



I I M Y C

Serie: Informes científico-técnicos del
Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras

Informe Técnico N°48

Valor agregado a los residuos del pacú *Piaractus mesopotamicus*



Autores: Analía V. Fernández Gimenez, Yamila E. Rodríguez, M. Victoria Laitano, J. Cristina del Valle, Ivana S. Friedman, Clara Liebana, Mercedes N. Alvarenga, M. Florencia Fangio, Liesel B. Gende, Hernán J. Sacristán, Paloma Moran Giardini. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC) UNMdP-CONICET
Mar del Plata, Argentina

Mar del Plata, abril 2026

Citar como: Fernández Giménez AV, Rodríguez YE, Laitano MV, del Valle JC, Friedman IS, Liebana C, Alvarenga MN, Fangio MF, Gende LB, Sacristán HJ, Giardini PM. (2026). Valor agregado a los residuos del pacú *Piaractus mesopotamicus*. Informes científico-técnicos del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras N°48 (UNMdP-CONICET). 10pp. ISSN 2796-9088

Este informe responde a una solicitud de información por parte de Hreñuk S.A. (Rosamonte, Apóstoles, Misiones, Argentina).

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.

ISSN 2796-9088

La “Serie: Informes científico-técnicos del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras” se aloja en el sitio <https://www.iimyc.gob.ar/iimyc/es/informes-tecnicos/>

La utilización, redistribución, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original y que las obras que resulten sean publicadas bajo las mismas condiciones de libre acceso. Esta licencia se aplica exclusivamente al texto de la presente publicación. Para utilizar cualquier otro material que aparezca en ella (tal como textos, imágenes, ilustraciones o gráficos), será necesario pedir autorización a la Dirección del IIMyC iimyc@mdp.edu.ar. No está permitido utilizar el logotipo del IIMyC.

Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: “La presente traducción no es obra del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC). El IIMyC no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en el/los idiomas que se publique será el texto autorizado”.

Mar del Plata, abril 2026

VALOR AGREGADO A LOS RESIDUOS DEL PACÚ *PIARACTUS MESOPOTAMICUS*

Analía V. Fernández Gimenez¹, Yamila E. Rodríguez¹, M. Victoria Laitano¹, J. Cristina del Valle¹, Ivana S. Friedman¹, Clara Liebana¹, Mercedes N. Alvarenga¹, M. Florencia Fangio², Liesel B. Gende³, Hernán J. Sacristán^{4, 5}, Paloma Moran Giardini³

¹Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) - Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas (CONICET), Mar del Plata, Argentina. Funes 3350, B7602AYL - Mar del Plata, Argentina.

²Instituto de Investigaciones Físicas de Mar del Plata (IFIMAR), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) - Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas (CONICET), Mar del Plata, Argentina. Funes 3350, B7602AYL - Mar del Plata, Argentina.

³Instituto de Investigaciones en Producción, Sanidad y Ambiente (IIPROSAM), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) - Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas (CONICET), Mar del Plata, Argentina. Funes 3350, B7602AYL - Mar del Plata, Argentina.

⁴Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biodiversidad y Biología Experimental, Laboratorio de Biología de la Reproducción, Crecimiento y Nutrición de Crustáceos Decapodos. Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, C1428EGA Buenos Aires, Argentina.

⁵CONICET-Universidad de Buenos Aires, Instituto de Biodiversidad y Biología Experimental y Aplicada (IBBEA). Buenos Aires, Argentina.

[Correspondencia: Analía Fernández Gimenez <fgimenez@mdp.edu.ar>]

RESUMEN. Este informe técnico presenta aportes a la revalorización de residuos del pacú *Piaractus mesopotamicus*. Esta especie es un importante recurso acuícola cultivado en el noreste de nuestro país. La empresa Hreñuk S.A. (Rosamonte) ha desarrollado la acuicultura como industria convirtiéndose en líder nacional de esta actividad a gran escala, produciendo un alimento proteico de calidad. Como parte de esta actividad productiva se generan residuos luego de la faena como restos de pescado, huesos, piel, vísceras con gran potencial de revalorización y generación de subproductos diversos con valor agregado. **El presente informe detalla los avances en la revalorización de vísceras de pacú (estómago, ciegos e intestino) para la obtención de complejos enzimáticos. Asimismo, aborda el tratamiento y mejoramiento de harinas vegetales y carcasas para la producción de bioproductos proteicos mediante hidrólisis enzimática y fermentación con levaduras.**

ABSTRACT. Added value to the waste of the pacu *Piaractus mesopotamicus*. This technical report presents advances in the valorization of waste derived from pacu (*Piaractus mesopotamicus*), an important aquaculture species farmed in northeastern Argentina. Hreñuk S.A. (Rosamonte) company has successfully developed aquaculture as an industrial activity, becoming a leader in large-scale production and supplier of high-quality protein products. As part of this production process, significant amounts of waste are generated during fish processing, including bones, skin, and viscera, all of which have considerable potential for the valorization and for the generation of diverse value-added by-products. This report details the progress achieved in the valorization of pacu viscera (stomach, cecum, and intestine) for the extraction of enzyme complexes, as well as their application in the treatment and improvement of plant-based meals and fish carcasses to produce protein bioproducts through hydrolysis and yeast fermentation.

Palabras clave: acuicultura, peces, residuos, revalorización, biotecnología

Key words: aquaculture, fish, waste, valorization, biotechnology

INTRODUCCIÓN

Los organismos acuáticos representan una de las fuentes alimentarias más saludables y nutritivas, proporcionando proteínas de excelente calidad con perfiles completos de aminoácidos esenciales, vitaminas, minerales y una mayor concentración de ácidos grasos omega-3 de cadena larga comparado con cualquier otro producto alimenticio (Robinson et al. 2022). La acuicultura ha emergido como el sector de producción de alimentos de más rápido crecimiento a nivel mundial, posicionándose

se como la respuesta fundamental para satisfacer la creciente demanda global de productos acuáticos. El consumo mundial de pescado per cápita aumentó de 9 kg en 1961 a 20,7 kg en 2022 (FAO 2024), reflejando el reconocimiento creciente de sus beneficios nutricionales.

Ante el crecimiento poblacional proyectado y el estancamiento de la pesca de captura, la acuicultura ha experimentado un crecimiento exponencial desde finales de los años ochenta. En 2022, la producción acuícola representó el 51% del total de pescado producido mundialmente, superando por primera vez

en la historia a la pesca de captura (FAO 2024). Según cifras de la FAO, en América Latina y el Caribe se producen más de 15 millones de toneladas de productos pesqueros y acuícolas al año, y el sector ha crecido sostenidamente a un 7,7 % anual desde el año 2000 (FAO 2024).

En Argentina, aunque la acuicultura es aún incipiente, presenta un alto potencial de desarrollo dado los amplios recursos hídricos del país y la disponibilidad de insumos para la producción de alimentos balanceados. Esta actividad productiva constituye un motor para el desarrollo social y económico, supone una garantía de alimento de alta calidad y es clave en la seguridad alimentaria de las poblaciones. El pacú *Piaractus mesopotamicus* es una de las especies de peces autóctonas más cultivadas en nuestro país; es una especie omnívora oportunista con amplia variedad de ítems en su alimentación.

El crecimiento de la acuicultura también ha generado nuevos desafíos tecnológicos, uno de los más relevantes es la gestión de residuos provenientes de la faena de los peces cultivados. Estos residuos son una consecuencia de la actividad productiva y el desarrollo económico y los mismos pueden causar efectos adversos a la salud pública y al ambiente. La acuicultura genera distintos tipos de residuos, uno de los más importantes por el volumen generado, corresponde a los restos animales no destinados a consumo humano, compuesto por ejemplares no aptos para la venta comercial por talla, deformidades, etc. y restos no comercializables luego del procesamiento (cabeza, esqueleto, aletas, vísceras, escamas, caparazones, etc.). La falta de infraestructura necesaria y las dificultades técnicas para una correcta gestión de estos residuos supone una preocupación desde el punto de vista ambiental, económico y legal; por lo tanto, es importante proponer alternativas que consideren los desechos como recursos para otros ciclos de producción.

