

Variabilidad temporal y espacial de los macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua en el río Palena, Patagonia Chilena

Seasonal and spatial variability of aquatic macroinvertebrates and water quality in the Palena River, Chilean Patagonia

Carlos Leal-Bastidas¹, Luis Vargas-Chacoff^{2,3,4,*}, Natalia Sandoval⁵ & Pablo Fierro²

¹Doctorado en Ciencias de la Acuicultura, Universidad Austral de Chile, Campus Puerto Montt, Puerto Montt, Chile.

²Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile.

³Centro Fonmap de Investigación de Altas Latitudes, FONDAP-IDEAL Center, Universidad Austral de Chile, Valdivia 5090000, Chile.

⁴Millennium Institute Biodiversity of Antarctic and Subantarctic Ecosystems, BASE, Universidad Austral de Chile, Valdivia 5090000, Chile.

⁵Centro de Ecología Aplicada Ltda, Santiago, Chile.

*E-mail: luis.vargas@uach.cl

RESUMEN

Los ríos de la Patagonia son uno de los ecosistemas acuáticos mejor conservados en América del Sur. Sin embargo, debido al creciente desarrollo económico en la región, numerosos cuerpos de agua se han visto amenazados por actividades humanas. Analizamos la calidad del agua y la estructura del ensamble de macroinvertebrados en ocho estaciones a lo largo del río Palena, en el sector alto de la cuenca con mínima perturbación y sector bajo para aquellas estaciones perturbadas por actividades humanas. El muestreo abarcó cuatro estaciones del año (septiembre 2013 a mayo 2014). La temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, dureza total, sílice, aluminio y hierro mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la parte alta y baja de la cuenca y entre estaciones del año. Se registraron 30 familias de macroinvertebrados (90% larvas de insectos), siendo el Orden Diptera el más diverso (8 familias). La familia Leptophlebiidae (Ephemeroptera) fue la más abundante en las cuatro estaciones del año. Diferencias significativas en el ensamble de macroinvertebrados se registraron entre estaciones del año, agrupándose en dos grupos: verano-otoño y invierno-primavera, pero no entre la estructura del ensamble entre la zona alta y baja de la cuenca. Estos resultados indican que la estacionalidad tiene un efecto sobre la composición del ensamble de macroinvertebrados por sobre diferencias espaciales en la cuenca. Por otro lado, la alta diversidad de macroinvertebrados registradas en el río Palena, y buena calidad del agua, indican que las actividades antrópicas aún no son un riesgo para el ecosistema acuático.

Palabras clave: biodiversidad, bioestablecimiento, conservación, estacionalidad, macroinvertebrados.

ABSTRACT

The rivers of Patagonia are some of the best conserved aquatic ecosystems in South America; however. However due to the growing economic development in the region, several bodies of water have been threatened by human activities. We analyzed the water quality and structure of macroinvertebrate assemblages at 8 stations along the Palena River; upstream, where there is minimal disturbance, and downstream, at stations perturbed by human activities. Samples were collected over the four seasons of the year (September 2013 to May 2014). Temperature, electrical conductivity, pH, dissolved oxygen, total hardness, silica, aluminum and iron showed significant differences ($p < 0.05$) between stations located upstream and downstream in the river basin, as well as between seasons of the year. A total

of 30 macroinvertebrate families were registered (90% insect larvae), being Diptera the most diverse order (8 families). Leptophlebiidae family (Ephemeroptera) was the most abundant family in the four seasons of the year throughout. Statistically, there were significant differences ($p < 0.05$) between seasons of the year, which were grouped in two groups: one summer-fall and winter-spring, but not to macroinvertebrate assemblages between stations upstream and downstream. These findings indicate that the seasonal variations have a greater effect on the macroinvertebrates assemblage composition than the spatial differences in the basin. On the other hand, the great diversity of macroinvertebrates registered in the Palena River, in addition to the good water quality, indicate that the activities in the basin are not yet a risk to the aquatic ecosystem.

Keywords: biodiversity, bioassessment, conservation, seasonally, macroinvertebrates.

INTRODUCCIÓN

Los ríos han sido siempre el recurso de agua dulce más importante para el consumo humano, siendo utilizados para fines recreativos y necesidades agrícolas e industriales, entre otros, lo que hace imprescindible disponer de información fiable sobre las características y tendencias de la calidad del agua para una gestión eficaz de los recursos. La calidad del agua de los ecosistemas acuáticos se ve influenciada por diversos factores naturales, como: la litología de la cuenca, cambios atmosféricos, condiciones climáticas y eventos catastróficos como erupciones volcánicas (Varol *et al.* 2011, Fuentes *et al.* 2020). Sin embargo, hoy en día debido a las múltiples actividades antropogénicas, muchos ríos y arroyos poseen algún grado de contaminación, por ejemplo, se ha listado que un 80% de los grandes ríos transfronterizos del mundo están seriamente amenazados por enriquecimiento de nutrientes o por patógenos derivados de aguas residuales (Best 2019).

La contaminación de las aguas con productos químicos y el exceso de nutrientes es de gran preocupación ambiental en todo el mundo, siendo los ríos más vulnerables a este tipo de contaminación debido a su fácil accesibilidad, por ejemplo, para la eliminación de aguas residuales (Singh *et al.* 2004). Las altas concentraciones de nutrientes como fósforo y nitrógeno pueden conducir a diversos problemas como: la proliferación de algas, pérdida de oxígeno, muerte de peces, pérdida de biodiversidad y un aumento en la densidad de plantas acuáticas (Jarvie *et al.* 2018)

La evaluación de la calidad del agua en la mayoría de los países se ha convertido en un asunto crítico en los últimos años; especialmente debido a la preocupación de que el agua dulce será un recurso escaso en el futuro (Varol *et al.* 2011). El estudio y caracterización de los ecosistemas fluviales, en el ámbito de la gestión de sus funciones ecosistémicas y conservación de biodiversidad acuática necesitan un

amplio conocimiento del medio. Es por ello, que la gestión e intervención a cualquier sistema fluvial debe basarse en experiencia de estudios históricos como mecanismo eficiente para la prevención, cuantificación, caracterización y mitigación de los impactos ambientales naturales y antrópicos (Xu *et al.* 2012). En este sentido, un problema frecuente es la falta de datos sobre ecosistemas con una mínima perturbación humana, lo cual limita la gestión de los ecosistemas fluviales, cuando el aprovechamiento de ellos es de manera directa o indirecta y está dañando sus funciones ecosistémicas.

Dentro del ecosistema acuático, uno de los grupos de organismos mejor evaluados para caracterizar los cambios ambientales con consideraciones espaciales y temporales, son los macroinvertebrados bentónicos, compuestos por moluscos, crustáceos, lombrices y principalmente larvas de insectos acuáticos. El uso de estos organismos para el biomonitoreo ha sido mundialmente aceptado, debido a que muchas especies como plecópteros, ephemeropteros o trichopteros, son sensibles a diversos estresores ambientales, pudiendo disminuir sus abundancias o incluso desaparecer (Miserendino *et al.* 2016). Un factor para tener en consideración en la evaluación de la calidad ambiental con el uso de organismos acuáticos es la variación temporal que se da de forma natural de estos en los ríos. Debido al ciclo de vida de muchos insectos acuáticos, en algunos meses es probable encontrar muchos individuos de una misma especie, mientras que en otros meses la abundancia baja drásticamente. Si estos cambios no son entendidos correctamente, pueden llevar a un error en la interpretación del estado de salud de los ecosistemas acuáticos.

