

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EFECTO DE VÓRTICES DE ESTELA EN LA NATACIÓN DE PECES NATIVOS
CHILENOS**

CLAUDIA SANHUEZA C.¹
OSCAR LINK L.²
EVELYN HABIT C.³

RESUMEN

Se presenta una instalación experimental y resultados parciales para caracterizar el efecto de vórtices de estela sobre la natación de peces nativos chilenos. En particular, se muestran resultados para las especies *Basilichthys microlepidotus* y *Cheirodon galusdae*. Se estudió la capacidad de nado mediante ensayos de velocidad incremental y mediante PIV la vorticidad, frecuencia y diámetro de vórtices de estela generados aguas abajo de un cilindro vertical de sección circular montado al centro de una canaleta experimental de 6 m de longitud, 0.4 m de ancho y 0.4 m de profundidad máxima. En el flujo se introdujeron individuos de ambas especies y, se caracterizó su comportamiento y natación en términos de la frecuencia de coleteo y amplitud del movimiento en distintos campos de flujo que se generaron cambiando el diámetro del cilindro y las condiciones hidráulicas del escurrimiento. Se observó que al aumentar el diámetro de los cilindros, los individuos nadan más alejados del fondo y disminuyen los signos de fatiga alejándose de esquinas y explorando el flujo con mayor libertad. Los resultados muestran un aumento en la amplitud de movimiento de cola del pez con el tamaño de los vórtices de estela aguas abajo del cilindro, que puede alcanzar hasta 50% en ambas especies sin distinción de género. Por otro lado, la frecuencia de coleteo de *Cheirodon galusdae* muestra un aumento, mientras que, *Basilichthys microlepidotus*, no muestra variaciones significativas.

¹ Ingeniero Civil y tesista de MSc, Depto Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – clasanhueza@udec.cl

² Profesor Asociado, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - olink@udec.cl

³ Profesor Asociado, Centro EULA, Universidad de Concepción – ehabit@udec.cl

1 INTRODUCCIÓN Y RELEVANCIA

La ictiofauna continental chilena se desarrolló en un territorio geográfico aislado, lo cual se ve reflejado en el alto grado de endemismo que la caracteriza (Habit y Victoriano, 2012). Un alto porcentaje de las especies ícticas están clasificadas en categorías de peligro o vulnerabilidad (~90%), a lo cual se suma el desarrollo esperado de aproximadamente 1000 proyectos de mini-centrales hidroeléctricas que, al fragmentar longitudinalmente el hábitat fluvial de estas especies, constituye una amenaza para su conservación. Una medida de mitigación, consiste en evitar la fragmentación total del hábitat mediante una obra para el paso de peces.

Distintos autores (Lupandin, 2005; Liao 2003, 2007; Tritico y Cotel, 2010; Lacey, 2012) han estudiado el efecto de vórtices en el comportamiento y la natación de los peces, observando que la presencia de vórtices genera un aumento en la amplitud de los movimientos de los peces y, que se produce una sincronización entre los movimientos de la cola con la frecuencia de los vórtices lo que, se ha mostrado, genera un ahorro en la energía utilizada por el pez para nadar. Por otro lado, observaciones de terreno muestran que los peces suelen utilizar las estelas como refugio, por lo que estas resultarían muy útiles como elementos de una obra para el paso de peces.

En este estudio, se trabajó con individuos de la especie *Basilichthys microlepidotus* (pejerrey chileno) y *Cheirodon galusdae* (pocha de los lagos), consideradas relevantes y representativas de la ictiofauna chilena. En laboratorio se midió la capacidad de nado a través de la prueba de velocidad incremental, a fin de determinar las condiciones experimentales apropiadas para el estudio de natación e interacción con vórtices de estela.

Debido a las dificultades de estudiar la turbulencia en terreno, los estudios en laboratorio suelen generar turbulencia a través de un cilindro vertical. Esto genera estelas similares a las rocas (Acharya *et al.*, 2000) pero con la ventaja de presentar condiciones mucho más controladas.

Para describir la turbulencia se adoptó el marco conceptual propuesto por Lacey *et al.* (2012) denominado IPOS, que considera la intensidad, periodicidad, orientación y escala de los vórtices.