En el presente informe se presentan resultados de investigaciones científico tecnológicas llevadas a cabo por integrantes del grupo de investigación (GI) “Fisiología de Organismos Acuáticos y Biotecnología” (IIMyC; FCEyN, UNMdP, CONICET) en colaboración con Hreñuk S.A., empresa dedicada al cultivo de pacú en la provincia de Misiones, Argentina. Se detalla en el mismo los avances en materia de revalorización de residuos del pacú y generación de subproductos con valor agregado con el objetivo de promover su cultivo sostenible bajo el concepto de residuo cero y promover la diversidad de subproductos derivados. En este informe se detallan ensayos realizados con **vísceras** (estómago, ciegos intestinales, intestino) y **carcasa** (cabeza, huesos, espinas, etc.; excepto vísceras) para la obtención de diversos subproductos como **complejos enzimáticos**, **harina de soja mejorada** (con bajo contenido de inhibidores de proteinasas) y bioproductos proteicos o bioconvertidos a partir de procesos enzimático y fermentativo

VÍSCERAS

Aproximadamente el 45 % de los desechos generados durante la industrialización de los peces se produce en la etapa de evisceración, por lo que las **vísceras** constituyen uno de los residuos más abundantes de la industria acuícola y pesquera (Amorim et al. 2016). Las vísceras de pescado que incluyen estómagos, intestinos y ciegos pilóricos, son una fuente rica en enzimas digestivas, especialmente proteinasas de actividad ácida en el estómago y proteinasas de actividad alcalina en el intestino y ciegos pilóricos (Vannabun et al. 2014).

Las **proteinasas** catalizan la hidrólisis de proteínas y presentan un amplio campo de investigación y aplicación biotec-

nológica. Numerosos estudios han abordado las aplicaciones comerciales de enzimas digestivas recuperadas a partir de residuos de pescado, destacando que el desarrollo de tecnologías nuevas y mejoradas ha permitido su incorporación en diversos procesos industriales. Entre estos se incluyen la producción de piensos, ensilados, fertilizantes, biodiésel y biogás, así como su utilización en las industrias cosmética, alimentaria, de bebidas, detergentes y textiles (Fasim et al. 2021, Sen et al. 2021). Estos productos de origen natural son generalmente mejor aceptados que sus equivalentes sintéticos, ya que los consumidores los perciben como más seguros (Ferraro et al. 2013). En este contexto, se espera que la extracción de enzimas a gran escala para el desarrollo de productos de valor agregado continúe en expansión, impulsada por el crecimiento sostenido de la demanda.

Para revalorizar las enzimas digestivas presentes en los residuos de la acuicultura, es necesario conocer, en primera instancia, sus propiedades funcionales. La **caracterización de los parámetros bioquímicos de estas enzimas** es necesaria para comprender sus tipos, modos de acción y niveles de actividad. A partir de esta información, es posible proponer la incorporación de ellas en procesos biotecnológicos, para promover en el mercado y asegurar su uso rentable a escala industrial con el objetivo principal de obtener productos de valor agregado a partir de desechos de pescado (Friedman et al. 2022). Para caracterizar estas enzimas, los estudios suelen determinar la temperatura y pH óptimo y su estabilidad, ya que estos parámetros determinarán su factibilidad de uso en distintos procesos industriales.

VÍSCERAS: estómago para la obtención de complejos enzimáticos

En relación al presente informe, para los ensayos de caracterización enzimática se utilizó el **estómago** de cinco ejemplares de *P. mesopotamicus* proporcionados por la empresa Hreñuk S.A. Los ejemplares utilizados tenían un peso medio total de $2,37 \pm 0,41$ kg y un peso medio de los estómagos de $44,19 \pm 8,46$ g.

Se prepararon extractos proteicos a partir de los estómagos de los peces de acuerdo a la metodología de rutina utilizada por el grupo de investigación (GI). La **actividad proteolítica en extractos proteicos de estómago** se determinó a pH 2, de acuerdo a Friedman et al. (2022). Una unidad de actividad de proteinasa aspártica (U) se definió como el cambio de absorbancia por minuto en el extracto proteico en las condiciones del ensayo. La actividad total se expresó como unidades de enzimas por mL de extracto crudo (U/mL), y la actividad específica se describió como unidades por miligramo de proteína (U/mg proteína). El rendimiento visceral se calculó como unidades por gramo de tejido (U/ g tejido). El contenido de proteína soluble de los extractos se determinó mediante el método de Bradford (1976), utilizando albúmina sérica bovina (Sigma A9647) como proteína estándar. Los resultados se expresaron en miligramos de proteína por mililitro de extracto crudo (mg/ mL). Cada ensayo se realizó por triplicado. Se reportaron valores de actividad total de $12,5 \pm 0,61$ U/mL, actividad específica $10,6 \pm 0,60$ U/mg proteína, rendimiento visceral $1,2 \pm 0,08$ U/ g tejido y contenido de proteína soluble $15,2 \pm 2,79$ mg/ mL.

La **presencia de proteinasas aspárticas (pepsina y cathepsina D)** en extractos estomacales se confirmó incubando cada extracto proteico con un inhibidor específico, Pepstatina A. Se determinó la actividad proteolítica remanente luego de la incubación y, posteriormente, se calculó el porcentaje de inhibición considerando 0 % de inhibición el tratamiento control sin inhibidor. En presencia del inhibidor pepstatina A, la actividad

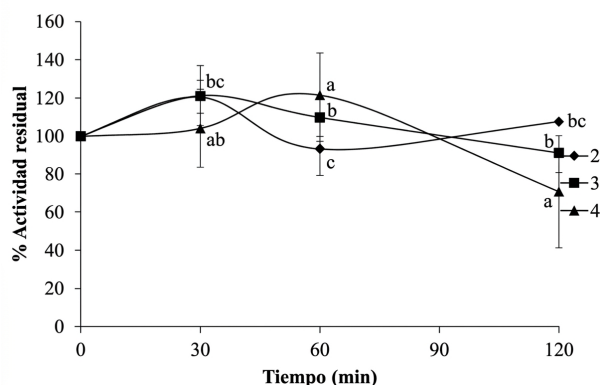


Fig. 1. Estabilidad de la actividad enzimática en extractos de estómago de pacú en diferentes pHs (2, 3 y 4).

proteolítica se inhibió en un 97,11 %. Se considera que a mayor porcentaje de inhibición mayor presencia de enzimas proteinasas aspárticas, por lo tanto, **podemos confirmar la presencia exclusiva de proteinasas aspárticas en estómago de pacú.**

Se evaluó el **pH óptimo** de la actividad enzimática; para ello se determinó la actividad de la proteinasa a pH 2, 3 y 4. Se utilizó Buffer Universal en todas las muestras. El buffer se ajustó a cada nivel de pH y el sustrato de hemoglobina se disolvió en la solución buffer correspondiente. Los valores de actividad enzimática a pH 2, 3 y 4 registrada fue $10,6 \pm 0,60$; $9,7 \pm 0,76$ y $2,4 \pm 0,33$ U/mL, respectivamente, evidenciando una disminución significativa de la actividad catalítica a pH 4. Por lo tanto, podría afirmarse que las enzimas actúan en **condiciones óptimas a pH 2 y 3.**

Para evaluar el **efecto del pH en la estabilidad de las enzimas**, los extractos proteicos de estómago se pre-incubaron en los distintos pHs, durante 30, 60 y 120 min a 25 °C. A continuación, se añadió la solución de sustrato y se midió la actividad proteolítica como se describió previamente. La actividad enzimática se expresó como porcentaje de actividad residual, donde el 100 % de actividad corresponde a la actividad enzimática de los extractos sin pre-incubación (tiempo 0). En la figura 1 se muestra la estabilidad de las enzimas aspárticas, las cuales mostraron una alta estabilidad en todas las condiciones de pH evaluadas. Luego de 120 min de incubación, la actividad enzimática se mantuvo sin modificaciones (Fig. 1).