Los ecosistemas acuáticos en Chile han estado sometidos a una fuerte presión, sobre todo por los cambios en el uso del suelo y aprovisionamiento del recurso hídrico (Fierro *et al.* 2015). La mayor parte de los ríos en Chile nacen en la cordillera de los Andes y terminan en el Océano Pacífico,

generando un potencial económico para actividades como desarrollo agrícola y ganadero y generación hidroeléctrica. Estas actividades pueden causar diferentes tipos de problemas ambientales, lo cual sumado al uso indiscriminado del agua, ha afectado tanto la disponibilidad como la calidad del agua (Debels *et al.* 2005). En el caso particular del río Palena, ubicado en la Patagonia Chilena, las características de aislamiento del río han permitido que sea un ecosistema fluvial de muy baja presión antrópica con baja densidad poblacional (Oyanedel *et al.* 2008). Dada la buena calidad de sus aguas y la magnitud de sus caudales, han potenciado actividades de bajo impacto como el ecoturismo. Por otro lado, el potencial hidráulico y formación geológica de la cuenca son importantes atributos para proyectos hidroeléctricos y mineros, como es sabido de alto impacto ambiental. Escenario que se evidencia por las solicitudes que hoy se encuentran en trámite, se advierte un claro interés por el aprovechamiento de las aguas para usos no consuntivos ligados a proyectos hidroeléctricos (Ministerio de Energía 2016).

Basado en estos antecedentes, es necesario contar con una caracterización de ecosistemas acuáticos, sobre todo en aquellos con baja intervención antrópica, práctica que en muchos países en vías de desarrollo se ha convertido en un asunto crítico en los últimos años, siendo además fundamental para la planificación de las cuencas hidrográficas y los recursos hídricos (Othman *et al.* 2020). Un ejemplo de lo anterior es lo que ocurre en la cuenca del río Palena en la Patagonia Chileno-Argentina, donde si bien existen actividades antropogénicas en la cuenca, estas se presentan principalmente en la parte baja de la cuenca, mientras que los ríos de la parte más alta aún están bajamente intervenidos. Es por esto, que este trabajo tiene como objetivo generar una línea de base del ecosistema acuático del río Palena y conocer sus características actuales de calidad de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El río Palena es una de las grandes cuencas transfronterizas de la Patagonia Chilena (43°14'; 44°3' S y 71°07'; 72°58' O), es catalogada como una cuenca binacional, ya que parte de sus aguas son compartidos con la República Argentina, donde recibe el nombre de Carrileufú (Fig. 1). La hoya hidrográfica tiene una superficie total de 13.396 km², de los cuales aproximadamente 5.700 km² equivalente al 43,5% están en territorio argentino, mientras que el 56,5% restante con un área de 7.696 km² corresponde a Chile (Fig. 1). Sus aguas fluyen en dirección este-oeste desde Argentina en

el sector de Carrileufú en la provincia de Chubut hacia el océano Pacífico en Chile. La escasa actividad en torno a la cuenca, especialmente en los ríos de cabecera del lado chileno, ha permitido encontrar áreas donde no hay efectos significativos del hombre sobre la biodiversidad (Oyanedel *et al.* 2008), permitiendo que el río tenga un potencial para diversas actividades entorno a su cuenca.

Limita al norte con la hoya del río Yelcho y al este, con las hoyas de los ríos Tecka, Senguer y afluentes del río Chubut, de la vertiente Atlántica; por el sur con la hoya de los ríos Cisnes y Queulat. Por el oeste limita con una serie de hoyas menores que desaguan independientes en el golfo Corcovado que se sitúan en el interfluvio Yelcho-Palena, tales como los ríos Corcovado, Tictoc y Rodríguez. Asimismo, al oeste limita con hoyas pequeñas situadas entre el Palena y el Cisnes y que desaguan a los canales situados al oriente del canal Moraleta. En su recorrido de 90 km en territorio chileno, antes de desembocar en el mar en el golfo de Corcovado, en la localidad de Puerto Raúl Marín Balmaceda (44°36'S), recibe los aportes de río Tigre, río Tranquilo, río Frío, Claro y otros afluentes menores. En la localidad de La Junta se produce la confluencia con el río Rosselot, el cual drena una gran hoya hidrográfica que incluye el lago Rosselot, lago Verde, río Figueroa y río Pico proveniente de Argentina.

Esta cuenca posee un régimen pluvio-nival, con un clima muy húmedo (precipitación anual entre 2.000 - 3.000 mm), baja luminosidad y temperatura media anual de 10°C. Se encuentra cubierta por bosques sub-antárticos en su mayoría siempre verde, listando especies abundantes como coigüe (*Nothofagus dombeyi*), mañío (*Podocarpus nubigenus*), tepa (*Laurelia serrata*), notro o ciruelillo (*Embothrium coccineum*), entre otros.

MUESTREO

Cuatro muestreos fueron llevados estacionalmente en invierno (septiembre 2013), primavera (noviembre 2013), verano (febrero 2014) y otoño (mayo 2014). Ocho estaciones de muestreo fueron establecidas, agrupándose en dos sectores de la cuenca, 4 estaciones en la parte alta de la cuenca y 4 estaciones en la parte baja (Fig. 1). Este diseño de muestreo fue elaborado de acuerdo con los usos del río Palena y su accesibilidad, factores considerados directamente relacionados con la calidad de las aguas, donde la parte alta del río es una zona de menor acceso y de baja densidad poblacional y agrícola y la zona baja de la cuenca del río está asociada a un área más intervenida con mayor actividad agrícola, explotación forestal y extracción de áridos desde el río para la mantención de los caminos.