2 METODOLOGÍA

Instalación experimental

El estudio se realizó en un canal con 6.0 x 0.4 x 0.4 m de largo, ancho y alto, respectivamente ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción. El canal forma parte de un circuito de recirculación. En la entrada del canal se encuentra un aquietador de corriente y aguas abajo se ubica la sección de medición donde se instaló el equipo PIV. En la salida del canal se encuentra una compuerta vertical de altura regulable. El canal vierte a un sedimentador. El flujo es generado por una bomba centrífuga con un caudal máximo de 130 l/s. El caudal se controla con un flujómetro diferencial con precisión de 2 l/s. La Figura 1 muestra la instalación experimental, de forma esquemática.

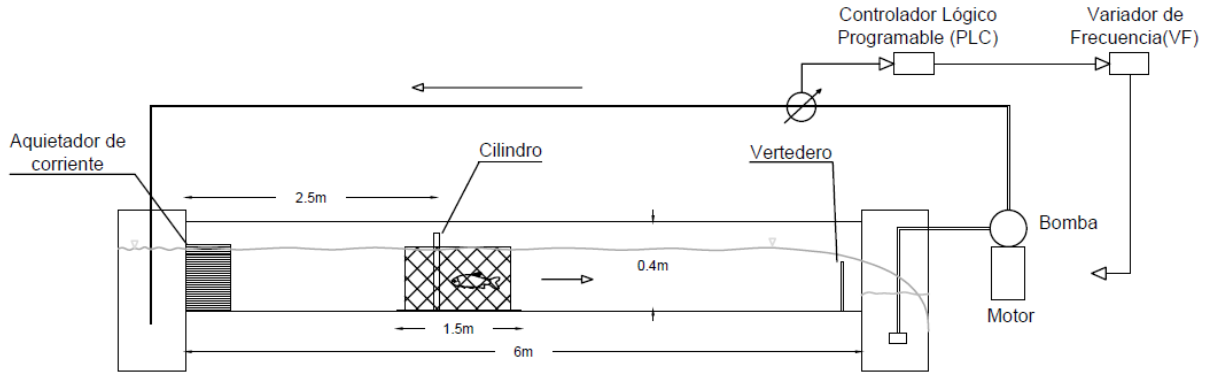


Figura 1. Esquema canal de medición

Velocimetría por imágenes, PIV

Las estelas se caracterizaron mediante velocimetría por imágenes PIV. Grant (1997) describe el método como una técnica que mide la velocidad de un fluido que viaja a través de una región iluminada por una hoja de luz bidimensional (Figura 2.a). Esto es posible al incorporar partículas neutralmente boyantes al flujo y con capacidad de reflejar suficiente luz para ser detectadas. El movimiento de las partículas es capturado a través de una cámara de alta velocidad que crea fotografías con una alta frecuencia en un tiempo t_0 y $t_0 + \Delta t$. Conociendo el lapso de tiempo Δt que transcurre entre ambas imágenes, se tiene una medida de la velocidad. El desplazamiento de las partículas se calcula evaluando la correlación cruzada de grupos de partículas que se mueven por áreas de interrogación (Thielicke y Stamhuis, 2014).

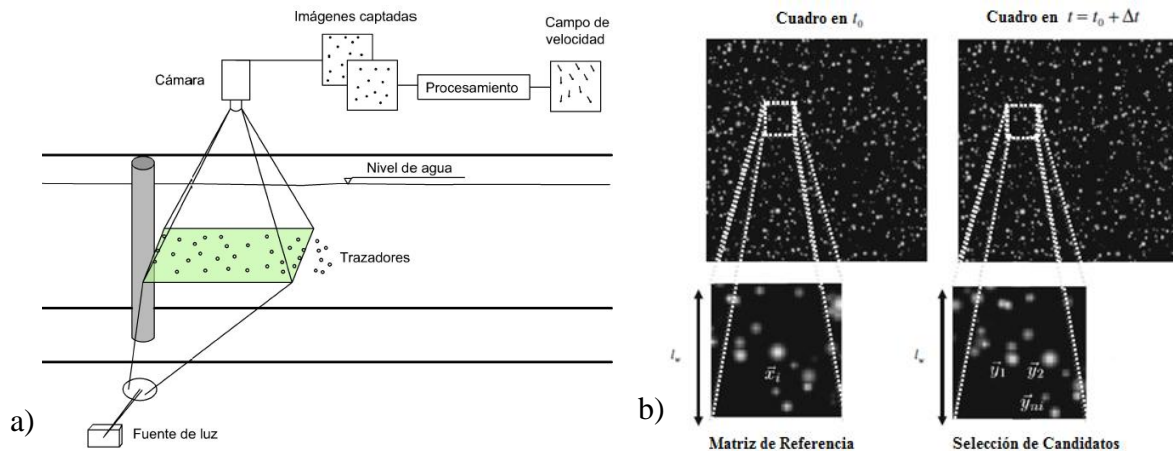


Figura 2. (a) Esquema de instalación de PIV; incluye fuente de luz, cámara y trazadores
(b) Imágenes utilizadas para PIV por Brevis *et al.*, 2011