La **temperatura óptima** para la actividad de las enzimas estomacales se determinó incubando extractos proteicos a pH 2 con la solución de sustrato a 10, 25, 40 y 50 °C. Luego se evaluó la actividad proteolítica, la cual reportó una actividad promedio de $13,93 \pm 0,84$ U/mL sin diferencias significativas entre las diferentes temperaturas.

Para evaluar la **estabilidad térmica**, se pre-incubó durante 30, 60 y 120 min a las temperaturas mencionadas y se determinó la actividad enzimática, la cual evidenció **alta estabilidad en todas las condiciones de temperatura evaluadas.** Después de 120 min de incubación, la actividad enzimática se mantuvo sin cambios, sin observarse diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tiempos (Fig. 2).

Conocer las **condiciones de desnaturalización o inactivación de las enzimas** resulta importante para su aplicación en la industria dado que en distintos procesos tecnológicos es necesario controlar el tiempo de acción de las mismas. Dado que las peptidasas aspárticas de pacú permanecieron activas

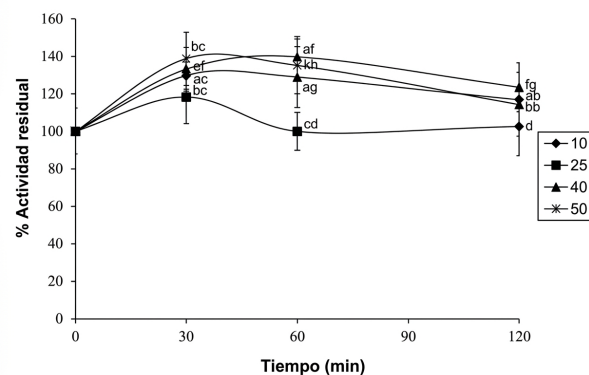


Fig. 2. Estabilidad de la actividad enzimática en extractos de estómago de pacú en diferentes temperaturas (10, 25, 40 y 50 °C).

después de 120 min, se realizó un ensayo para identificar la temperatura de inactivación. Los extractos proteicos de estómago se sometieron a tratamiento térmico a 70 °C durante 10 y 20 min, siguiendo el protocolo descrito previamente. La actividad enzimática residual se expresó como porcentaje (%), considerándose la actividad específica medida sin pre-incubación a pH 2 como el 100 %. Las enzimas se consideraron desnaturalizadas cuando su actividad residual fue inferior al 5 %. Los resultados mostraron que **las enzimas estomacales de pacú se inactivan al ser expuestas a 70 °C durante 10 min.**

Se evaluó el **efecto de diversas sales y surfactantes sobre la actividad enzimática de los estómagos de pacú** según Friedman et al. (2024). Se prepararon soluciones de CaCl_2 (10 mM) y NaCl (10 mM), SDS (0,1 % p/v, Biopack), Triton X-100 (5 % v/v, Sigma-Aldrich) y Tween 80 (5 % v/v, Sigma-Aldrich). Se incubó un volumen de 5 μL del compuesto ensayado y 5 μL de extracto enzimático durante 60 min a 25 °C. Posteriormente, se determinó la actividad enzimática como se mencionó previamente. La actividad proteolítica aspártica sin el compuesto fue el tratamiento de control. Los resultados se expresaron como porcentaje de actividad proteolítica residual. La **actividad enzimática se mantuvo estable en presencia de todos los compuestos evaluados** con porcentajes de actividad residual entre 69,6 y 88,7 % para los surfactantes SDS; Triton X-100 y Tween 80. La actividad **enzimática residual en presencia de CaCl_2 fue de 99,7 %** y se observó un **efecto estimulador de la actividad catalítica con NaCl (121,6 %).**

CONCLUSIÓN: las enzimas provenientes del estómago de pacú mantienen la actividad catalítica y son estables en diferentes condiciones de pH, temperatura, salinidad y surfactantes, lo que subraya su **versatilidad para el uso industrial.**

VÍSCERAS: ciegos intestinales e intestino para la obtención de complejos enzimáticos

Para los ensayos de caracterización enzimática se utilizaron **ciegos e intestino** de diez ejemplares de *P. mesopotamicus* proporcionados por la empresa Hreñuk S.A. Los ejemplares utilizados tenían un peso medio total de $1,81 \pm 0,23$ kg; el peso medio de los ciegos de $13,9 \pm 3,41$ g y el correspondiente a las fracciones intestinales de $21,9 \pm 4,18$ g (intestino anterior) y $28,2 \pm 4,68$ g (intestino posterior). Se prepararon extractos proteicos

a partir de cada órgano de acuerdo a la metodología de rutina utilizada por el GI.

Se determinó el **contenido de proteína soluble** (Bradford 1976) y la **actividad de proteinasa alcalina** en cada extracto enzimático (García Carreño 1992). La actividad total y específica de proteinasas alcalinas y el rendimiento visceral se estimaron tal como se describió en la sección anterior. Además, el rendimiento visceral se expresó en unidades por gramo de tejido (U/g tejido). Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

Se observaron diferencias significativas entre los órganos, tanto en la actividad específica como en el rendimiento visceral. Los extractos enzimáticos de ciegos pilóricos presentaron los valores más altos en ambas categorías, seguido por los correspondientes a intestino anterior y luego intestino posterior. Debido a la actividad proteolítica considerablemente menor en la sección posterior del intestino, este extracto se excluyó de los análisis posteriores (Tabla 1).

Con el fin de identificar cuáles son las peptidasas más abundantes en los extractos de pacú, se realizaron ensayos utilizando **inhibidor específico de tripsina** (TLCK- $N\alpha$ -tosil-L-lisina clorometilcetona) con el fin de determinar la abundancia relativa de esta enzima en los extractos enzimáticos. Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición en comparación con la actividad control, donde el inhibidor se sustituyó por buffer a pH 9. Los resultados del ensayo evidenciaron que la inhibición de la actividad de la proteinasa alcalina por TLCK no mostró diferencias significativas entre los órganos estudiados. Esto indicaría que aproximadamente el **47 % de las enzimas presentes en los extractos de ciegos e intestino corresponden a tripsinas**.

Para determinar el **pH óptimo** para la actividad proteolítica de las enzimas se realizaron ensayos en un rango de pH de 7 a 11 a 25 °C según Rodríguez et al. (2025). Además, se evaluó la **temperatura óptima** para la actividad de las proteinasas alcalinas mediante la incubación de extractos con la solución de sustrato (azocaseína al 0,5 % p/v en buffer universal a pH 9) a temperaturas de entre 10 °C y 55 °C. Los ciegos pilóricos mostraron consistentemente una mayor actividad enzimática que el intestino anterior en todos los niveles de pH y temperaturas analizados (Fig. 3).

Para evaluar el **efecto del pH en la estabilidad enzimática**, los extractos se pre-incubaron en un buffer universal a pH 7 a 11 durante intervalos de tiempo variables (0, 30, 60, 90 y 150 min) a 25 °C. A continuación, se añadió la solución de sustrato y se midió la actividad proteolítica como se describió previamente. La actividad de **proteinasas en ciegos intestinales se mantuvo estable en todos los niveles de pH y temperatura analizados**. Por el contrario, la actividad enzimática en **intestino anterior** mostró un aumento de la actividad a partir de los 30 min de exposición, lo que sugiere una posible activación de las enzimas.