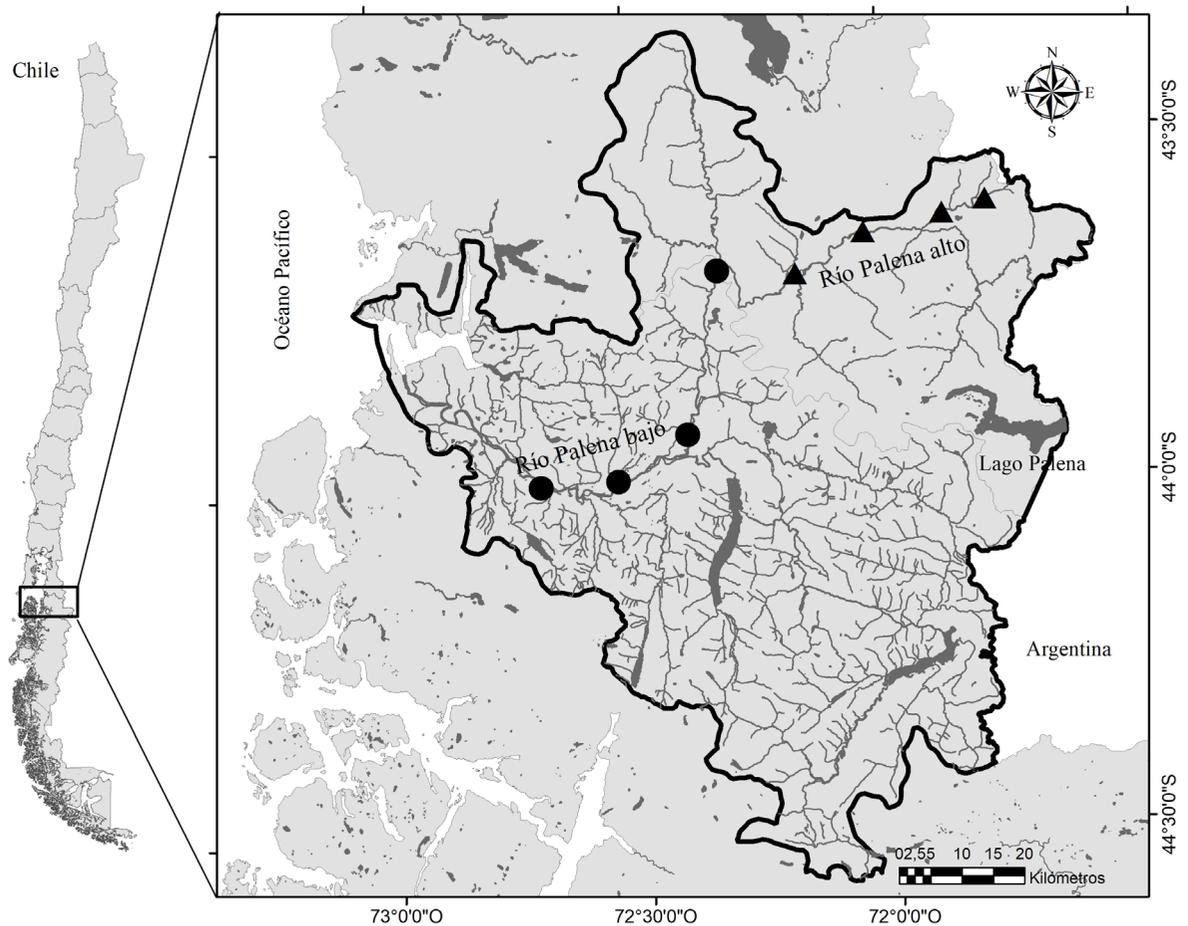


FIGURA 1. Localización de la cuenca del río Palena, Patagonia Chilena. Los triángulos negros indican las estaciones de muestreo en el río Palena alto (zona alta), y los círculos negros en el río Palena bajo (zona baja). / Location of Palena River Basin, Chilean Patagonia. Black triangles indicate the sampling stations at the upstream Palena River (upper zone), and black circles indicate the sampling stations at downstream Palena River (down zone).

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA

Se monitorearon un total de 10 parámetros físico-químicos del agua. La temperatura (°C), oxígeno disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE) y pH fueron medidos *in situ* con un multiparámetro Hannah HI 9829. Las muestras de agua se obtuvieron de la superficie del río en envases limpios los cuales fueron enjuagados tres veces con la misma agua del río. Para las muestras de nutrientes, el agua fue congelada, mientras que, para las muestras de metales, los envases fueron mantenidos en hieleras a 4°C durante su transporte y el agua fijada con ácido clorhídrico hasta su análisis en el laboratorio. Los parámetros fósforo total, nitrógeno total, nitrato, nitrito, nitrógeno amoniacal, ortofosfato, dureza total, cadmio, cobre, mercurio, zinc y aluminio se analizaron en el laboratorio CERAM de la Universidad Austral de Chile, de acuerdo con los métodos analíticos presentados

en Standard Methods (APHA 2005). El caudal (m³/s) y las precipitaciones (mm) fueron promediados mensualmente desde el año 2000 al 2015 (Fig. 2). Esta información fue obtenida de la base de datos de la Dirección General de Aguas de Chile (<http://www.dga.cl>).

ANÁLISIS DE LOS MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS

Los macroinvertebrados bentónicos fueron colectados con una red de muestreo Surber (0,09 m², 250 µm tamaño de malla) con cuatro réplicas aleatorias por estación. Las muestras fueron fijadas *in situ* en alcohol al 70% y llevadas a laboratorio donde fueron separados del detritus e identificadas hasta el nivel taxonómico de familia, utilizando una lupa binocular. Para la identificación se utilizó las claves disponibles en Fernández & Domínguez (2001).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar las diferencias significativas espacio-temporales basado en los datos ambientales, se utilizó una ANOVA de dos vías. Posterior al ANOVA se realizó un apueba de HDS de Tukey para determinar los grupos que presentaban diferencias significativas. Los datos fisicoquímicos fueron primeros transformados ($\log x+1$) y normalizados. Posteriormente una matriz de distancia Euclidiana fue realizada. La matriz de datos transformados fue utilizada en un análisis de componentes principales (PCA).

Para establecer el grado de similitud entre las estaciones de muestreo entre la parte alta y bajo del río Palena, y entre las estaciones del año, los datos biológicos fueron transformados (raíz cuadrada) para luego construir una matriz de similitud de Bray Curtis. Para establecer diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las estaciones de la parte alta y baja del río Palena por estación del año, utilizamos factores fijos de dos vías (posición en la cuenca y estacionalidad), los cuales fueron puestos a pruebas usando un análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA, 9999 permutaciones) (Anderson *et al.* 2008). Los análisis multivariados fueron llevados a cabo usando PRIMER 6 & PERMANOVA+ (Anderson *et al.* 2008).

RESULTADOS

PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

La tendencia de los parámetros físicos y químicos presentaron una distribución estacional y en algunos casos diferencias espaciales. En la Fig. 2 se observa la distribución media mensual de caudal y precipitaciones. La información muestra consistentemente que los máximos valores se presentan en los meses de invierno y primavera, mientras que los menores caudales se registran en el verano y otoño austral. El caudal medio mensual registrado en el río Palena en 15 años de información es de $847,88 \text{ m}^3 \text{ s}$ y $1586,81 \text{ mm}$ de agua caída para la zona. El *peak* promedio de precipitaciones y caudal del río se observa durante el mes de junio con $266,48 \text{ mm}$ y $1209,82 \text{ m}^3 \text{ s}$ en promedio respectivamente.

Los siguientes parámetros estuvieron bajo el límite de detección de los equipos: fósforo total, nitrógeno total, nitrato, nitrito, nitrógeno amoniacal, ortofosfato, cadmio, cobre, mercurio, zinc. El resto de los parámetros fisicoquímicos, se ilustran en las Figs. 3 y 4 (promedio y desviación estándar), donde se observa además las fluctuaciones estacionales y las diferencias significativas entre estaciones de muestreo y las estaciones del año ($p < 0,05$).

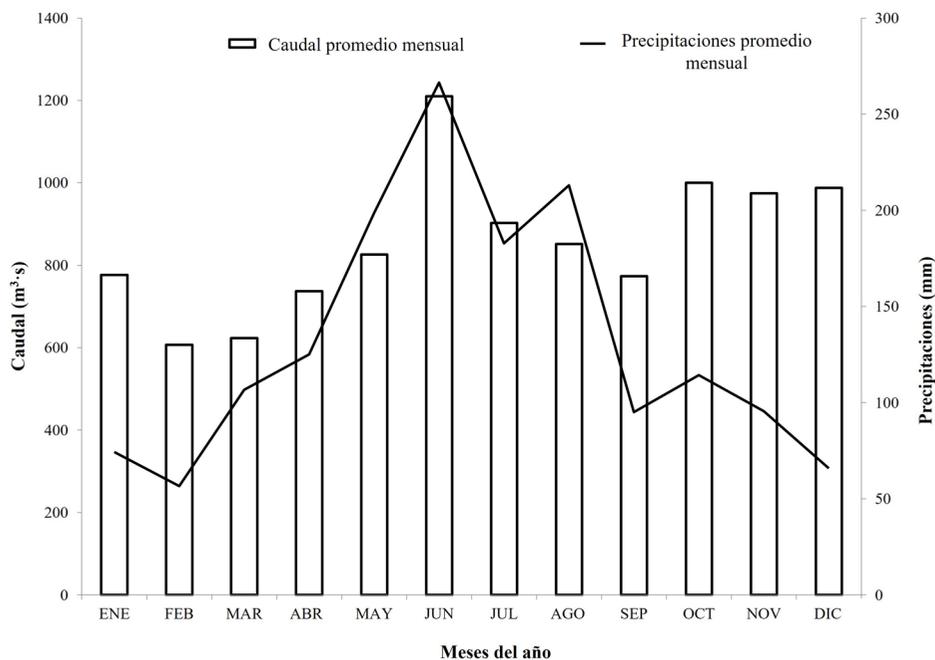


FIGURA 2. Promedio mensual del caudal y precipitaciones para la cuenca del río Palena durante un periodo de 16 años (2000-2015). / Average monthly river flow and precipitations for the Palena River Basin over a 16 years period (2000-2015).