La aplicación de PIV requiere tres elementos físicos fundamentales; cámara de grabación, iluminación y partículas. Se requiere utilizar partículas con características similares al fluido estudiado de manera que se desplacen de forma representativa con el fluido. La iluminación utilizada debe ser concentrada para lograr un alto contraste entre el fluido y las partículas, similar a la Figura 2.b. Finalmente, la cámara debe tener la capacidad de captar imágenes a alta velocidad para capturar con suficiente detalle el patrón de desplazamiento de las partículas.

En esta investigación se utilizó una cámara modelo Sony Action Cam HDR-AS100V® con tarjeta de memoria micro SD de 32 GB y capacidad para filmar a 60 (1920x1080 pixeles), 120 (1280x720 pixeles) y 240 (800x480 pixeles) cuadros por segundo (cps). Como partículas se utilizó poliestireno expandido (densidad de 1,05 g/cm³) reducido a diámetro del orden de 10⁻⁴m. El canal transparente fue cubierto con un manto negro que eliminó la entrada de luz ambiente y se ubicaron lámparas de 150W de potencia a ambos lados del canal, iluminando un plano muy delgado que ayuda a generar el contraste necesario.

Procesamiento de datos

Para el procesamiento de imágenes se utilizó PIVlab®, desarrollado por Thielicke y Stamhuis (2014). El software analiza pares de imágenes extraídas desde los videos previamente desglosados en fotogramas individuales; subdivide las imágenes en ventanas de interrogación y calcula la probabilidad de desplazamiento dentro de la ventana, escogiendo la dirección y distancia peak (con mayor probabilidad) como el desplazamiento asociado a las partículas y luego, según el intervalo de tiempo entre imágenes previamente calibrado, calcula la velocidad. También incorpora la opción de calcular parámetros secundarios como la vorticidad y la circulación, ofreciendo la posibilidad de corregir el asentamiento gravitacional de partículas mayores e interpolar las zonas con partículas insuficientes. La información de salida consiste en una grilla de vectores que representa visualmente el campo de velocidad, acompañado de un fondo de colores para los parámetros secundarios.

Experimentación

Se realizaron ensayos para seis individuos de cada especie según las características exhibidas en la Tabla 1.

Tabla 1 Características de ensayos para medir natación de peces

Especie	N° de peces	Talla (cm)	Aclimatación (hr)	Velocidad aclimatación (BL/s)	N° cilindros	Tiempo por cilindro (min)
Pocha	6	4 - 5	1.5	1	5	20
Pejerrey	6	7 - 9	1.5	1	5	20

Cada ensayo comenzó con 1.5 horas de aclimatación en flujo libre a velocidad de 1 BL/s (BodyLength/segundo, *i.e.*, Longitud de cuerpo por segundo), con el objetivo de disminuir el estrés involucrado. Posteriormente se aumentó la velocidad del flujo a 70% de la velocidad crítica 'Vc' (obtenida con la prueba de velocidad incremental) asociada al largo total de cada individuo. Dicha velocidad se mantuvo constante durante toda la prueba al igual que la profundidad de agua. Para generar variación en las condiciones de turbulencia se comenzó con flujo libre y posteriormente se incorporó un cilindro cuyo diámetro se aumentó en cinco ocasiones (0.02, 0.03, 0.04, 0.05 y 0.06 m). Se observó el comportamiento del pez durante 20 minutos en cada condición lo cual implica duración total de 190 minutos para cada ensayo, incluyendo el tiempo de aclimatación. En la Tabla 2 se presenta un resumen con las características de los ensayos realizados (Lt= Largo total del individuo; Ls = Largo estándar del individuo).

