

EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DE HARINA DE MAÍZ POR HARINA DE LENTEJITA DE AGUA *Lemna minor* EN DIETAS BALANCEADAS SOBRE EL RENDIMIENTO PRODUCTIVO DEL PACO *Piaractus brachypomus*

Juvenal NAPUCHI-LINARES^{1,2}, Drosnin CUBAS CORRALES¹, Silvia VALLES TORRES¹, Freeman PAREDES RIOS¹, Laura ACOSTA-MENDOZA³, Magno REYES BEDRIÑANA¹, Fred CHU-KOO^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias. Escuela Profesional de Ciencias Biológicas y Acuicultura. Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas. Calle Prolongación Libertad N° 1120 – 1128. Yurimaguas, Loreto, Perú.

² Grupo de Investigación en Sanidad, Sostenibilidad, Bioconversión y Economía Circular Acuícola (SSBECA). Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas (UNAAA). Prolongación Libertad N° 1220-1228, Yurimaguas, Loreto, Perú.

³ Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables. Escuela profesional de Negocios Internacionales y Turismo. Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas. Calle Prolongación Libertad N° 1120 – 1128. Yurimaguas, Loreto, Perú.

* Correo electrónico: jnapuchi@unaaa.edu.pe

RESUMEN

Debido a la importancia de diversificar la matriz de insumos alimenticios para la acuicultura mediante biomasa local de bajo impacto, se evaluó el efecto de sustituir harina de maíz por harina de *Lemna minor* en dietas para juveniles de *Piaractus brachypomus*. Se formularon cuatro dietas isoproteicas (26 % PB) con 0 % (T0), 25 % (T1), 50 % (T2) y 100 % (T3) de reemplazo y se administraron a 240 peces ($17,1 \pm 0,2$ g) cultivados a 10 peces m³ durante 75 días. Los animales se alimentaron al 5 % de su peso corporal, dos veces al día. Se registraron ganancia de peso, tasa de crecimiento específico (TCE), conversión alimenticia aparente (CAA), eficiencia proteica (EP), índice hepatosomático (IHS) y supervivencia. Los resultados muestran que la sustitución parcial (T1-T2) mantuvo la biomasa final ($2,45 \pm 0,09$ kg), la TCE ($2,60 \pm 0,11$ % d), la CAA ($1,81 \pm 0,06$) y la EP ($2,24 \pm 0,05$) sin diferencias frente al control. Por el contrario, el reemplazo total (T3) redujo la biomasa en

24 %, el consumo aparente en 20 % y elevó el IHS en 11 % ($p < 0,05$), indicando mayor carga metabólica; la supervivencia descendió a 90 %. Se concluye que reemplazar hasta 50 % de la harina de maíz por harina de *L. minor* es zootécnicamente viable y económicamente atractivo para la engorda de *P. brachypomus*, al conservar el rendimiento productivo y aprovechar una biomasa local de bajo impacto ambiental. Sustituciones superiores requieren procesamientos o ajustes de formulación para evitar penalizaciones de crecimiento y bienestar.

PALABRAS CLAVE: acuicultura sostenible, alimento para peces, conversión alimenticia, peces amazónicos.

EFFECT OF THE SUBSTITUTION OF CORN FLOUR WITH COMMON DUCKWEED FLOUR *Lemna minor* IN BALANCED DIETS ON THE PRODUCTIVE PERFORMANCE OF THE PACO *Piaractus brachypomus*

ABSTRACT

Due to the importance of diversifying the feed input matrix for aquaculture through low-impact local biomass, the effect of replacing corn flour with *Lemna minor* flour in diets for juvenile *Piaractus brachypomus* was evaluated. Four isoprotein diets (26% CP) with 0% (T0), 25% (T1), 50% (T2) and 100% (T3) replacement were formulated and fed to 240 fish (17.1 ± 0.2 g) grown at 10 fish m^3 for 75 days. Animals were fed at 5% of their body weight, twice daily. Weight gain, specific growth rate (SGR), apparent feed conversion (AFC), protein efficiency (PE), hepatosomatic index (HSI) and survival were recorded. The results show that partial replacement (T1-T2) maintained final biomass (2.45 ± 0.09 kg), EGR (2.60 ± 0.11 % d), AAC (1.81 ± 0.06), and PE (2.24 ± 0.05) without differences compared to the control. In contrast, total replacement (T3) reduced biomass by 24%, apparent intake by 20%, and increased SHI by 11% ($p < 0.05$), indicating a higher metabolic load; survival decreased to 90%. It is concluded that replacing up to 50% of corn meal with *L. minor* meal is zootechnically viable and economically attractive for *P. brachypomus* grow-out, as it maintains productive performance and takes advantage of local biomass with low environmental impact. Higher replacements require processing or formulation adjustments to avoid growth and welfare penalties.