Para evaluar la **estabilidad térmica**, se realizó un procedimiento de pre-incubación a pH 9 con temperaturas de 10 °C a 55 °C. Posteriormente se midió la actividad proteolítica. Los extractos enzimáticos de **ciegos intestinales** **mantuvieron la capacidad catalítica a 10 °C y 25 °C** en todo el tiempo del ensayo; a 40 °C, la actividad aumentó hasta los 60 min y hasta que se mantuvo constante, mientras que, a 55 °C, la actividad disminuyó después de 60 min, pero finalmente alcanzó niveles similares a los observados a los 30 min al final del ensayo. **Las proteinasas de intestino anterior también presentaron estabilidad térmica a 10 y 25 °C e inestabilidad a 40 y 55**

°C. Curiosamente, a 40 °C, la actividad de las enzimas aumentó después de 60 min de exposición. Por el contrario, a 55 °C, la actividad disminuyó a los 90 y 150 min (Fig. 4).

Dado que los extractos enzimáticos presentaban actividad a 55 °C después de 150 min, se realizó un ensayo de desnaturalización. Para ello, los extractos se sometieron a un tratamiento térmico a 70 °C y 80 °C durante 10 y 20 min. Tras la pre-incubación, se determinó la actividad proteolítica residual, con el método mencionado previamente. La actividad de la proteinasa alcalina a 25 °C se consideró como el 100 % de actividad. Las enzimas se consideraron desnaturalizadas cuando se mantuvo menos del 5 % de la actividad inicial. **La actividad residual indicativa de desnaturalización (<5 % actividad enzimática) solo se alcanzó a 80 °C, durante 10 min, en ambos órganos.**

Con el fin de determinar la estabilidad enzimática en presencia de compuestos presentes en distintos procesos industriales se incubaron con soluciones 10 mM de $CaCl_2$ y NaCl, y con surfactantes como SDS (0,1 % p/v, Biopack), Triton X-100 (5 % v/v, Sigma-Aldrich) y Tween 80 (5 % v/v, Sigma-Aldrich) durante 60 min a 25 °C. Posteriormente, se midió la actividad enzimática según el protocolo estándar. La actividad proteolítica alcalina en ausencia de compuestos, se utilizó como tratamiento de control. Los resultados se expresaron como actividad proteolítica residual (%), considerando el tratamiento control como 100 % de actividad. Los resultados evidenciaron que los compuestos actuaron de manera similar en ciegos e intestino anterior. En este sentido, se observó que la exposición a $CaCl_2$ y el tensioactivo Tween-80 provocaron una disminución de la actividad proteolítica. Por otro lado, **las enzimas de ciegos e intestino anterior de pacú mantuvieron su actividad catalítica luego de una hora de exposición a la sal NaCl y los detergentes SDS y Triton X-100.**

CONCLUSIÓN: las enzimas proteolíticas presentes en los extractos de ciegos pilóricos de pacú evidenciaron mayor actividad enzimática, seguido por los extractos de intestino anterior. Las enzimas del intestino posterior mostraron baja actividad, lo que sugiere que este residuo no es adecuado para la extracción de proteinasas; no obstante, podría ser aprovechado para la generación de otros subproductos (fuente de probióticos, biofertilizantes). Las enzimas de ciegos e intestino anterior resultaron estables en un rango de pH de 7 a 11, con una actividad óptima a pH 9 a 11. La temperatura óptima para ambos órganos fue de 55 °C y la actividad enzimática se mantuvo estable a 10 °C y 25 °C, con actividad variable a 40 °C y 55 °C. Por otro lado, las enzimas se mantienen activas en presencia de NaCl, SDS y Triton. **Las proteinasas de actividad alcalina del pacú tienen potencial para diversos usos industriales.**

VÍSCERAS: complejos enzimáticos de ciegos intestinales para el tratamiento de la harina de soja

Los alimentos balanceados para peces y otros animales, requieren altos niveles de proteínas como principal fuente energética; lo que incrementa su costo. La harina de soja se ha consolidado como una importante fuente proteica en dichas formulaciones, debido a su valor nutricional, su elevado contenido proteico y perfil de aminoácidos relativamente equilibrado (Gatlin et al.

Tabla 1. Proteína soluble, actividad específica y rendimiento visceral en ciegos pilóricos, intestino anterior e intestino posterior de extractos de *Piaractus mesopotamicus* a 25 °C, pH 9. Los valores se expresan como media ± error estándar. Diferentes letras en superíndice en cada columna indican diferencias significativas (P <0,05).

	Proteína soluble (mg/mL)	Actividad enzimática (U/mg proteína)	Rendimiento visceral (U/g tejido)
Ciegos pilóricos	2,62 ± 0,438	1,38 ± 0,172 ^a	1,65 ± 0,135 ^a
Intestino anterior	2,48 ± 0,358	0,53 ± 0,125 ^b	0,53 ± 0,092 ^b
Intestino posterior	2,18 ± 0,436	0,16 ± 0,022 ^c	0,22 ± 0,069 ^c

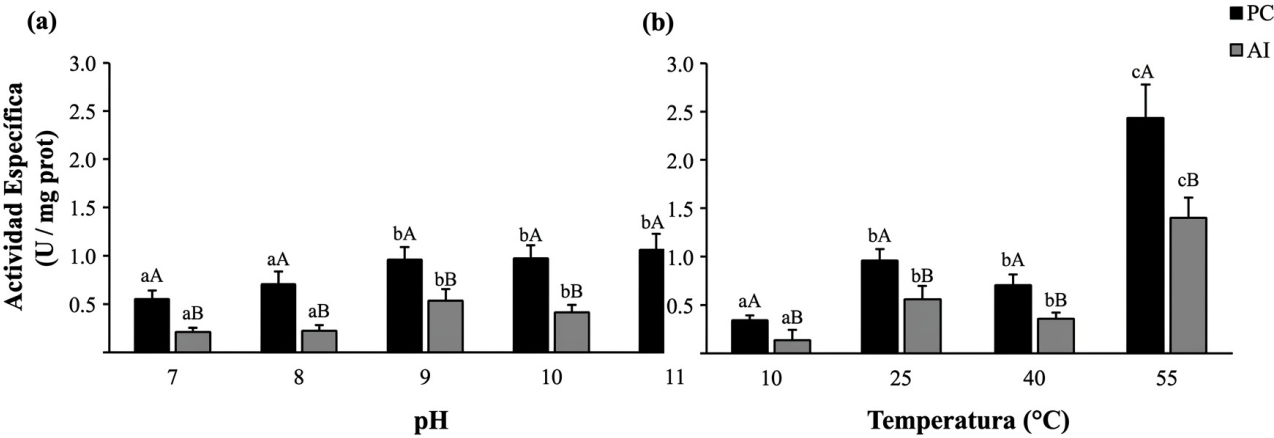


Fig. 3. Actividad específica de proteinasa a diferentes condiciones de (a) pH y (b) temperatura en extractos de ciegos pilóricos (PC) e intestino anterior (AI) de *Piaractus mesopotamicus*. Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre el pH o la temperatura para el mismo órgano. Diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas para el mismo pH o temperatura entre órganos.

2007). Sin embargo, contiene factores antinutricionales termoestables, entre ellos inhibidores de proteinasas, que reducen la digestibilidad proteica y afectan negativamente el crecimiento animal.