Tabla 2 Resumen serie de ensayos

Características individuo					Características flujo		
Especie	Lt (cm)	Ls (cm)	Masa (gr)	Vc (BL/s)	Velocidad (BL/s)	Profundidad (cm)	Reynolds
Pejerrey	7.2	6.4	1.75	3.3	2.3	25.0	40500
Pejerrey	7.2	6.4	1.62	3.9	2.7	27.0	43740
Pejerrey	7.6	6.8	1.91	3.0	2.1	28.0	50960
Pejerrey	7.7	6.7	2.02	4.6	3.2	23.3	45202
Pejerrey	7.9	6.8	2.40	3.7	2.6	24.0	48960
Pejerrey	8.9	8.1	2.77	2.9	2.0	23.0	57500
Pocha	4.6	3.7	1.20	6.7	4.7	25.0	54250
Pocha	4.3	3.6	0.85	7.3	5.1	24.1	52567
Pocha	4.7	3.9	1.18	6.4	4.5	29.9	63495
Pocha	4.3	3.5	0.89	7.1	5.0	30.5	65880
Pocha	4.5	3.6	0.97	7.0	4.9	29.3	65023
Pocha	4.5	3.7	1.05	7.0	4.9	28.0	61600

3 RESULTADOS

Inicialmente se realizaron pruebas para medir las características del flujo. La Figura 3 presenta una fotografía de la estela en el flujo aguas abajo de un cilindro vertical (a), el campo de velocidad obtenido con el *software* PIVlab (b) y el campo de vorticidad en conjunto con las líneas de corriente en la estela (c).

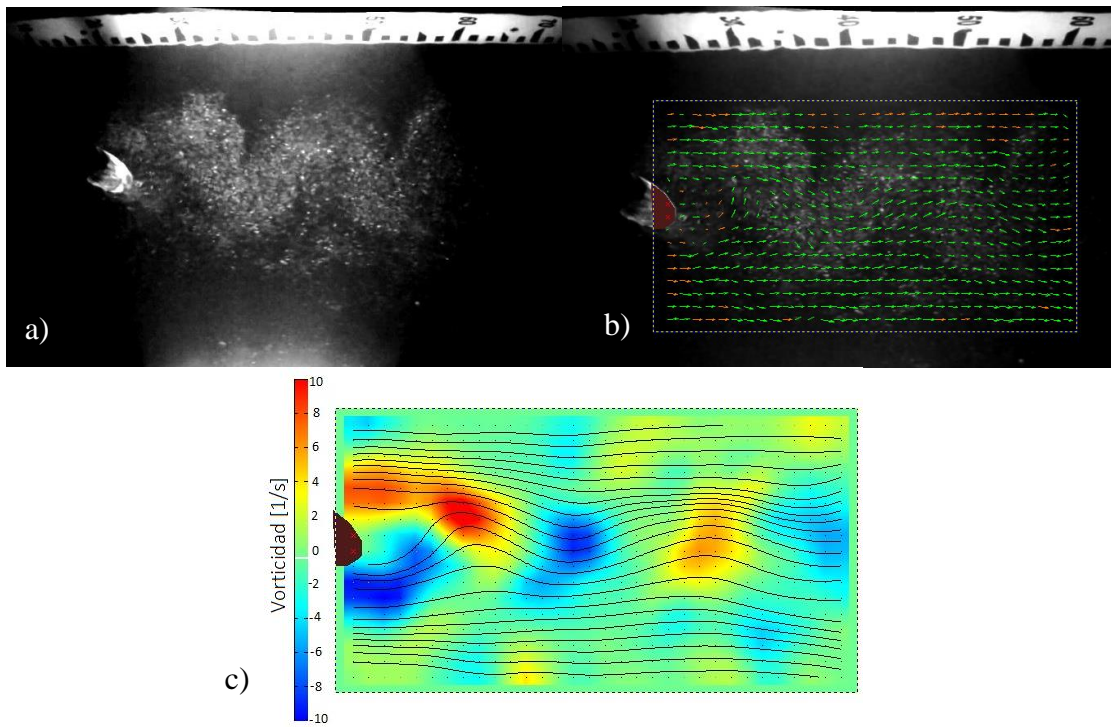


Figura 3. Estela en el flujo aguas abajo de un cilindro en un canal

Cada vector representa el desplazamiento de las partículas en distintos puntos en el intervalo de tiempo dado entre un par de imágenes consecutivas. En este ejemplo la frecuencia de imágenes fue de 60 cuadros por segundo, es decir, 0.0167 segundos entre par de imágenes.

La escala en la izquierda muestra que las zonas de color verde tienen vorticidad cercana a cero. Las zonas de color rojo presentan vorticidad en sentido horario y las zonas de color azul presentan vorticidad en sentido anti-horario. Se observa que las zonas de alta vorticidad (en ambos sentidos) se encuentran altamente concentradas. Esto se explica por la presencia de vórtices en la estela del cilindro que, por definición, corresponden a flujos circulares con alta vorticidad.