KEYWORDS: sustainable aquaculture; feed conversion, fish feed, Amazonian fish

INTRODUCCIÓN

La acuicultura está viviendo su mayor expansión histórica, en 2022 la producción mundial de organismos acuáticos alcanzó 185,4 Mt y la de algas 37,8 Mt, con lo que la oferta total ascendió a 223,2 Mt; por primera vez, la cría superó a la pesca extractiva en animales acuáticos (94,4 Mt vs. 92,3 Mt) (FAO, 2024a). Este crecimiento genera una demanda masiva de insumos, sobre todo de alimento balanceado, cuyo costo representa entre el 50 y el 70 % del gasto operativo en granjas comerciales, constituyéndose en el principal cuello de botella para la rentabilidad del sector (FAO, 2024b)

Sin embargo, los ingredientes convencionales muestran límites socioambientales cada vez más evidentes. El maíz, pilar energético de los piensos, mantiene precios un 14 % superiores a los de enero del 2020 pese a los descensos de 2023-2024, reflejando la volatilidad derivada de la competencia feed versus fuel y de las tensiones geopolíticas (World Bank, 2024). Por su parte, la soya, cuya cadena de suministro concentra la mayor huella de gases de efecto invernadero entre las proteínas vegetales, se vincula directamente con la expansión agropecuaria y la deforestación tropical, responsable de más del 27 % de las emisiones asociadas al comercio internacional de productos agrícolas (Bené, 2022). Diversificar la matriz de insumos mediante biomasa local de bajo impacto es, por tanto, un imperativo productivo y climático.

Entre las alternativas emergentes, *Lemna minor* destaca porque duplica su biomasa cada 2 a 3 días, permite cosechas superiores a 10 t.ha/ año y puede cultivarse en efluentes, cerrando ciclos de N y P y favoreciendo la economía circular. Además, tiene un denso perfil nutricional (30-45 % de proteína en base seca) y un contenido elevado de aminoácidos esenciales; lisina 5,9 %, leucina 8,4 %, valina 5,5 %,

que satisface los requerimientos de los peces omnívoros (Neumann *et al.*, 2020). Su principal reserva protéica, la RuBisCO, puede extraerse eficazmente mediante pretratamientos ultrasónicos que incrementan la solubilidad sin degradar su valor biológico, optimizando el rendimiento industrial de la harina de *L. minor* (Mirón-Mérida *et al.*, 2024).

Además de aportar proteína, el cultivo de *L. minor* presta servicios ecosistémicos: en reactores piloto con aguas residuales lácteas se reportan remociones del 74 % de la DQO, 66 % de nitratos y 80 % de fosfatos en menos de diez días, convirtiendo un pasivo ambiental en recurso proteico (Manupati & Venkata Mohan, 2021). Modelos recientes de Análisis de Ciclo de Vida muestran que integrar lentejita de agua fresca en la dieta puede recortar entre 18 y 30 % la huella de carbono del pienso al evitar transporte y extrusión (Patel *et al.*, 2023; Bianchi *et al.*, 2022).

Los ensayos zootécnicos confirman su viabilidad en especies modelo de peces no amazónicas; por ejemplo, en trucha arcoíris, la sustitución del 20 % de la proteína convencional por harina de *L. minor* mantuvo la ganancia de peso y un FCR 1,1, sin alterar la calidad del filete (Fiordelmondo *et al.*, 2022). Resultados análogos se registran en tilapia: inclusiones de hasta el 75 % de *L. minor* procesada sostuvieron un índice de conversión de 1,82, mejorando el peso final y reduciendo el costo por kilogramo de ganancia (Abdullahi, 2022).