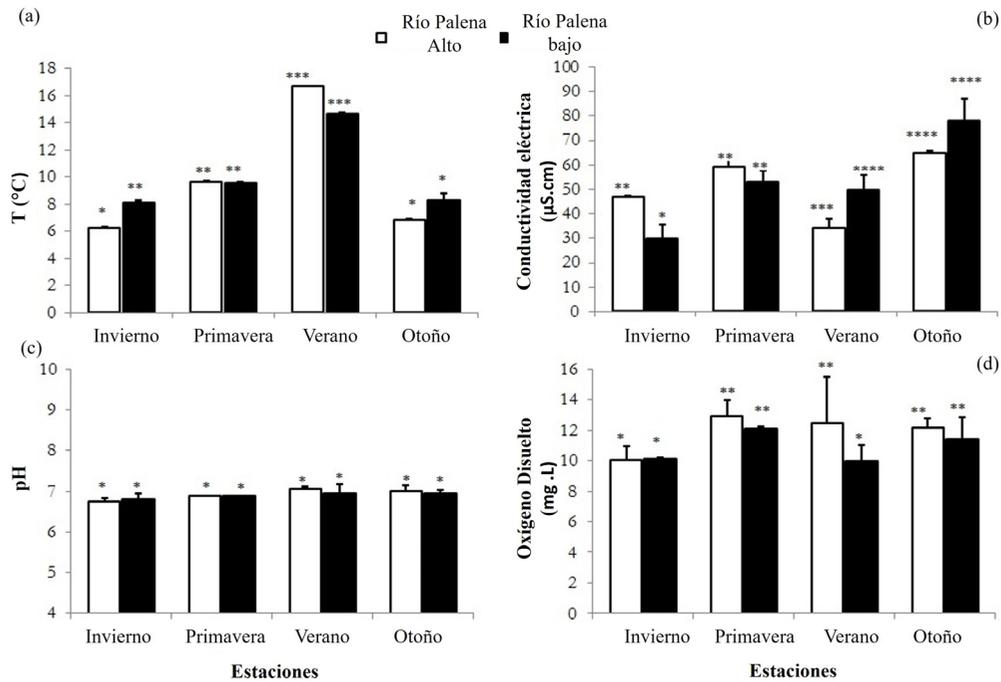


FIGURA 3. Variación estacional en la temperatura del agua (Fig. 3a), conductividad eléctrica (Fig. 3b), pH (Fig. 3c) y oxígeno disuelto (Fig. 3d) en las estaciones de la parte alta y baja de la cuenca del río Palena. *p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001. / Seasonal variation in water temperature (Fig. 3b), electrical conductivity (Fig. 3b), pH (Fig. 3c) and dissolved oxygen (Fig. 3d) at the upstream and downstream stations within the Palena River Basin. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001.

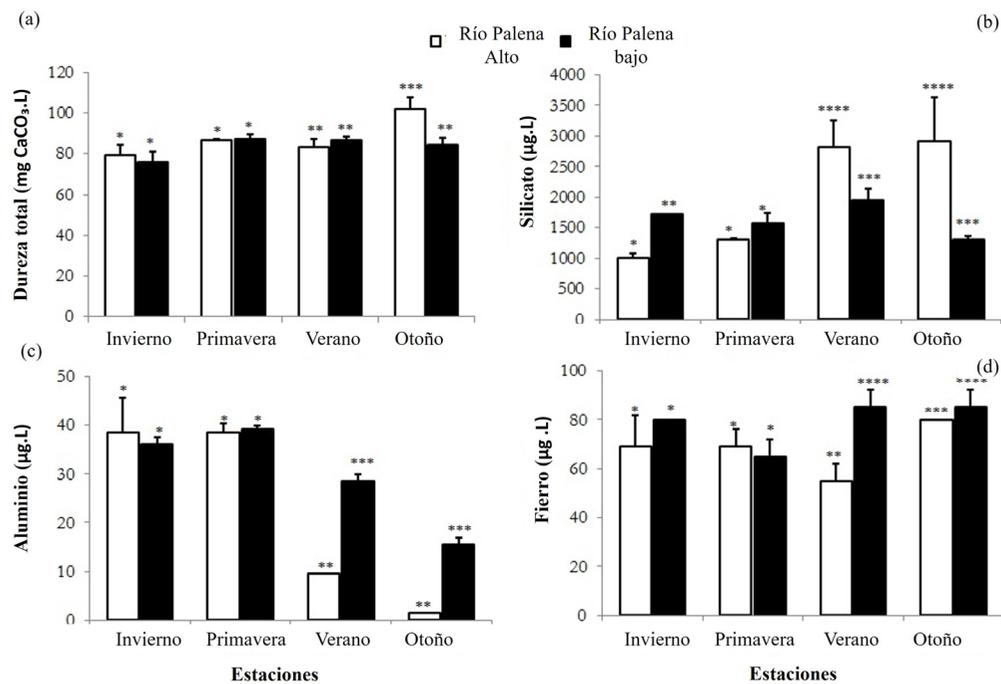


FIGURA 4. Variación estacional en la dureza total (Fig. 4a), silicato (Fig. 4b), aluminio (Fig. 4c) y fierro total (Fig. 4d) en las estaciones de la parte alta y baja de la cuenca del río Palena. *p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001. / Seasonal variation in total hardness (Fig. 4a), silica (Fig. 4b), aluminum (Fig. 4c) and total iron (Fig. 4d) at the upstream and downstream stations within the Palena River Basin. *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001.

La temperatura del agua superficial fue más alta en promedio durante el verano, con valores de 16,7 °C en las estaciones del sector alto de la cuenca y 14,6 °C en las estaciones del sector bajo, y las temperaturas menores se registraron en invierno con 6,2 °C en las estaciones de la parte alta y 9,6 °C en las estaciones de la parte baja, observándose diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estaciones y sitios de muestreo. La conductividad eléctrica fue significativamente diferente entre las estaciones del año ($p < 0,05$) mostrando además diferencias espaciales significativas ($p < 0,05$). El pH tendió a la alcalinidad durante el período de estudio en todas las estaciones, mostrando el máximo valor en verano en el sector alto de la cuenca (valor 7,1). Durante la primavera, verano y otoño se registraron los valores más altos de oxígeno disuelto en el sector alto, a excepción de las estaciones del sector bajo. Los promedios de DO variaron entre 12,45 a 10,0 mg l⁻¹ durante el verano.

La dureza total fue más alta en otoño (102-84,5) mg l⁻¹ en las estaciones de la parte alta y más baja en las estaciones de la parte baja en invierno (79,5-76) mg l⁻¹. El SiO₂ fue más alto el verano y el otoño en el área alta de la cuenca (2823-2909 µg l⁻¹), y el valor más bajo se registró en el área baja en invierno con 997 µg l⁻¹ y río abajo en otoño con 1313,5 µg l⁻¹. Entre los metales analizados el Al presentó variaciones significativas ($p < 0,05$) entre las estaciones lluviosas (invierno-primavera) y secas (verano-otoño) con valores registrados en invierno y otoño muy similares entre 38,5 µg l⁻¹ en la parte alta y 39,3 µg.l⁻¹ en la parte baja de la cuenca. Mientras que el Al fue más bajo, en verano y otoño en la parte baja se observaron los valores más altos de estos dos períodos 28,6 µg l⁻¹ y 15,5 µg l⁻¹ respectivamente y los más bajo de este período fueron reportadas en las estaciones de la zona baja de la cuenca (9,46-1,45) µg l⁻¹. Por otro lado, respecto a las concentraciones de Hierro se observaron los valores máximos con 85 µg l⁻¹ en verano y otoño en la zona baja de la cuenca y la menor concentración en verano en la parte alta con 55 µg l⁻¹. Los otros metales analizados no fueron detectados en las aguas del río Palena en ningún período.