Al observar las líneas de corriente se identifican zonas donde estas son más cercanas; dichas zonas se encuentran asociadas a velocidades mayores y, en consecuencia, a presiones bajas. Se observa que aguas abajo del cilindro (zona de interés) las líneas se separan por lo que representa una zona de mayor presión.

La Figura 4 presenta un vórtice y una serie de 30 círculos concéntricos que inician desde el núcleo del vórtice hacia el exterior, para cada uno de estos círculos se calculó la circulación que corresponde a una medida del movimiento alrededor de una curva. El círculo en que alcanza su máximo valor se asocia al diámetro característico del vórtice y se encuentra destacado en color azul.

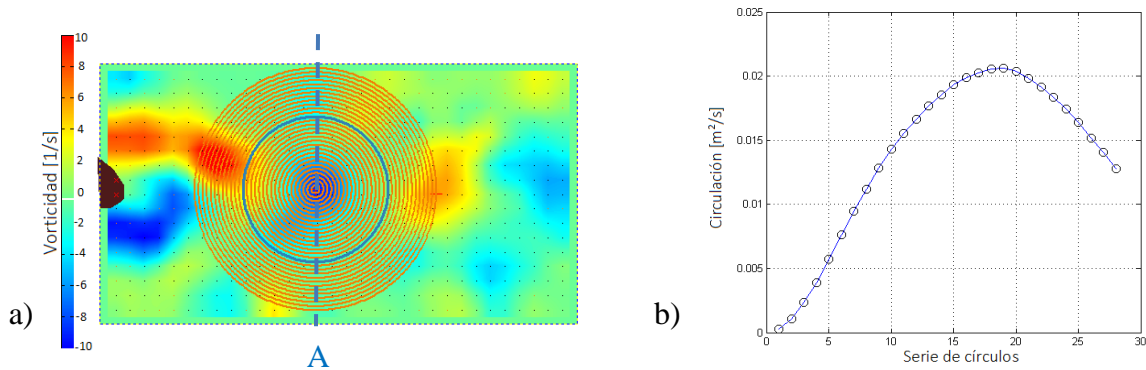


Figura 4. (a) Campo de vorticidad con círculos concéntricos alrededor del vórtice donde se calculó circulación (b) Valor de la circulación para cada círculo

La circulación es una característica que permite conocer el diámetro del vórtice y su momento (Tritico, 2009):

$$\Pi_v = \frac{m_v \Gamma_v}{4\pi} \quad (3.1)$$

donde Π_v representa el momento angular, Γ_v es la circulación del vórtice y m_v es la masa del vórtice (equivalente al producto de la densidad del agua con el volumen del vórtice). El momento angular representa una medida de la intensidad del vórtice por lo que, al contrastarlo con el momento generado por el pez, se espera tenga un rol importante en su comportamiento.

La Figura 5 incorpora la presencia de un individuo, una pocha de 3 cm de largo nadando en la estela de un cilindro de 2 cm de diámetro en un flujo a velocidad promedio de 11 cm/s.

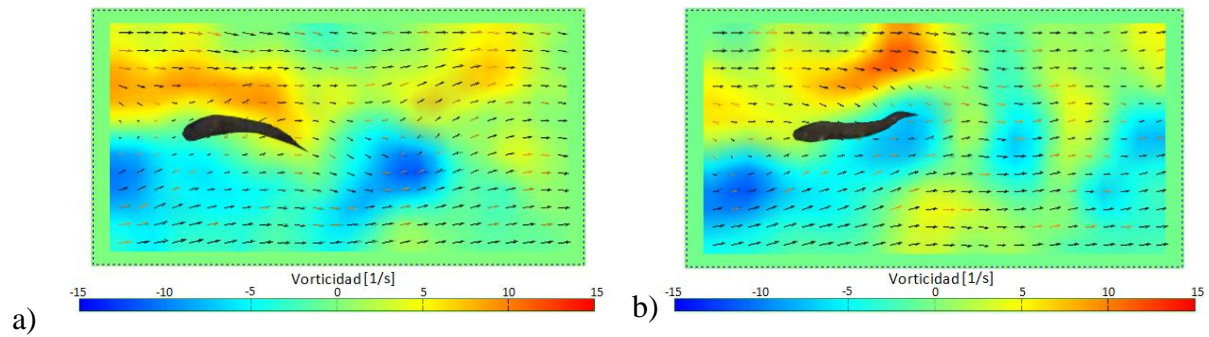


Figura 5. Nado de un pez (*C. galusdae*) en el campo de vorticidad de la estela de un cilindro

Se observó que el pez evita enfrentarse frontalmente a los vórtices, cambia de posición y adapta su cuerpo buscando zonas de menor vorticidad.