En este contexto, el tratamiento enzimático de la harina vegetal surge como una estrategia prometedora para reducir el contenido de inhibidores, aumentar la biodisponibilidad de las proteínas del alimento y, en consecuencia, favorecer tanto el crecimiento como el estado de salud de los animales. A partir de técnicas estandarizadas en el grupo de investigación, nos propusimos obtener harina de soja mejorada como un ingrediente funcional para la alimentación animal utilizando extractos enzimáticos de pacú. En este sentido, **se realizó el tratamiento enzimático de la harina de soja con extractos enzimáticos de ciegos de pacú con el fin de desactivar los compuestos antinutricionales termoestables de la harina y mejorar sus propiedades funcionales.**

Para ello, en primer lugar, se obtuvieron extractos enzimáticos de ciegos digestivos de pacú provenientes del residuo de la faena de acuerdo a Rodríguez et al. (2025), con el fin de obtener las enzimas necesarias para el tratamiento de la harina de soja. Previo al tratamiento de la harina, se evaluó la actividad catalítica de los extractos enzimáticos a 25°C y 40°C, durante 360 min según la metodología propuesta por García Carreño (1992), con el fin de establecer las condiciones más óptimas para el tratamiento. **Se verificó que a 25°C las enzimas de ciegos de pacú, presentan actividad de proteinasas alcalinas a pH 9, mientras que a 40 °C su actividad aumenta significativamente. Además, se observó que estas enzimas son estables durante 360 min en las dos temperaturas evaluadas.**

Luego se realizó el tratamiento enzimático de la harina de soja comercial (Yin Yang) con las enzimas de ciegos de pacú, a 40 °C, según una metodología estandarizada en el grupo de

investigación. La harina sin exposición a las enzimas se utilizó como tratamiento control.

Posteriormente, se evaluó el efecto de la harina de soja sin tratar (control) y tratada con las enzimas del pacú, sobre la fisiología digestiva de dos especies de importancia acuicola: trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Para ello, previamente se obtuvieron los extractos enzimáticos de intestino de 5 ejemplares de cada especie (provistos por productores regionales), siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Se elaboraron los solubles de las harinas (control y tratadas con enzimas de residuos pacú), es decir se obtuvo una fracción líquida a partir de las harinas, y se evaluó el **efecto inhibitorio de cada extracto sobre las enzimas digestivas de trucha y de tilapia** de acuerdo a la técnica propuesta por Friedman (2024). El efecto inhibitorio se expresó en porcentaje residual teniendo como 100 % la actividad de las enzimas digestivas de trucha y tilapia sin incubar con harina. Los resultados demostraron que el tratamiento de la harina de soja con enzimas provenientes de ciegos de pacú disminuyó el efecto de los inhibidores de proteinasas. Esta conclusión se basa en la actividad enzimática observada en trucha y tilapia, la cual fue significativamente mayor cuando se incubó con harina tratada (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de la harina de soja, sin o con tratamiento enzimático con extractos de ciegos de pacú, sobre la actividad de peptidasas en trucha y tilapia. Los valores se expresan como media ± error estándar. Diferentes letras en superíndice en cada columna indican diferencias significativas (P < 0,05).

	Actividad enzimática residual (%)	
Harina de soja	Trucha	Tilapia
Sin tratar	13,1 ± 1,56 ^a	4,8 ± 0,57 ^a
Tratada con ER-Pacú	19,8 ± 0,27 ^b	51,9 ± 9,15 ^b

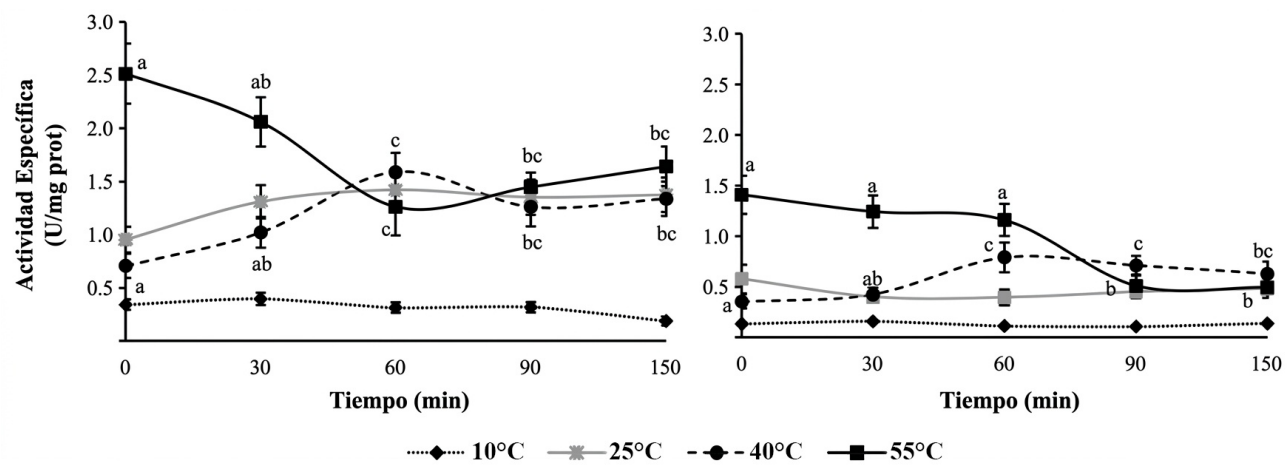


Fig. 4. Efecto de la temperatura sobre la estabilidad de las proteasas alcalinas en extractos enzimáticos de pacú (*Piaractus mesopotamicus*) durante 150 min. Los valores indican la media y el error estándar. a) ciegos pilóricos y b) intestino anterior. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tiempos ($p<0,05$).

Además, se evaluó la **actividad antioxidante de las harinas de soja tratada y sin tratar**, utilizando dos técnicas convencionales DPPH (Shimada 1992) y FRAP (Kah 2024). Para una evaluación integral de la actividad antioxidante, resulta recomendable emplear múltiples ensayos basados en distintos mecanismos de reacción. El método DPPH mide principalmente la capacidad de los compuestos para donar hidrógeno o electrones a un radical estable en un medio orgánico. Se trata de un ensayo simple y ampliamente utilizado, aunque presenta limitaciones para compuestos hidrofílicos. Por su parte, FRAP determina el poder reductor de los antioxidantes mediante la reducción del complejo férrico (Fe^{3+}) a ferroso (Fe^{2+}), reflejando su capacidad de transferencia de electrones en condiciones ácidas. Debido a que estos métodos se basan en mecanismos diferentes (transferencia de electrones vs. donación de hidrógeno) y presentan distinta sensibilidad frente a diversos tipos de compuestos, su combinación permite una caracterización más completa y confiable de la actividad antioxidante total.

En este sentido, la actividad antioxidante de la **harina de soja comercial evidenció mayor actividad antioxidante luego de su tratamiento enzimático** con las enzimas provenientes de ciegos de pacú. Esta actividad se observó con los dos ensayos utilizados para su evaluación (Tabla 3).

Asimismo, se evaluó el grado de hidrólisis mediante la técnica de péptidos solubles en TCA y se observó que el **tratamiento de la harina de soja con las enzimas de residuos de pacú, aumenta la disponibilidad de péptidos**.

Tabla 3. Actividad antioxidante de la harina de soja comercial sin tratar y tratada enzimáticamente con enzimas de ciegos de pacú. Resultados de dos métodos DPPH y FRAP. Letras diferentes indican diferencias significativas entre harina sin tratar y harina tratada enzimáticamente en cada método. Los datos se expresan como media $\pm$ error estándar de la media (SEM).

	DPPH (% inhibición)	FRAP ($\mu\text{mol SO}_4\text{Fe}$)
Harina sin tratar	16,3 $\pm$ 1,33 ^a	413,3 $\pm$ 42,25 ^a
Harina tratada	28,5 $\pm$ 1,19 ^b	461,3 $\pm$ 99,28 ^b

CONCLUSIÓN: la harina de soja comercial contiene factores antinutricionales que inhiben las proteinasas, afectando negativamente la digestión de los animales que la consumen. Aunque estas harinas cuentan con un tratamiento térmico, ciertas moléculas de efecto inhibitorio son termoeestables y permanecen activas. En este sentido, el tratamiento de la harina, utilizando enzimas de ciegos de pacú, resultó positivo dado que se observó una disminución del efecto antinutricional (evaluado en trucha y tilapia), y un aumento, tanto la capacidad antioxidante como el grado de hidrólisis. Esto significaría que las enzimas de ciego de pacú no sólo inactivan compuestos antinutricionales sino que hidrolizan la proteína de la soja, y mejorar una propiedad funcional como es el poder antioxidante, aspectos muy favorables para un ingrediente proteico a ser incorporado en alimentos balanceados.