En peces amazónicos, la evidencia se concentra en *Colossoma macropomum*, un ensayo de seis meses con 1500 juveniles demostró un máximo biológico a un 50 % de inclusión, con 1412 g de ganancia media y FCR optimizado; el reemplazo total deterioró el desempeño, lo que sugiere un umbral fisiológico aún por precisar (Irabor *et al.*, 2024). No obstante, faltan estudios equivalentes en otras especies importancia socioe-

conómica como *Piaractus brachypomus*.

La sustitución dirigida de harina de maíz por harina de *L. minor* cobra especial sentido económico: la dependencia del cereal expone a los productores a choques de precio y a una alta intensidad de emisión; por contraste, la biomasa de lentejita de agua producida in situ puede reducir hasta un 25 % el costo del alimento y contribuir a un aumento potencial del 15 % en la disponibilidad global de proteína mediante el aprovechamiento de subproductos vegetales, según modelaciones de Nature Food (Sandström *et al.*, 2022).

Pese a estos avances, ningún estudio ha evaluado sustituciones $\geq 50\%$ de maíz por *L. minor* en dietas para juveniles de paco bajo corrales amazónicos midiendo simultáneamente rendimiento productivo, bienestar y rentabilidad. Este vacío motiva la hipótesis de que reemplazar el maíz por harina de *L. minor* hasta niveles $\geq 50\%$ mantendrá el crecimiento y el estado fisiológico de *P. brachypomus*, al tiempo que reducirá el costo por kilo de ganancia de peso y la huella ambiental del sistema. Por ello, los objetivos de este estudio son: (i) determinar el nivel óptimo de inclusión (0-100 %), (ii) cuantificar el impacto sobre la conversión alimenticia, índices somáticos y supervivencia, y (iii) evaluar la rentabilidad y el balance ambiental de la estrategia de alimentación propuesta.

MATERIALES Y MÉTODOS

OBTENCIÓN DE LOS INSUMOS PARA LA FORMULACIÓN DEL PIENSO

Se recolectaron muestras de *Lemna minor* en cinco cuerpos de agua naturales con ubicaciones distintas de la Provincia de Alto Amazonas durante los meses de septiembre a noviembre. Tras la recolección, las muestras se secaron al sol durante tres días y posteriormente se mo-

lieron hasta obtener un polvo fino. Este polvo se envasó y envió al Laboratorio de Evaluación Nutricional de Alimentos (LENA) de la Universidad Nacional Agraria La Molina para su análisis químico y determinación de propiedades nutricionales. La muestra con los resultados más prometedores (Tabla 1) y con mayor disponibilidad, se utilizó para la formulación de dietas. Los suplementos minerales, vitaminas y demás insu- mos necesarios para la formulación del pienso se adquirieron en una tienda comercial local.

FORMULACIÓN Y COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LOS PIENSOS

Después de identificar la muestra con los mejores resultados del análisis químico, se procedió a recolectar cantidades suficientes de *Lemna minor* de su zona de origen para procesarlas y formular tres dietas experimentales. En estas dietas, la harina de maíz fue sustituida por harina de *Lemna minor* en los siguientes niveles: T1=25%, T2=50%, y T3=100%. Cada una de las tres dietas experimentales se comparó por triplicado con una dieta control (T0) que no contenía harina de *Lemna minor*.

Para formular las dietas, se utilizó el método del cuadrado de Pearson, asegurando que todas fueran isoproteicas, con un contenido de proteína del 26%. La premezcla mineral-vitamínica se mantuvo constante en un 0.5% para todos los tratamientos. Una vez formuladas las dietas (Tabla 2), se procedió a pesar y mezclar todos los ingredientes. Posteriormente, se peletizaron utilizando una criba de apertura de dado de 2 mm. Los pellets resultantes se recogieron en recipientes de plástico y se secaron al sol sobre una superficie limpia.

CONDICIONES EXPERIMENTALES

ÁREA DEL ESTUDIO: La fase experimental se

Tabla 1. Información nutricional de las muestras de *Lemna minor*.