La Figura 6 muestra la desviación estándar y la amplitud de movimiento de cola normalizada con la amplitud de movimiento en flujo libre para seis individuos, esto permite observar la magnitud del cambio al incorporar la presencia de la estela de vórtices registrada para seis condiciones de flujo diferentes en ambas especies.

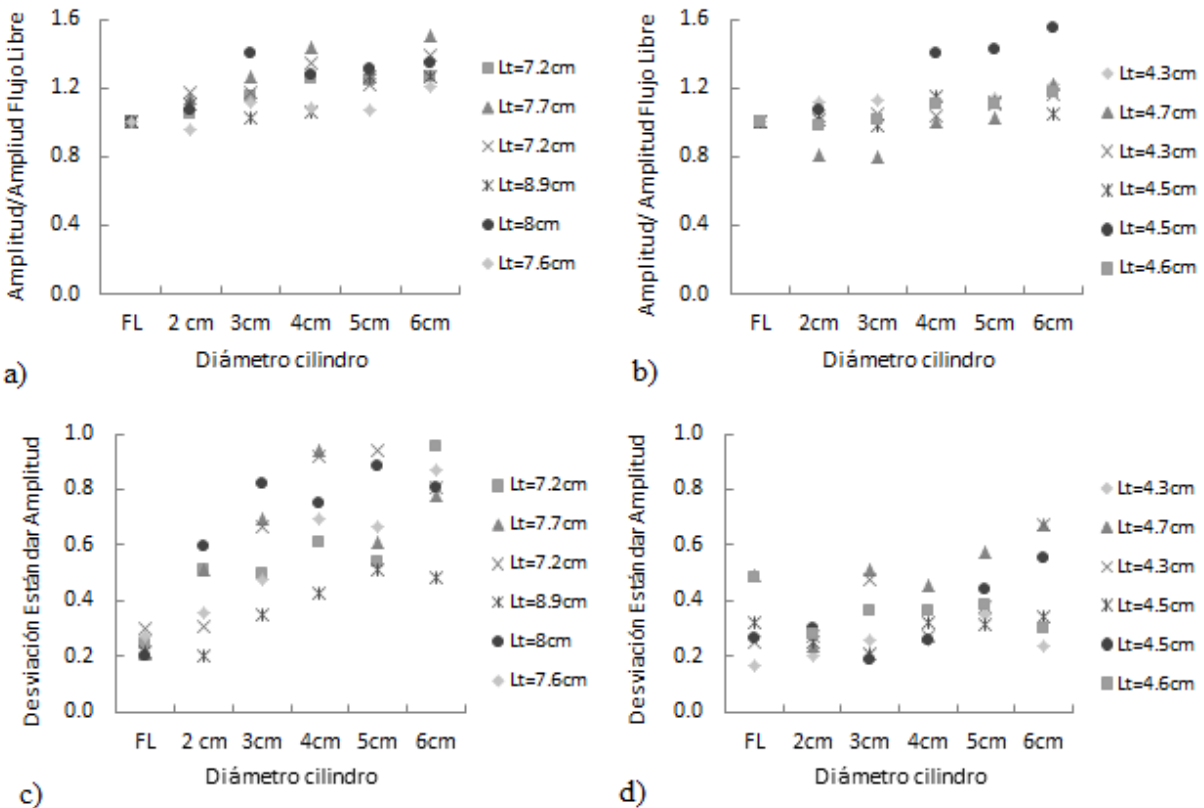


Figura 6. Amplitud y desviación estándar de amplitud de movimiento de cola para seis individuos (se indica longitud total 'Lt') de *B. microlepidotus* (a, c) y *C. galusdae* (b, d)

Para ambas especies se observa un aumento en la amplitud de movimiento de cola con el tamaño de los vórtices, alcanzando valores hasta 50% mayores. Esto se debe a que los peces evitan enfrentarse a los vórtices frontalmente realizando movimientos más amplios hacia los costados. Por otro lado, durante las pruebas se observó que los individuos de *B. microlepidotus* tuvieron una mayor participación en la estela que *C. galusdae*, lo cual se ve reflejado en la desviación estándar de los valores de amplitud de movimiento de cola.