Los primeros dos ejes del análisis de componentes principales (PCA) para las variables fisicoquímicas y las estaciones de muestreo explicaron el 64,7% de la varianza acumulada (Fig. 5). Las estaciones de muestreo se agruparon en dos grupos con un 65% de similitud, a la izquierda del PC1 se agruparon las estaciones de la zona alta y baja de la cuenca de otoño y verano, mientras que al lado derecho se agruparon las estaciones de invierno y primavera. De las variables medidas, el primer eje estuvo relacionado mayormente con la dureza total y la concentración de aluminio, mientras que el segundo con el oxígeno disuelto y la temperatura.

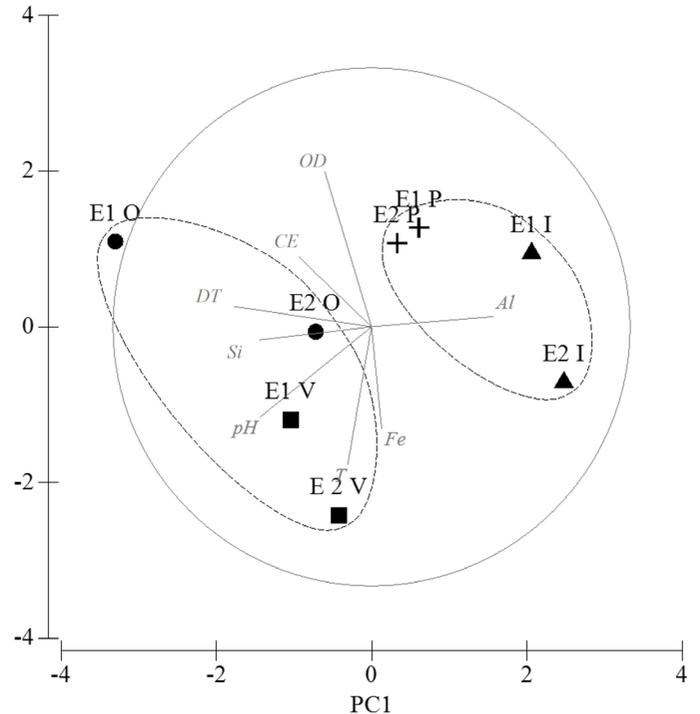


FIGURA 5. Análisis de componentes principales (PCA) de las variables ambientales en los sitios de la parte alta y baja ordenados estacionalmente en la cuenca del río Palena. El círculo de correlación con línea continua es indicado en la figura para ayudar a visualizar las variables mayormente correlacionadas. El círculo con línea punteada indica una similitud de 65% entre estaciones de muestreo. E1 indica promedio de estaciones en río Palena alto, y E2 indica promedio estaciones en río Palena bajo. Símbolos representan las estaciones del año: invierno (triángulos), primavera (cruces), verano (cuadrados) y otoño (círculos). / Principal components analysis (PCA) of seasonally adjusted environmental variables at the upstream and downstream sites within the Palena River Basin. The solid line circle shown in the figure helps to visualize the most correlated variables. The dotted line circle indicates 65% similarity between sampling stations. E1 indicates the average of stations in the upper Palena River and E2 indicates the average of stations in the lower Palena River. Symbols represent the seasons of the year: winter (triangles), spring (crosses), summer (squares) and fall (circles).

MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS

Respecto a los macroinvertebrados bentónicos, en total 30 familias fueron registradas en las cuatro estaciones del año en toda el área de muestreo (Tabla 1). El ensamble de macroinvertebrados estuvo dominado por larvas de insectos en un 90%, siendo los órdenes más diversos Diptera (8 familias), Plecoptera (6 familias), Ephemeroptera y Trichoptera (ambas con 4 familias). Solo tres familias de macroinvertebrados correspondieron a taxa no-insectos (mollusca, ácaros, y oligoquetos). Numéricamente los

Ephemeropteros de la familia Leptophlebiidae fueron los dominantes en tres de las cuatro estaciones del año para los sitios de muestreo de la zona alta y baja de la cuenca (i.e. invierno, verano y otoño). Otras familias abundantes fueron los plecópteros de la familia Gripopterygidae y los dípteros de la familia Chironomidae (Apéndice 1).

Se observaron importantes cambios temporales en la estructura comunitaria de la fauna de macroinvertebrados entre las estaciones. Durante el invierno en las estaciones de la parte alta de la cuenca las familias dominantes fueron Elmidae (99,9 ind m²) y Leptophlebiidae (144,3 ind m²),

mientras que en la zona baja la mayor abundancia fue de Baetidae (74 ind m²). En primavera en la zona alta dominó la presencia de Baetidae (62,9 ind m²) y en la zona baja Ephydriidae (66,6 ind m²) y Simuliidae (66,6 ind m²). Durante el verano las mayores abundancias fueron de Leptophlebiidae (125,8 ind m²) en la zona alta, en cambio en la zona baja fueron Leptophlebiidae (129,5 ind m²) y Chironomidae (107,3 ind m²). En tanto en otoño dominaron Leptophlebiidae (199,8 ind m²) y Gripopterygidae (140,6 ind m²) en la zona alta, mientras que en la zona baja fue Leptophlebiidae (111 ind m²) (Tabla 1).

TABLA 1. Familias y abundancia (ind m²) de macroinvertebrados colectados en la parte alta y baja de la cuenca del río Palena (promedio 4 estaciones de muestreo por zona) durante las cuatro estaciones del año. / Macroinvertebrates families and abundance (ind m²) collected at the upstream and downstream within the Palena River Basin (mean 4 sampling stations per zone) throughout four seasons of the year.

Orden	Familia	Alta Invierno	Baja Invierno	Alta Primavera	Baja Primavera	Alta Verano	Baja Verano	Alta Otoño	Baja Otoño
Basommatophora	Chiliniidae	55,5	18,5	33,3	18,5	55,5	3,7	48,1	25,9
Hydracarina	Hydrachnidae	0	0	0	0	18,5	0	51,8	25,9
Oligochaeta	Tubificidae	7,4	0	11,1	40,7	18,5	51,8	14,8	25,9
Coleoptera	Dryopidae	48,1	18,5	59,2	22,2	33,3	0	0	51,8
	Elmidae	99,9	0	0	0	14,8	11,1	22,2	37
	Hydrochidae	0	0	18,5	14,8	37	3,7	0	14,8
	Psephenidae	0	0	0	0	37	22,2	29,6	51,8
Diptera	Hydrophilidae	0	0	0	0	0	0	33,3	25,9
	Chironomidae	22,2	18,5	14,8	37	22,2	107,3	81,4	44,4
	Ephydriidae	59,2	44,4	7,4	66,6	44,4	3,7	18,5	25,9
	Simuliidae	44,4	18,5	0	66,6	11,1	14,8	55,5	37
	Empididae	0	0	40,7	44,4	37	55,5	0	85,1
	Athericidae	22,2	22,2	0	37	40,7	7,4	40,7	92,5
	Tabanidae	0	0	0	0	33,3	11,1	0	0
	Tipulidae	0	0	0	0	0	0	14,8	33,3
	Blephariceridae	14,8	11,1	18,5	18,5	3,7	22,2	29,6	29,6
	Ephemeroptera	Baetidae	48,1	74	62,9	55,5	92,5	3,7	22,2
Leptophlebiidae		144,3	48,1	48,1	48,1	125,8	129,5	199,8	111
Ameletopsidae		66,6	0	0	18,5	66,6	22,2	44,4	0
Plecoptera	Oniscigastridae	3,7	3,7	7,4	0	0	3,7	33,3	0
	Austroperlidae	29,6	18,5	11,1	14,8	62,9	59,2	40,7	29,6
	Gripopterygidae	77,7	25,9	48,1	11,1	59,2	70,3	140,6	11,1
	Notonemouridae	70,3	18,5	40,7	33,3	3,7	3,7	7,4	11,1
	Perlidae	18,5	0	0	14,8	40,7	81,4	55,5	33,3
	Diamphipnoidae	0	0	18,5	33,3	3,7	0	44,4	85,1
Trichoptera	Eustheniidae	0	0	29,6	0	29,6	81,4	51,8	40,7
	Hydrobiosidae	33,3	0	55,5	48,1	33,3	14,8	25,9	40,7
	Hydropsychidae	40,7	33,3	59,2	33,3	70,3	40,7	70,3	37
	Hydroptilidae	48,1	11,1	25,9	25,9	7,4	0	7,4	11,1
	Glossosomatidae	0	0	0	0	0	18,5	0	3,7

