto, los pulsos de caudal son una amenaza real para *P. irwini* que puede ser registrada a nivel de individuos. Una reducción de la energía disponible de un individuo disminuye su potencial para crecer y reproducirse, lo que trae consecuencias negativas a nivel de poblaciones en el largo plazo. Este trabajo muestra cómo la interacción de conocimiento biológico con la hidráulica puede ser utilizado como herramienta ecohidráulica para evaluar efectos potenciales de actividades humanas en ríos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología CONICYT por el financiamiento dado a través de las becas doctorales D-21070133 y D-21080436, y el proyecto CONICYT AT-24091002.

REFERENCIAS

- Aedo, J. R., M. C. Belk, y E. M. Habit. 2009. Geographic variation in age, growth and size structure of *Percilia irwini* from south-central Chile. *Journal of Fish Biology* 74:278-284.
- Blazka, P., M. Volf, y M. Celepa. 1960. A new type of respirometer for determination of the metabolism of fish in an active state. *Physiologia Bohemoslovenica* 9:553-558.
- Brett, J. R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 21:1183-1226.
- Boisclair, D., y M. Tang. 1993. Empirical analysis of the influence of swimming pattern on the net energetic cost of swimming in fishes. *Journal of Fish Biology* 42:169-183.
- Clausen, R. G. 1936. Oxygen consumption in fresh water fishes. *Ecology* 17:216-226.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C. W. Robledo 2010. InfoStat manual. Grupo InfoStat, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- García, A., K. Jorde, E. Habit, D. Caamaño, y O. Parra. 2011. Downstream environmental effects of dam operations: changes in habitat quality for native fish species. *River Research and Applications* 27:312-327.
- Habit, E., y M. C. Belk. 2007. Threatened fishes of the world: *Percilia irwini* (Eigenmann 1927)(Perciliidae). *Environmental Biology of Fishes* 78:213-214.
- Hölker, F., y B. Breckling. 2002. Influence of activity in a heterogeneous environment on the dynamics of fish growth: an individual-based model of roach. *Journal of Fish Biology* 60:1170-1189.
- McCarthy, I.D. 2000. Temporal repeatability of Standard metabolic rate in juvenile Atlantic salmon and its relation to life history variation. *Journal of Fish Biology* 57:224-238.
- MINSEGPRES, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. "Nómina para el tercer proceso de clasificación de especies según su estado de conservación" En Diario oficial de la República de Chile, lunes 30 de junio de 2008.
- Ohlberger, J., G. Staaks, P. L. van Dijk, y F. Hölker. 2005. Modelling energetic costs of fish swimming. *Journal of Experimental Zoology* 303:657-664.
- Sobenes, C., A. García, E. Habit, y O. Link. En revisión. Mantención de peces nativos dulceacuícolas en cautiverio: un aporte a su conservación *ex situ*.