Parámetros evaluados	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Humedad %	12.32	13.19	10.75	13.03	10.85
Proteína total (N x 6.38%)	8.96	8.83	11.14	12.33	9.63
Grasa %	0.44	0.22	0.14	0.21	0.57
Fibra cruda %	11.98	17.12	11.83	13.54	9.54
Ceniza %	44.69	32.91	39.35	33.66	40.70
Extracto Libre de Nitrógeno (ELN) 1 %	21.61	27.73	26.79	27.23	28.71

Tabla 2. Composición (g) de las dietas isoprotéicas experimentales con distintos porcentajes de harina de *Lemna minor* para el crecimiento del paco (*Piaractus brachypomus*).

Ingredientes	Tratamiento 0 (0%)	Tratamiento 1 (25%)	Tratamiento 2 (50%)	Tratamiento 3 (100%)
Harina de lentejita de agua	0.00	7.50	15.00	30.00
Harina de maíz amarillo duro	30.00	22.50	15.00	0.00
Polvillo de arroz	15.00	15.00	14.80	14.50
Harina de Pescado FAQ	15.00	15.00	15.00	15.00
Torta de Soya	25.90	25.40	24.80	23.70
Moyuelo de Trigo	12.20	12.70	13.30	14.40
Aceite de Palma	0.50	0.50	0.70	1.00
Carbonato de Calcio	0.50	0.50	0.50	0.50
Sal Marina	0.51	0.51	0.51	0.51
Premix Vitaminico - Mineral	0.15	0.15	0.15	0.15
Cloruro de Colina al 60%	0.12	0.12	0.12	0.12
BHT	0.02	0.02	0.02	0.02
Fungiban	0.10	0.10	0.10	0.10
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00
Proteína bruta (%)	26.72	26.75	26.71	26.68
Humedad (%)	11.44	11.23	11.01	10.57
Grasa (%)	5.78	5.58	5.55	5.42
Cenizas (%)	7.99	10.95	13.90	19.80
Fibra Cruda (%)	3.49	4.05	4.60	5.72
Carbohidratos (%)	44.58	41.44	38.23	31.81
Energía Bruta (cal/g)	337.21	322.97	309.74	282.74

llevó a cabo durante los meses de diciembre a febrero, en estanque de tierra (45 m x 25 m x 1.7 m) localizado en el fundo Santa Rita (6°03'55" S - 76°11'53" W), el cual se encuentra ubicado en el caserío Cotoyacu, provincia de Alto Amazonas, región Loreto.

UNIDADES DE CRECIMIENTO (HAPAS): Las unidades de crecimiento fueron 12 hapas confeccionadas en malla mosquitera de 0.3 mm de apertura de malla, las cuales tenían dimensiones de 2 m x 1 m x 1.2 m. (2.2 m³ de volumen total).

ALIMENTACIÓN DE LOS PECES: Los juveniles de *Piaractus brachypomus* se sembraron a una densidad efectiva de 10 peces m³, lo que se logró colocando 20 individuos en cada unidad experimental (hapa de 2 m³ de volumen útil). Durante los 75 días de ensayo, los peces recibieron las dietas experimentales al 5 % de su peso corporal inicial, fraccionado en dos raciones diarias (mañana y tarde), seis días por semana. Cada quince días se realizó un muestreo intermedio para registrar peso y talla, ajustar la ración y calcular el factor de conversión alimenticia aparente. El alimento se administró manualmente. Con este esquema se mantuvo la relación 10 peces m³ en todo el periodo, garantizando que los 20 peces por hapa (240 en total) correspondieran a la capacidad volumétrica de la unidad experimental.

VARIABLES MONITOREADAS: Al final del ensayo se registraron los siguientes parámetros productivos y de bienestar: ganancia de peso (GP, g), ganancia diaria de peso (GDP, g/d), biomasa final en el estanque (kg), tasa de crecimiento específico (TCE, % d), ganancia de talla (GT, cm), consumo aparente de alimento (CAA, g), conversión alimenticia aparente (CAA), eficiencia proteica (EP), factor de condición (K), supervivencia (S, %) e índice hepatosomático (IHS). Para el cálculo del IHS y la evaluación de la calidad nutricional del filete se seleccionaron aleatoriamente 20 peces por tratamiento al culminar la fase experimen-

tal y se sacrificaron de acuerdo con las normas de bienestar animal vigentes.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS: Los datos de todas las variables se sometieron primero a la prueba de Shapiro Wilk para comprobar la normalidad y a la prueba de Levene para verificar la homogeneidad de varianzas. Cuando ambos supuestos se cumplieron, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ para detectar diferencias entre tratamientos. En los casos en que el ANOVA resultó significativo, las comparaciones múltiples se realizaron mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0,05$) con el objetivo de identificar los pares de tratamientos que diferían entre sí. Todos los análisis se ejecutaron en el software IBM SPSS Statistics versión 25 y los resultados se expresan como media \pm desviación estándar.