De acuerdo con la estructura del ensamble de macroinvertebrados, se encontró diferencias significativas entre las estaciones del año (PERMANOVA, Pseudo-F= 2,6942 p=0,0087), pero no entre las estaciones de muestreo de la parte alta y baja de la cuenca (PERMANOVA, Pseudo-F= 1,0283, p=0,4312). Las diferencias en la estacionalidad pueden ser observadas en el MDS (Fig. 6). La agrupación de las estaciones de muestreo biológico siguió el mismo patrón presentado en el PCA para los parámetros fisicoquímicos, donde las estaciones de la zona alta y baja de invierno y primavera se agruparon a la izquierda, mientras que las estaciones de verano y otoño se agruparon en el lado derecho.

En general se observó un aumento en la riqueza y abundancia en verano y otoño para ambas estaciones de muestreo. Las mayores abundancias para las estaciones de la zona alta y baja se registraron ambas en otoño, con 1184 ind

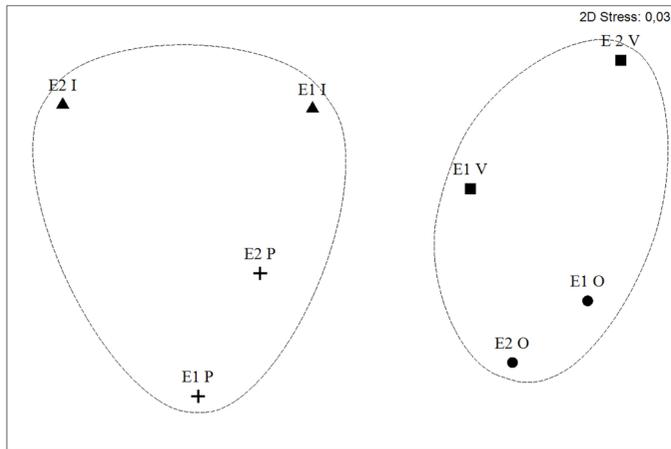


FIGURA 6. Análisis de escalamiento multidimensional (MDS) de las estaciones de muestreo de la parte alta y baja de la cuenca del río Palena durante las cuatro estaciones del año. El MDS fue basado sobre el ensamble de macroinvertebrados utilizando Bray-Curtis como medida de similitud. El círculo con línea punteada indica una similitud de 65% entre estaciones de muestreo. E1 indica promedio de estaciones en río Palena alto, y E2 indica promedio estaciones en río Palena bajo. Símbolos representan las estaciones del año: invierno (triángulos), primavera (cruces), verano (cuadrados) y otoño (círculos). / Multidimensional scaling (MDS) of the upstream and downstream sampling sites within the Palena River Basin during the four seasons of the year. The MDS was based on the macroinvertebrates assemblage using Bray-Curtis as similarity measure. The dotted line circle indicates 65% similarity between sampling stations. E1 indicates the average of stations in the upper Palena River and E2 indicates the average of stations in the lower Palena River. Symbols represent the seasons of the year: winter (triangles), spring (crosses), summer (squares) and fall (circles).

m² y 1025 ind m² respectivamente. En tanto la mayor riqueza total de familias fue observada para las estaciones de la zona alta en verano con 26 familias, y para las estaciones de la zona baja en otoño con 27 familias (Fig. 7).

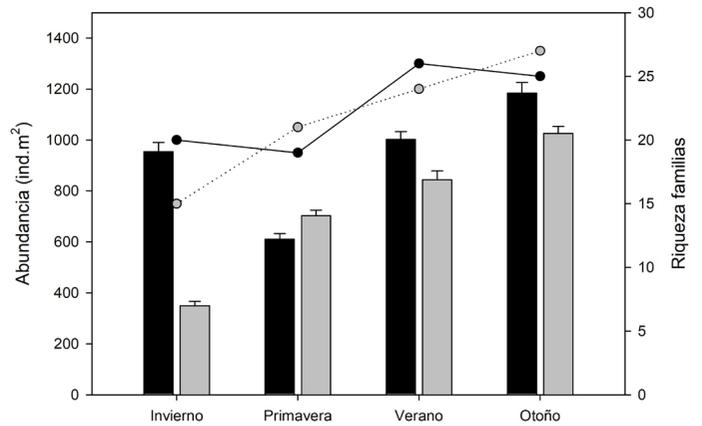


FIGURA 7. Promedio y desviación estándar de la abundancia de macroinvertebrados (barras) y número de taxa (líneas) a través de las estaciones del año en las estaciones del río Palena alto (barras y líneas negras) y estaciones del río Palena bajo (barras y líneas plomas). / Mean and standard deviation of macroinvertebrates abundance (bars) and number of taxa (lines) throughout the seasons of the year at the upper Palena River stations (bars and black lines) and the lower Palena River stations (bars and grey lines).

DISCUSIÓN

Este estudio analizó por primera vez la variabilidad espacio temporal en la cuenca del río Palena sobre la calidad del agua y los macroinvertebrados bentónicos acuáticos. La temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, OD, dureza total, silicatos, aluminio y fierro fueron significativamente diferentes entre las estaciones de la parte alta y baja de la cuenca, y entre las estaciones del año. Mientras que la estructura del ensamble de macroinvertebrados fue significativamente diferente entre estaciones del año, pero no espacialmente entre la parte alta y baja de la cuenca.

Las estaciones de muestreo basadas en parámetros fisicoquímicos fueron agrupadas en dos grandes grupos, estando el primero formado por las estaciones de invierno y primavera, correspondientes al período de máximos caudales, y el segundo grupo por estaciones de verano y otoño que corresponden al período de menores precipitaciones en el área de estudio. Los resultados pueden

ser relacionados al marcado régimen pluvionival de los ríos de montaña en la Patagonia, con máximos caudales por lluvias en invierno, y por el derretimiento de hielo y nieve en primavera (Scordo *et al.* 2020). Las lluvias, así como el aumento en los caudales pueden afectar las comunidades acuáticas, cambiando por ejemplo la estructura de los ensambles, tanto de densidad y riqueza, frente a cambios en los flujos de los ríos. Coincidentemente en nuestro estudio, las estaciones de muestreo basado en la estructura del ensamble macroinvertebrados fueron agrupadas en estaciones de invierno/primavera y verano/otoño. Las mayores abundancias y riqueza de familias registradas en las estaciones de verano y otoño coinciden parcialmente con lo reportado en ríos de Patagonia Argentina (Miserendino & Pizzolon 2003), donde se ha observado que el número de taxa y la densidad promedio de macroinvertebrados aumenta en verano y disminuye en invierno. Nuestros resultados también confirman lo reportado por Fierro *et al.* (2015), quienes reportaron en ríos del ecosistema templado del centro-sur de Chile máximas abundancias y riquezas de macroinvertebrados en verano-otoño.