La Figura 7 muestra la frecuencia de coleteo normalizada con la frecuencia de coleteo en flujo libre, esto permite observar la magnitud del cambio al incorporar la presencia de la estela de vórtices para seis condiciones de flujo diferentes en ambas especies.

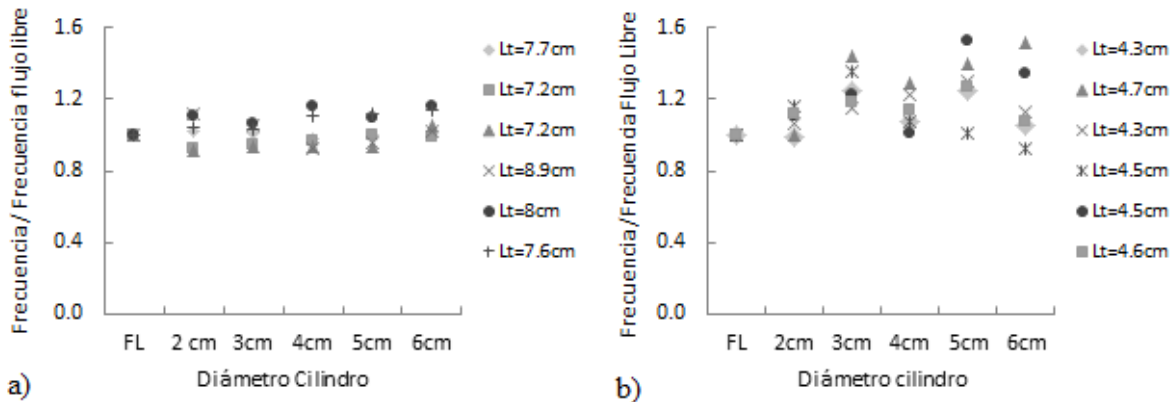


Figura 7 Frecuencia de coleteo para seis individuos (se indica longitud total ‘Lt’) de *B. microlepidotus* (a) y *C. galusdae* (b)

En el gráfico se observa que la frecuencia de coleteo para *B. microlepidotus* tiende a ser constante, mientras que, *C. galusdae* muestra un aumento para cilindros de diámetros mayores. Lo anterior se asocia a que *B. microlepidotus* participa de forma activa en la estela por lo que se enfrenta a un flujo sin grandes cambios en velocidad, en cambio, *C. galusdae* tiende a moverse de forma constante realizando cambios de posición rápidos. En ambos casos, se observa un comportamiento contrario al esperado pues, la frecuencia de formación de vórtices disminuye al aumentar el tamaño de diámetro de cilindro.

Para cuantificar de forma adimensional la frecuencia de movimiento del pez se utilizó el número de Strouhal (St_p) según la ecuación (3.2).

$$St_p = \frac{f \cdot A}{u_p} \quad (3.2)$$

Donde, f representa la frecuencia de coleteo, A representa la amplitud de movimiento de cola y u_p representa la velocidad de nado del pez.

En la Figura 8 se muestra el número de Strouhal del pez normalizado con el Strouhal del pez en flujo libre, esto permite observar la magnitud del cambio al incorporar la presencia de la estela de vórtices para seis condiciones hidráulicas distintas para ambas especies.

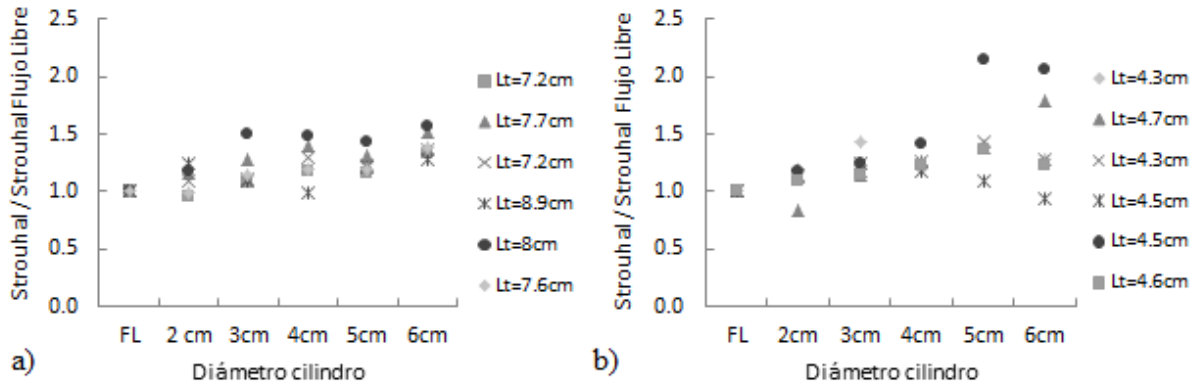


Figura 8. Strouhal para seis individuos (se indica longitud total 'Lt') de *B. microlepidotus* (a) y *C. galusdae* (b)