CARCASAS para la obtención de bioproductos proteicos (bioconvertidos)

Los **“bioproductos proteicos o bioconvertidos”** son productos obtenidos a partir de biomasa biológica (en nuestro caso residuos de pacú) mediante procesos físicos, químicos o biotecnológicos, destinados a su aplicación en alimentos, piensos, farmacéutica o industria. Los residuos de pacú utilizados fueron “carcasas”, es decir todos los restos del pescado luego del fileteado (excepto las vísceras): cabeza, tronco, cola, huesos, espinas, restos de músculo y restos de cuero.

Se aplicaron dos procesos biológicos para el **tratamiento de las carcasas: tratamiento enzimático y fermentación**.

Para el tratamiento enzimático se utilizaron extractos a partir de cabezas de langostino argentino (*Pleoticus muelleri*), dado que el grupo de investigación posee vasta experiencia con estas enzimas, lo que permite asegurar que cuenta con destacadas características catalíticas. Por su parte, para la fermentación se utilizaron levaduras provenientes de residuos de la industria cervecera artesanal de la ciudad de Mar del Plata.

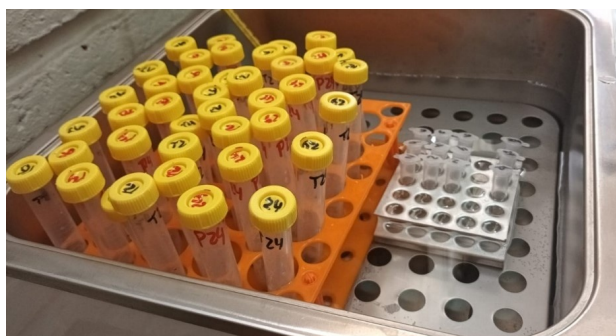
En este contexto, **la estrategia consistió en valorizar residuos de la acuicultura (pacú) mediante el aprovechamiento conjunto de subproductos de la pesca (langostino) y**

de la industria cervecera (levaduras), "promoviendo un enfoque de economía circular.

En primer lugar, se trituraron los restos de pacú en una procesadora. Luego se procesaron 2 kg de cabeza (provisas por planta pesquera de la ciudad de Mar del Plata) y seguidamente, se obtuvo extracto enzimático de acuerdo a técnica estandarizada por el GI. Por último, las levaduras destinadas a la fermentación fueron obtenidas mediante re-siembra y posterior propagación en mosto de cebada de malta Pilsen, provisto por empresa cervecera de la ciudad de Mar del Plata, de acuerdo a técnicas de rutina.

Para la **bioconversión por tratamiento enzimático**, se evaluó, inicialmente, la estabilidad de las enzimas de langostino en las condiciones de dicho proceso (30°C) a distintos tiempos de incubación, determinándose que, luego de 6 h, las enzimas mantienen su actividad.

Finalmente, se incubaron las carcasas de pacú molidas con las enzimas de langostino durante 6 h a la temperatura indicada, se controló que las mismas estuvieran activas durante el proceso y se reservaron muestras de la materia prima y bioconvertido para análisis posteriores.



Para la **bioconversión por fermentación** las carcasas de pacú molidas se incubaron con las levaduras durante 24 h a 25°C. La producción de gases se monitoreó mediante trampas tipo *airlock* para confirmar la actividad fermentativa, y se reservaron muestras para análisis posteriores.



Se realizó el **análisis proximal** de los bioconvertidos y de la materia prima en base seca, determinándose el contenido de proteínas, lípidos y cenizas. Los carbohidratos totales se estimaron por diferencia. El valor energético se calculó considerando los factores energéticos de cada componente. Asimismo, se determinó el **perfil de aminoácidos**. Las determinaciones fueron realizadas por un laboratorio de análisis ambientales de la ciudad de Mar del Plata mediante técnicas de rutina.

Se evidenció un **mayor contenido de proteínas totales en los bioconvertidos** obtenidos por ambos procesos, así como un **mayor contenido de lípidos** en el producto obtenido mediante tratamiento enzimático. Asimismo, **el contenido de cenizas disminuyó en los bioconvertidos en comparación con la materia prima** (Tabla 4).

En cuanto a la **composición de aminoácidos** se observó un patrón similar entre la materia prima y los bioconvertidos. En ambos casos, se registró una mayor abundancia de **lisina y leucina** entre los aminoácidos esenciales y **ácidos glutámico y aspártico** entre los no esenciales, tanto para la materia prima como para el bioconvertido por tratamiento enzimático. Mientras que el obtenido por fermentación solo presentó mayor abundancia de lisina.

Con el fin de evaluar la **inocuidad microbiológica** de los bioconvertidos por hidrólisis y fermentación, se realizó el recuento de microorganismos patógenos (Pereira et al. 2022) de modo de garantizar la **seguridad y calidad del producto final**. Los resultados fueron comparados con los correspondientes a la materia prima. Se observó que los bioconvertidos por tratamiento enzimático mostraron recuentos de bacterias aerobias mesófilas significativamente mayores en comparación con la materia prima y los bioconvertidos por fermentación. Sin embargo, estos **recuentos se mantuvieron dentro de los límites permitidos** establecidos por Food Standards Australia New Zealand (FSANZ 2025) para productos listos para el consumo: un máximo de 6 log UFC/g para recuentos de bacterias aerobias mesófilas y un límite máximo de menos de 4 log UFC/g para Enterobacteriaceae (incluidos los coliformes) en alimentos listos para el consumo. Por el contrario, no se detectaron coliformes totales en ninguna de las muestras analizadas.

Además, se evaluó la **vida útil de los bioconvertidos** mediante técnicas microbiológicas (Pereira et al. 2022). Después de 6 meses de almacenamiento, como producto seco en recipientes con tapa hermética, el bioconvertido por tratamiento enzimático no mostró diferencias en los parámetros evaluados en comparación con la materia prima. En cambio, el bioconvertido por fermentación presentó recuentos más altos de mesófilos aerobios y levaduras y mohos, aunque ambos se mantuvieron dentro de los límites permitidos (FSANZ 2025). En resumen, todos los valores microbiológicos se mantuvieron dentro de los límites aceptables (Tabla 5).

Se realizó el **fraccionamiento de péptidos según el peso molecular**, mediante ultrafiltración con membranas Vivaspin 20-maximum Spin Speed (Sartorius), con un límite de exclusión molecular de 10 kDa y 3 kDa. Posteriormente al fraccionamiento se contó con distintas fracciones de cada bioconvertido: **F1 > 10 kDa; F2 entre 3 y 10 kDa y F3 < 3 kDa**. Luego se evaluó la **capacidad antioxidante** de los bioconvertidos (por tratamiento enzimático y fermentación) y de sus fracciones peptídicas utilizando tres técnicas de rutina. **DPPH, ABTS y FRAP**. Las muestras fueron liofilizadas y, posteriormente, se preparó una solución (5 mg/mL en agua destilada) para cada una. Además, se preparó una solución de homogeneizado de Pm (*Pleurotus muelleri*) bajo las mismas condiciones de liofilización y dilución, la cual se utilizó como control positivo interno, debido a la destacada actividad antioxidante previamente reportada para esta especie (Díaz et al. 2004).