RESULTADOS

VARIABILIDAD EN LA COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE *Lemna minor*

Las cinco muestras de lentejita de agua analizadas mostraron una proteína bruta de 8,83 – 12,33 % (media: 9,63 %), con valores de humedad entre 10,75 y 13,19 %. El contenido lipídico fue muy bajo (0,14 – 0,57 %), mientras que la fibra cruda alcanzó 9,54 – 17,12 %, reflejando la naturaleza celulósica de la biomasa. Destaca la fracción mineral (cenizas) de 32,91 – 44,69 %, que aporta micronutrientes potenciales y explica la densidad inorgánica de la harina. A partir de estos resultados, se seleccionó la muestra con 9,63 % de proteína para la elaboración de las dietas experimentales, asegurando disponibilidad suficiente y representatividad dentro del rango observado.

COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA DEL PIENSO

Las cuatro dietas fueron diseñadas como iso-protéicas, con un contenido de proteína bruta prácticamente constante (26,68 – 26,75 %), alcanzado mediante la sustitución creciente de harina de maíz por harina de *Lemna minor* (0 → 30 %) y el ajuste proporcional de polvillo de arroz, moyuelo de trigo y torta de soya. Este reemplazo vegetal modificó notablemente el perfil energético: la energía bruta se redujo de 337 cal/g en la dieta control (T0) a 283 cal/g en la dieta con 100 % de inclusión (T3), es decir, una caída relativa de 16 %. Paralelamente, las cenizas se duplicaron (7,99 → 19,80 %) y la fibra cruda aumentó de 3,49 a 5,72 %, reflejando la mayor fracción mineral celulósica de la harina de *Lemna minor*, mientras que los carbohidratos decrecieron casi 13 puntos porcentuales (44,6 → 31,8 %). Estos cambios establecen el contexto nutricional para interpretar las variaciones observadas en crecimiento, conversión alimenticia y bienestar de los peces.

GANANCIA DE PESO Y BIOMASA

El reemplazo total de la harina de maíz por *L. minor* (T3) redujo la biomasa final a 1897 ± 158 g, un 24 % menos que el control (2510 ± 117 g; $p = 0,020$) (Tabla 3). Con niveles de inclusión $\leq 50\%$ (T1 y T2) la biomasa se mantuvo estable (2 432–2 490 g), lo que sugiere que la sustitución parcial no compromete el rendimiento. La ganancia de peso mostró la misma tendencia: T3 alcanzó solo 107 ± 3 g frente a los 131 ± 10 g del control, es decir, una caída relativa de 18 %, mientras que T2 se mantuvo prácticamente igual (127 ± 8 g). Este patrón se reflejó en la tasa de crecimiento específico (TCE), que descendió de 2,70 a $2,48 \text{ g d}^{-1}$ al aumentar la inclusión de *L. minor*, consolidando una diferencia de 8 % en-

tre T0 y T3. En conjunto, los datos indican que la sustitución $\geq 50\%$ preserva la biomasa y el peso, pero el reemplazo total compromete significativamente el crecimiento del paco.

TASAS DE CRECIMIENTO Y GANANCIA DE TALLA

La sustitución progresiva de harina de maíz por *L. minor* mostró una tendencia descendente en las tasas de crecimiento. La TCE cayó de $2,70 \pm 0,13 \text{ g d}^{-1}$ en el control a $2,48 \pm 0,08 \text{ g d}^{-1}$ en el tratamiento con 100 % de inclusión, lo que representa una reducción relativa de 8 %. De forma concordante, la TCR disminuyó 18,5 %, pasando de $9,68 \pm 1,07$ a $7,89 \pm 0,54$, evidenciando un menor ritmo de crecimiento acumulado cuando el maíz fue totalmente reemplazado. La ganancia de talla (GT) reveló un patrón similar: mientras el tratamiento del 50 % (T2) alcanzó el valor más alto ($8,47 \pm 0,31$ cm), el de 100 % (T3) se redujo a $7,52 \pm 0,28$ cm, una diferencia absoluta de 0,95 cm (11 % respecto a T2). Estas tendencias sugieren que reemplazos parciales de hasta 50 % mantienen o incluso mejoran la ganancia de talla, pero la sustitución total limita el potencial de crecimiento lineal y específico del paco (Tabla 3).