Nuestros análisis mostraron que las mayores diferencias basados en los parámetros fisicoquímicos se dieron entre las estaciones del año por sobre diferencias espaciales en la cuenca, dejando en evidencia que las actividades antrópicas descritas en la zona baja de la cuenca (áreas agrícolas, explotación forestal y extracción de áridos) no fueron significativamente relevantes para producir un cambio en la calidad de agua del río Palena. Sin embargo, se observan cambios estacionales directamente relacionados con la distribución de las precipitaciones y los aportes naturales de la cuenca. Se observan diferencias significativas en las concentraciones de aluminio Al^{+3} durante el invierno y primavera, las altas concentraciones de este metal pueden ser relacionadas al lixiviado del suelo y rocas hacia el río por las lluvias y deshielos en estas épocas del año, metal cuyo origen tendría relación con los volcanes existentes en la zona (e.g., Volcán Melimoyu). Por otro lado, se observa un claro aumento de los silicatos SiO_2 , durante el verano, lo cual puede ser debido al aumento de las diatomeas secretoras de sílice en relación con los cocolitofóridos secretores de carbonato (Ittekkot *et al.* 2000), fenómeno que puede estar explicado por el florecimiento algal de diatomeas bentónicas como *Didymosphenia geminata* y *Gomphoneis*.

En nuestro estudio nosotros reportamos 30 familias de macroinvertebrados, lo cual es similar comparada con otros estudios realizados en cuencas cercanas de la Patagonia Chilena. En el río Baker se ha reportado 30 familias de macroinvertebrados (Moya *et al.* 2009), mientras que en el río Aysén se han registrado 29 familias (Oyanedel *et al.* 2008).

Al compararlas con cuencas de la Patagonia Argentina, la riqueza es ligeramente más baja, ya que en la cuenca del río Azul-Quemquemtreu se han reportado 34 familias (Miserendino & Pizzolon 2003), en la cuenca del río Chubut 38 familias (Miserendino 2007), 28 familias se han reportado en la cuenca del río Santa Cruz (Tagliaferro & Pascual 2017), mientras que en la cuenca del río Negro se han reportado 23 familias (Wais & Bonetto 1988).

Al comparar todos estos estudios en la Patagonia Chileno-Argentina es posible registrar 68 familias de macroinvertebrados (Apéndice 1), correspondiendo los taxa dominantes, al igual que nuestro estudio, a estados inmaduros de insectos, encontrándose las mayores diversidades para los ordenes Plecoptera (6 familias), Ephemeroptera (6 familias), Trichoptera (13 familias) y Diptera (14 familias). Los taxa no insectos (19), correspondieron a un 30% del ensamble de macroinvertebrados. Todas las cuencas del Cuadro 1 tuvieron familias exclusivas, esto es, que no estuvieron presentes en las otras cuencas. A pesar de que en la cuenca del río Palena se presentaron cuatro familias exclusivas, los arácnidos Hydrachnidae, los ephemeropteros Oniscigastridae, los coleópteros Dryopidae y los dípteros Ephydriidae, estos ya han sido reportados en pequeños ríos Patagónicos (Miserendino 1995, Miserendino & Pizzolon 1999, Pessacq 2009). Las restantes 25 familias estuvieron presentes en las otras cuencas, lo que sugiere la amplia distribución de las mismas familias de macroinvertebrados en ríos de la Patagonia, e incluso en otros ríos y esteros de aguas frías asociados a la cordillera de los Andes al norte de la Patagonia Chilena (Salvo *et al.* 2020).

El río Palena presenta una baja actividad antrópica comparado a otros ecosistemas de la Patagonia Chileno-Argentina (Miserendino *et al.* 2016, Oyanedel *et al.* 2008). Las bajas actividades presentes en la cuenca no han permitido evidenciar alteraciones significativas en las características físicas, químicas y biológicas del río, los cuales puedan asociarse a eventos de contaminación o alteración de su flujo y régimen de caudal. Nuestro estudio provee información valorable del estado de salud del ecosistema acuático del río Palena, medido a través de calidad de agua, como de macroinvertebrados acuáticos. Debido a que existen pocos estudios de macroinvertebrados en cuencas de la Patagonia Chilena, del mismo modo, es un aporte al avance del conocimiento en la biota acuática al describir las familias de macroinvertebrados bentónicos presentes en la cuenca del río Palena. Sin embargo, es necesario otros estudios que describan la estructura de macroinvertebrados bentónicos con menores niveles taxonómicos (genero, especie) de manera de entender mejor el comportamiento de esta poco explorada cuenca.

CONCLUSIONES

El río Palena es un río prácticamente sin presencia de nutrientes, el cual no presentó variables en altas concentraciones que permitan indicar contaminación de sus aguas, dado posiblemente a que es un río que presenta baja perturbaciones antropogénicas, principalmente por la baja densidad poblacional en su cuenca. La calidad del agua de este río mostró altos niveles de oxígeno disuelto, lo cual puede permitir el desarrollo de organismos acuáticos, lo que se vio reflejado en la presencia de organismos de la fauna bentónica propios de ríos bien oxigenados como insectos efemerópteros y plecópteros. Por otra parte, la riqueza de familias de macroinvertebrados es comparable a las de otras cuencas de la Patagonia Chileno-Argentina, evidenciando la alta diversidad en la cuenca.

El río mostró claramente dos regímenes de caudal bien marcado que determinan la presencia de algunos elementos físico-químico del agua. Se observó los mayores caudales entre invierno y primavera y un período de estiaje entre verano y otoño austral. Nuestro trabajo permitió conocer las características de un río con baja intervención, el cual podría servir de estándar de calidad del agua para otros ríos en la Patagonia y realizar esfuerzos en mantener sus condiciones ambientales. El presente estudio es también una base para futuros estudios de modelos de calidad de agua para predecir cambios a largo plazo en la era del cambio climático y el aumento de las presiones antropogénicas.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Fondo de desarrollo regional de los Lagos (FNDR N°30115221-0) y por el proyecto FONDECYT 11190631. C.L-B fue financiado mediante una Beca de Doctorado ANID (Ex CONICYT).

REFERENCIAS

- Anderson, M.J., Gorley, R.N., Clarke, K.R. 2008. PERMANOVA + for PRIMER: guide to software and statistical methods. Plymouth: PRIMER-E Ltd.
- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Best, J. 2019. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience* 12: 7-21.
- Fernández, H., Domínguez, E. 2001. Guía para la determinación de artrópodos bentónicos sudamericanos. Serie Investigaciones de la UNT, Sub serie Ciencias Exactas y Naturales, Tucumán. 450 p.
- Fierro, P., Bertrán, C., Mercado, M., Peña-Cortés, F., Tapia, J., Hauenstein, E., Caputo, L., Vargas-Chacoff, L. 2015. Landscape composition as a determinant of diversity and functional feeding groups of aquatic macroinvertebrate in southern rivers of the Araucanía, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research* 43: 186-200.
- Fuentes, N., Gómez, L., Venegas, H., Rau, J.R. 2020. Total devastation of river macroinvertebrates following a volcanic eruption in southern Chile. *Ecosphere* 11: e03105.
- Ittekkot, V., Humborg, C., Schäfer, P. 2000. Hydrological alterations and Marine biogeochemistry: A silicate issue? Silicate retention in reservoirs behind dams affects ecosystem structure in coastal seas. *BioScience* 50: 776-782.
- Jarvie, H.P., Smith, D.R., Norton, L.R., Edwards, F.K., Bowes, M.J., King, S.M., Scarlett, P., Davies, S., Dils, R.M., Bachiller-Jareno, N. 2018. Phosphorous and nitrogen limitation and impairment of headwater streams relative to rivers in Great Britain: A national perspective on eutrophication. *Science of the Total Environment* 621: 849-862.
- Ministerio de Energía. 2016. Estudio de Cuencas. Análisis de condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas del Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo, Yelcho, Palena, Cisnes, Aysén, Baker y Pascua. Chile. 104 pp.
- Miserendino, M.L. 1995. Composición y distribución del macrozoobentos de un sistema lótico andino-patagónico. *Ecología Austral* 5: 133-142.
- Miserendino, M.L. 2007. Macroinvertebrate functional organization and water quality in a large arid river from Patagonia (Argentina). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 43: 133-145.
- Miserendino, M.L., Pizzolon, L.A. 1999. Rapid assessment of river water quality using macroinvertebrates: a family level biotic index for the Patagonic andean zone. *Acta Limnologica Brasiliensia* 11: 137-148.
- Miserendino, M.L., Pizzolon, L.A. 2003. Distribution of macroinvertebrate assemblages in the Azul-Quemquemtreu river basin, Patagonia, Argentina. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 37: 525-539.
- Miserendino, M.L., Kutschker, A.M., Brand, C., Manna, L.L., Di Prinzio, C.Y., Papazian, G., Brava, J. 2016. Ecological status of a Patagonian mountain river: Usefulness of Environmental and biotic metrics for rehabilitation assessment. *Environmental Management* 5: 1166-1187.