El ensayo **DPPH** reveló una mayor actividad antioxidante en cada fracción de péptidos en comparación con el producto bioconvertido completo, tanto para el tratamiento enzimático como para la fermentación (Tabla 5). Para el bioconvertido por

Tabla 4. Composición proximal de materia prima (carcasas de pacú) y bioconvertidos por tratamiento enzimático y fermentación.

	MATERIA PRIMA	ENZIMÁTICO	FERMENTACIÓN
<i>Proteínas totales (g/100 g)</i>	33.17	44.17	56.80
<i>Grasas totales (g/100 g)</i>	39.90	45.15	27.18
<i>Carbohidratos totales (g/100 g)</i>	<0.1	<0.1	<0.1
<i>Cenizas (g/100 g)</i>	25.48	10.68	16.02
<i>Energía (kcal/100 g)</i>	491.83	583.01	471.84

Tabla 5. Recuento microbiológico de bioconvertidos de pacú por tratamiento enzimático y fermentación. Aus: ausencia. ND: no determinado.

	TRAT. ENZIMÁTICO		FERMENTACIÓN	
	0 meses	6 meses	0 meses	6 meses
Recuento de mesófilos aerobios (log cfu/g)	4,52±0,03 ^a	4,78±0,06 ^b	4,83±0,06 ^b	4,85±0,01 ^b
Recuento hongos y levaduras (log cfu/g)	4,09±0,093 ^a	3,56±0,13 ^b	2,04±0,05 ^c	2,35±0,01 ^c
<i>Staphylococcus aureus</i>	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.
<i>Escherichia coli</i>	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.
<i>Clostridium</i> (44 ± 1 °C, 24 hs anaerobiosis)	ND	ND	ND	ND
<i>Clostridium</i> (35 ± 1 °C, 24 hs anaerobiosis)	ND	ND	ND	ND
<i>Salmonella</i> spp.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.
Coliformes totales	ND	ND	ND	ND
Enterobacteriaceae	ND	ND	ND	ND

fermentación, las fracciones <3 kDa y 3-10 kDa mostraron una mayor capacidad antioxidante que la fracción >10 kDa. Al comparar los métodos de bioconversión, se observaron diferencias significativas entre la fracción <3 kDa obtenida por fermentación y las fracciones <3 kDa y 3-10 kDa obtenidas por tratamiento enzimático, presentando la primera los valores más altos (Tabla 6).

El ensayo **ABTS** (método que se basa en la reducción de un catión radical coloreado (ABTS^{•+}) por acción de antioxidantes en la muestra) mostró para el bioconvertido por tratamiento enzimático, diferencias significativas entre el bioconvertido y sus fracciones <3 kDa y 3-10 kDa, las cuales mostraron una menor actividad antioxidante y también difirieron entre sí (Tabla 6). En cuanto al bioconvertido por fermentación, se registraron diferencias significativas entre el bioconvertido y la fracción >10 kDa, la cual presentó valores inferiores (Tabla 6).

Por su parte, el método **FRAP** reveló un mayor poder antioxidante en todas las fracciones en comparación con el producto bioconvertido completo, tanto para el tratamiento enzimático como para la fermentación, sin observarse diferencias significativas entre ellos (Tabla 6).

En conjunto, al comparar los métodos de bioconversión, se encontraron diferencias significativas entre ellos tanto en los bioconvertidos completos como entre varias fracciones, presentando en general porcentajes de inhibición más altos (mayor actividad antioxidante) el tratamiento enzimático que la fermentación (Tabla 6).

CONCLUSIÓN: la bioconversión de las carcasas de pacú mediante tratamiento enzimático presentó mayor concentración de péptidos que el bioconvertido por fermentación lo que estaría indicando que la proteína del pacú se hidrolizó parcialmente por acción enzimática. El contenido proteico de los bioconvertidos fue superior que la materia prima, enriquecido en lisina, ácido glutámico y aspártico, especialmente. Los análisis microbiológicos mostraron recuentos de bacterias

aerobias mesófilas con valores dentro de los límites permitidos y no se detectaron coliformes. Después de seis meses de almacenamiento, tanto los productos tratados con enzimas como los fermentados mantuvieron una calidad microbiológica aceptable. La actividad antioxidante varió entre fracciones de peso molecular y entre métodos de bioconversión, según lo determinado por ensayos DPPH, ABTS y FRAP, revelando patrones funcionales distintos y dependientes de la fracción. En resumen, se demuestra que la bioconversión, utilizando múltiples residuos industriales (acuicultura, pesca y cervecera), puede ser eficiente para la obtención de bioproductos nutricionalmente valiosos y funcionalmente activos mediante procesos de bajo consumo energético y sin generación de residuos, estableciendo un novedoso marco circular para la gestión sostenible de residuos industriales.

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados presentados en el presente informe demuestran de manera integral el alto potencial de los residuos generados en la producción de pacú (*Piaractus mesopotamicus*) como materia prima para la obtención de productos de valor agregado mediante estrategias biotecnológicas. En particular, se evidencia que tanto las vísceras como las carcasas constituyen recursos valorizables que pueden ser transformados en insumos funcionales, contribuyendo a un modelo productivo más sostenible bajo el concepto de economía circular y residuo cero.

En relación con las **vísceras**, se logró la obtención y caracterización de complejos enzimáticos con propiedades catalíticas destacadas. Las proteinasas ácidas provenientes del estómago mostraron alta estabilidad frente a variaciones de pH, temperatura, sales y surfactantes, mientras que las proteinasas alcalinas de ciegos pilóricos e intestino anterior evidenciaron una elevada actividad y estabilidad en un amplio rango de condiciones. Estas

Tabla 6. Capacidad antioxidante de los bioconvertidos por tratamiento enzimático y fermentación y sus fracciones medidas mediante tres técnicas (DPPH, ABTS y FRAP). Letras diferentes indican diferencias significativas entre métodos para el mismo producto. Los datos se expresan como media $\pm$ error estándar de la media (SEM).

		DPPH (% inhibición)	ABTS (% inhibición)	FRAP ($\mu\text{mol SO}_4\text{Fe}$)
<i>Tratamiento enzimático</i>	bioconvertido	13,4 $\pm$ 3,10 ^{ab}	54,2 $\pm$ 3,10 ^a	94,2 $\pm$ 2,08 ^a
	<3 kDa	23,3 $\pm$ 1,29 ^{cd}	17,7 $\pm$ 3,99 ^{bc}	182,8 $\pm$ 17,38 ^{bc}
	3 - 10 kDa	21,0 $\pm$ 2,49 ^{cd}	25,9 $\pm$ 3,81 ^{bd}	162,9 $\pm$ 3,04 ^c
	>10 kDa	24,3 $\pm$ 0,87 ^{cde}	42,9 $\pm$ 1,25 ^{ad}	185,7 $\pm$ 0,76 ^{bc}
<i>Fermentación</i>	bioconvertido	8,5 $\pm$ 1,49 ^b	18,7 $\pm$ 2,07 ^{bc}	47,7 $\pm$ 4,58 ^a
	<3 kDa	30,6 $\pm$ 2,76 ^e	10,6 $\pm$ 1,95 ^{bc}	243,4 $\pm$ 4,77 ^b
	3 - 10 kDa	27,7 $\pm$ 1,42 ^{de}	11,7 $\pm$ 5,12 ^{ce}	242,8 $\pm$ 22,72 ^b
	>10 kDa	16,8 $\pm$ 1,57 ^{ad}	3,5 $\pm$ 0,89 ^e	215,4 $\pm$ 23,28 ^{bc}

características posicionan a estas enzimas como candidatas promisorias para su aplicación en diversos procesos industriales.