Se observó un aumento en el número de Strouhal para ambas especies, alcanzando alzas de hasta 100%. Lo anterior refleja el aumento en los valores de amplitud y frecuencia indicando que los peces adaptan su nado para desempeñarse de forma óptima.

4 CONCLUSIONES

Se presentaron resultados experimentales para las especies *Basilichthys microlepidotus* y *Cheirodon galusdae* que resultan interesantes por ser endémicas, su modo de natación, grado de conservación y futuras amenazas, a fin de estudiar el efecto de vórtices de estela en la natación.

Se trabajó con turbulencia controlada, estudiando los vórtices aguas abajo de un cilindro vertical. Los vórtices se caracterizaron en el marco IPOS, que considera la vorticidad, frecuencia y diámetro para medir intensidad, periodicidad y escala, respectivamente. La orientación del vórtice se mantuvo vertical para mantener la analogía con las rocas en un río.

Se escogió la técnica PIV para medir el campo de flujo. Las imágenes se procesaron con el software PIVlab. El campo de flujo se midió con un pez nadando en los vórtices. Se observó que este reacciona ante la presencia de turbulencia controlada intentando mantener la posición en zonas con baja vorticidad.

Se determinó la frecuencia de coleteo y amplitud de movimiento de cola. Los resultados muestran un aumento en la amplitud de movimiento de cola con el tamaño de los vórtices de estela, que puede alcanzar hasta 50% en ambas especies. Por otro lado, la frecuencia de coleteo de *Cheirodon galusdae* muestra un aumento, mientras que, *Basilichthys microlepidotus*, tiende a ser constante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento proporcionado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) a través del proyecto FONDECYT

1150154 “Within-basin barriers and among-basin leaks: changing connectivity of rivers in central Chile and its impact on native fish” y por el centro FONDAP Nr. 15130015 CRHIAM. También agradecen al laboratorista René Iribarren, por materializar la instalación experimental.

REFERENCIAS

Acharya, M., J. A. Kells y C. Katopodis (2000). Some hydraulic design aspects of nature-like fishways. In **Proceeding of the Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management**, ASCE, Reston, VA.

Brevis, W., Y. Niño y G. H. Jirka (2011). Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. **Experiments in Fluids**, 50(1), 135-147.

Castro-Santos, T., A. Cotel y P. W. Webb (2009). Fishway evaluations for better bioengineering: an integrative approach. In: **Challenges for diadromous fishes in a dynamic global environment. American Fisheries Society, Symposium** (Vol. 69, pp. 557-575).

Deng, Z., M. C. Richmond, G. R. Guensch, y R. P. Mueller (2004). Study of fish response using particle image velocimetry and high-speed, high-resolution imaging (No. PNNL-14819). **Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US)**.

Grant, I. (1997). Particle image velocimetry: a review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 211(1), 55-76.

Habit, E., y P. Victoriano (2012). Composición, origen y valor de conservación de la Ictiofauna del Río San Pedro (Cuenca del Río Valdivia, Chile). **Gayana** (Concepción), 76, 10-23.

Lacey, R. W., V. S. Neary, J. C. Liao, E. C. Enders y H. M. Tritico (2012). The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. **River Research and Applications**, 28(4), 429-443.

Liao, J.C., D.N. Beal, G.V. Lauder y M.S. Triantafyllou (2003). The Kármán gait: novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street. **Journal of Experimental Biology**, 206: 1059–1073.

Liao, J. C. (2007). A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 362(1487).

Lupandin, A. I. (2005). Effect of flow turbulence on swimming speed of fish. **Biology Bulletin**, 32(5), 461-466.

Thielicke, W. y E.J. Stamhuis (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. **Journal of Open Research**

Tritico, H. M. (2009). **The effects of turbulence on habitat selection and swimming kinematics of fishes**. ProQuest. Phd thesis, University of Michigan.

Tritico, H. M. y A. J. Cotel (2010). The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*). **The Journal of experimental biology**, 213(13), 2284-2293.