- Moya, C., Valdovinos, C., Moraga, A., Romero, F., Debels, P., Oyanedel, A. 2009. Patrones de distribución espacial de ensamblajes de macroinvertebrados bentónicos de un sistema fluvial Andino Patagónico. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 425-442.
- Othman, F., Alaaeldin, M.E., Seyam, M., Ahmed, A.N., Teo, F.Y., Fai, Ch.M., Afán, H.A., Sherif, M., Sefelnasr, A., El-Shafie, A. 2020. Efficient river water quality index prediction considering minimal number of inputs variables. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 14: 751-763.
- Oyanedel, A., Valdovinos, C., Azócar, M., Moya, C., Mancilla, G., Pedreros, P., Figueroa, R. 2008. Patrones de distribución espacial de los macroinvertebrados bentónicos de la cuenca del río Aysén (Patagonia Chilena). *Gayana* 72: 241-257.
- Pessacq, P. 2009. Estado de conocimiento del orden Ephemeroptera en la Patagonia. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina* 68: 155-161.
- Salvo, J., Valdovinos, C., Fierro, P. 2020. Benthic macroinvertebrate assemblages of a stream-lake network in the upper zone of the trans-Andean basin of the Valdivia River (Chile). *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* <https://doi.org/10.1080/00288330.2020.1784239>
- Scordo, F., Spetter, C.V., Seitz, C., Piccolo, M.C., Perillo, G.M.E. 2020. Spatial and seasonal dynamics of water physical-chemical parameters in rivers and lakes of an Argentinian Patagonian basin. *Environmental Earth Sciences* 79: 322.
- Singh, K., Malik, A., Mohan, D., Sinha, S. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)-a case study. *Water Research* 38: 3980-3992.
- Tagliaferro, M., Pascual, M. 2017. First spatio-temporal study of macroinvertebrates in the Santa Cruz River: a large glacial river about to be dammed without a comprehensive pre-impoundment study. *Hydrobiologia* 784: 35-49.
- Varol, M. 2011. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials* 195: 355-364.
- Wais, I.R., Bonetto, A.A. 1988. Analysis of the allochthonous organic matter and associated macroinvertebrates in some streams of Patagonia (Argentina). *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* 23: 1455-1459.
- Xu, H.S., Xu, Z.X., Wu, W., Tang, F.F. 2012. Assessment and Spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan River Basin, China. *Procedia Environmental Sciences* 13: 1641-1652.

Apéndice 1. Familias de macroinvertebrados presentes en ríos patagónicos de Chile y Argentina, Río Baker (Moya *et al.* 2009), Río Aysén (Oyanedel *et al.* 2008), Río Santa Cruz (Tagliaferro & Pascual 2017), Río Azul Quemquemtreu (Miserendino & Pizzolon 2003), Río Chubut (Miserendino 2007), Río Negro (Wais & Bonetto 1988). / Macroinvertebrates families presents in Patagonian rivers of Chile and Argentina, Baker River (Moya *et al.* 2009), Aysén River (Oyanedel *et al.* 2008), Santa Cruz River (Tagliaferro & Pascual 2017), Azul Quemquemtreu River (Miserendino & Pizzolon 2003), Chubut River (Miserendino 2007), Negro River (Wais & Bonetto 1988).

Orden/Familia	Nuestro estudio	Río Baker	Río Aysén	Río Santa Cruz	Río Azul- Quemquemtreu	Río Chubut	Río Negro
Gastropoda							
Chiliniidae	•	•	•	•	•	•	•
Cochliopidae				•			
Planorbidae					•	•	
Lymnaeidae		•		•		•	
Amnicolidae		•	•				
Ancylidae							•
Tricladida							
Dugesiiidae		•			•	•	
Hirudinea							
Glossiphoniidae				•	•	•	

Continuación Apéndice 1

Orden/Familia	Nuestro estudio	Río Baker	Río Aysén	Río Santa Cruz	Río Azul- Quemquemtreu	Río Chubut	Río Negro
Temnocephalidae						•	
Oligochaeta							
Haplotaxidae				•			
Lumbriculidae		•		•	•	•	
Naididae		•	•	•		•	
Tubificidae	•					•	
Phreodrilidae						•	
Arachnida							
Hydrachnidae	•						
Amphipoda							
Hyaellidae		•	•	•	•	•	•
Isopoda							
Janiridae			•				
Decapoda							
Aeglidae			•			•	•
Parastacidae							•
Copepoda				•			
Ostracoda				•			
Ephemeroptera							
Baetidae	•	•	•	•	•	•	•
Leptophlebiidae	•	•	•	•	•	•	•
Ameletopsidae	•		•		•	•	
Caenidae						•	
Oniscigastridae	•						
Siphonuridae							•
Plecoptera							
Austroperlidae	•	•	•	•	•	•	•
Gripopterygidae	•	•	•	•	•	•	•
Notonemouridae	•	•	•		•		•
Perlidae	•		•		•	•	•
Diamphipnoidae	•						•
Eustheniidae	•	•					
Trichoptera							
Hydrobiosidae	•	•	•	•	•	•	
Hydropsychidae	•	•	•	•	•	•	
Hydroptilidae	•	•	•	•	•	•	
Glossosomatidae	•		•	•	•	•	•
Policentropidae		•	•				
Leptoceridae		•			•	•	•

Continuación Apéndice 1

Orden/Familia	Nuestro estudio	Río Baker	Río Aysén	Río Santa Cruz	Río Azul-Quemquemtreu	Río Chubut	Río Negro
Philopotamidae		•	•				
Limnephilidae		•	•		•	•	•
Sericostomatidae					•	•	•
Philorheithridae					•		
Helicophidae					•		
Helicopsychidae			•				
Calamoceratidae							•
Coleoptera							
Elmidae	•	•	•	•	•	•	
Dryopidae	•						
Hydrophilidae	•			•		•	
Hydrochidae	•			•			
Psephenidae	•						•
Helodidae		•					
Gyrinidae						•	
Diptera							
Chironomidae	•	•	•	•	•	•	•
Simuliidae	•	•	•	•	•	•	•
Empididae	•	•	•	•	•	•	
Tipulidae	•	•	•	•	•	•	
Athericidae	•	•	•		•	•	•
Blephariceridae	•	•	•		•		•
Tabanidae	•				•	•	
Ephydriidae	•						
Muscidae				•	•	•	
Pelecorhynchidae				•			
Ceratopogonidae		•			•	•	
Rhagionidae				•			
Psychodidae						•	
Syrphidae					•		
Odonata							
Aeshnidae		•			•		

Received: 26.01.2021

Accepted: 20.10.2021