Asimismo, se comprobó la aplicabilidad de estos complejos enzimáticos en el tratamiento de materias primas vegetales, como la harina de soja. El uso de enzimas derivadas de residuos de pacú (ciegos pilóricos) permitió disminuir el efecto de compuestos antinutricionales, incrementar el grado de hidrólisis proteica de la harina y mejorar la actividad antioxidante del producto final. Estos resultados indican que la incorporación de enzimas de origen acuícola puede contribuir significativamente al desarrollo de ingredientes funcionales más digestibles y nutricionalmente mejorados para la alimentación animal.

Por otra parte, la valorización de **carcasas** mediante procesos de bioconversión, tanto enzimáticos como fermentativos, permitió la obtención de bioproductos proteicos con mayor contenido de proteínas y perfiles de aminoácidos de interés nutricional. Además, estos productos presentaron adecuada calidad microbiológica y estabilidad durante el almacenamiento, así como actividad antioxidante dependiente del método de procesamiento y del peso molecular de las fracciones peptídicas. La integración de residuos provenientes de distintas industrias (acuicultura, pesca y cervecaría) en estos procesos refuerza el enfoque de aprovechamiento integral de biomasa y reducción de desechos.

En conjunto, **los resultados obtenidos consolidan la viabilidad técnica de transformar residuos de la industria acuícola en productos con valor funcional, nutricional e industrial**. Este enfoque no solo contribuye a mitigar el impacto ambiental asociado a la generación de residuos, sino que también abre nuevas oportunidades para el desarrollo de bioprocesos innovadores y sostenibles, alineados con las demandas actuales de la bioeconomía.

PROYECCIONES Y DESAFÍOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en este informe constituyen una base sólida para avanzar hacia etapas de desarrollo tecnológico más cercanas a su implementación industrial. En este sentido, uno de los principales desafíos futuros radica en el **escalamiento de los procesos desarrollados a nivel de laboratorio**. Será necesario optimizar las condiciones operativas en sistemas piloto, evaluando variables como tiempos de reacción, relaciones sustrato/enzima, eficiencia y costos energéticos, con el fin de garantizar la reproducibilidad, eficiencia y viabilidad técnica a mayor escala.

En paralelo, resulta clave **promover alianzas estratégicas con empresas productoras de alimentos balanceados, ingredientes funcionales y bioproductos**, que permitan validar estos desarrollos en condiciones reales de producción. La transferencia tecnológica hacia el sector productivo facilitará la

incorporación de estos bioprocesos en cadenas de valor existentes, particularmente en la industria acuícola y agroalimentaria, favoreciendo la adopción de soluciones sostenibles basadas en la valorización de residuos.

Desde el punto de vista experimental, aún se requieren **ensayos complementarios en laboratorio que profundicen la caracterización y aplicabilidad de los productos obtenidos**. Entre ellos, se destaca la necesidad de evaluar la estabilidad y estabilidad durante el almacenamiento de los extractos enzimáticos durante el almacenamiento (vida útil, actividad residual en el tiempo, condiciones óptimas de conservación).

En relación con el **tratamiento de la harina de soja, se plantea como desafío la optimización del proceso tecnológico**, dado que el esquema actual (hidratación-tratamiento-secado) puede resultar económicamente costoso a escala industrial. En este sentido, será necesario explorar alternativas que reduzcan el consumo de agua y energía, tales como procesos en seco, sistemas de aplicación enzimática más eficientes o integración directa en líneas de producción existentes.

Asimismo, se vuelve imprescindible realizar **análisis de factibilidad económica**, contemplando costos de producción, escalado, logística, almacenamiento y potencial valor de mercado de los bioproductos obtenidos. Estos estudios permitirán determinar la competitividad de las tecnologías desarrolladas frente a alternativas convencionales y definir estrategias de implementación.

Finalmente, será relevante avanzar en la **evaluación integral del impacto ambiental y regulatorio de estos procesos**, incluyendo análisis de ciclo de vida, cumplimiento de normativas vigentes y validación de inocuidad para su uso en alimentos o piensos. En conjunto, estos desafíos representan pasos fundamentales para consolidar un modelo de producción sustentable basado en la valorización de residuos y la generación de bioinsumos de alto valor agregado.

BIBLIOGRAFÍA

- Amorim RG, Deschamps FC, Pessatti ML (2016) Hidrolizado proteico de desechos de corvina (*Micropogonias furnieri*) como una manera de agregar valor a los peces y reducir los pasivos ambientales de la industria pesquera. *Lat Am J Aquat Res.* 44: 967-974.
- Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem.* 72: 248-254.
- Díaz AC, Fernández Gimenez AV, Mendiara SN, Fenucci JL (2004) Antioxidant activity in hepatopancreas of the shrimp (*Pleoticus muelleri*) by electron paramagnetic spin resonance spectrometry. *J Agric Food Chem.* 52: 3189-3193.
- FAO (2024) El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción. Roma.
- Fasim A, More VS, More SS (2021) Large-scale production of enzymes for biotechnology uses. *Curr Opin Biotechnol.* 69: 68-76.
- Ferraro V, Carvalho AP, Piccirillo C, Santos MM, Castro PM, Pintado ME (2013) Extraction of high added value biological compounds from sardine, sardine-type fish and mackerel canning residues-a review. *Mater Sci Eng RC.* 33: 3111-3120.
- Friedman IS, Behrens LA, Pereira NDLA, Contreras EM, Fernández-Gimenez AV (2022) Digestive proteinases from the marine fish processing waste of the South-West Atlantic Ocean: Their partial characterization and comparison. *J Fish Biol* 100:150-160.
- Friedman IS, Contreras EM, Fernández-Gimenez AV (2024) Catalytic stability of aspartic proteinases recovered from viscera of *Merluccius hubbsi*, *Percophis brasiliensis*, *Urophycis brasiliensis*, and *Cynoscion guatucupa*. *Waste Biomass Valoriz.* 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02717-8>
- García Carreño FL (1992) The digestive proteases of langostilla (*Pleuroncodes planipes*, Decapoda): their partial characterization, and the effect of feed on their composition. *Comp Biochem Physiol.* 103 (B): 575-578.
- Gatlin DM III, Barrows FT, Brown P, Dabrowski K, Gaylord TG, ... Wurtele E (2007) Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquacul Res.* 38:551-579.
- Kah EY, Ng WJ, Hew PS, Mah KS, Lim LX, ...Law MY (2024) Optimizing protein hydrolysates of rice bran: Physicochemical, antioxidant, antibacterial properties, and chemometric analysis for functional food potential. *Meas Food.* 13: 100141.
- Pereira NDLA, Fangio MF, Rodriguez YE, Bonadero MC, Haran NS, Fernández-Gimenez AV (2022) Characterization of liquid protein hydrolysates shrimp industry waste: Analysis of antioxidant and microbiological activity, and shelf life of final product. *J Food Proc Pres.* 46: e15526.
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Rad Biol Med.* 26: 1231-1237.
- Robinson JP, Mills DJ, Asiedu GA, Byrd K, Mancha Cisneros MDM, ... Hicks CC (2022) Small pelagic fish supply abundant and affordable micronutrients to low-and middle-income countries. *Nature Food.* 3: 1075-1084.
- Rodriguez YE, Laitano MV, Liebana C, Friedman IS, Sacristán HJ, ... Fernández-Gimenez AV (2025) Valorization of Pacu Aquaculture Processing Waste: Preliminary Characterization of Digestive Alkaline Proteases. *Waste Biomass Val.* 16: 5631-5644.
- Sen A, Kapila R, Chaudhary S, Nigam A (2021) Biotechnological applications of microbial enzymes to replace chemicals in the textile industry-a review. *TEXTILE Ass.* 82: 68-73.
- Shimada K, Fujikawa K, Yahara K, Nakamura T (1992) Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. *J Agric Food Chem.* 40: 945-948.
- Vannabun A, Ketnawa S, Phongthai S, Benjakul S, Rawdkuen S (2014) Characterization of acid and alkaline proteases from viscera of farmed giant catfish. *Food Biosci.* 6: 9-16.