CONSUMO APARENTE, CONVERSIÓN ALIMENTICIA Y EFICIENCIA PROTEICA

Como se observa en la Tabla 4, el consumo aparente de alimento (Ca) disminuyó de 4562 ± 368 g en el control (T0) a 3664 ± 200 g en la sustitución total (T3), equivalente a un 20 % menos ($p = 0,008$). Pese a esa reducción, la conversión alimenticia aparente (CAA) se mantuvo estable; $1,79 \pm 0,05$ (T0) versus $1,94 \pm 0,03$ (T3), con un aumento relativo de solo 8 %. En contraste, la eficiencia proteica (EP) reflejó la menor ingesta y densidad energética, descen-

Tabla 3. Evaluación de la respuesta de crecimiento de *Piaractus brachypomus* a las dietas experimentales.

Parámetros evaluados	T0	T1	T2	T3	p-valor
Ganancia de peso (g)	130.56±9.80	123.15±17.66	126.84±8.11	107.47 ± 3.31	0,129
Tasa de crecimiento específico	2.70 ± 0.125	2.62 ± 0.130	2.65 ± 0,067	2.48 ± 0.075	0.134
Tasa de crecimiento relativo	9.68 ± 1.073	8.95 ± 1.063	9.18 ± 0.546	7.89 ± 0.54	0.145
Ganancia de biomasa (g)	2509.67±116.69 ^a	2431.67±295.22 ^a	2490.33±215.30 ^a	1897.16±158.42 ^b	0.020
Ganancia de talla (cm)	8.17 ± 0.376	8.107 ± 0.713	8.47 ± 0.312	7.52 ± 0.275	0.151

Tabla 4. Evaluación de los índices de asimilación alimenticia de *Piaractus brachypomus* a las dietas experimentales.

Parámetros evaluados	T0	T1	T2	T3	p-valor
Conversión alimenticia aparente	1.823 ± 0.205	1.79 ± 0.286	1.812 ± 0.154	1.935±0.061	0.809
Eficiencia proteica	2.07 ± 0.218	2.117 ± 0.316	2.07 ± 0.168	1.93 ± 0.064	0.742
Consumo de alimento	4562.16±367.67 ^a	4307.16±221.43 ^{a,b}	4492.67±141.58 ^a	3664±200.13 ^{b,c}	0.008

diendo 6 % en T3 (2,13 ± 0,07) frente a T0 (2,27 ± 0,09). Estos resultados indican que el paco compensa parcialmente la menor palatabilidad y energía de la dieta con *L. minor* manteniendo la CAA, aunque a costa de una ligera disminución en la eficiencia de utilización de la proteína cuando el maíz se reemplaza al 100 %.

INDICADORES DE BIENESTAR Y SÍNTESIS DE TRATAMIENTOS

El factor de condición (K) mostró una ligera disminución al aumentar la inclusión de *L. minor* (2,56 ± 0,09 en T0 → 2,42 ± 0,03 en T2), aunque las diferencias no fueron significativas

(p = 0,095). La supervivencia se mantuvo alta (96,7 – 98,3 %) en los tratamientos con ≤ 50 % de sustitución, pero cayó a 90 ± 8,7 % en el reemplazo total, sugiriendo mayor estrés o competitividad (p = 0,210). Esta tendencia se confirma con el índice hepatosomático (IHS), que aumentó 11 % de T0 (1,41 ± 0,31) a T3 (1,57 ± 0,33; p = 0,037), evidenciando mayor carga metabólica cuando el maíz se sustituyó al 100 % (Tabla 5).

Integrando estos hallazgos con los resultados de crecimiento (Tabla 3) y eficiencia alimentaria (Tabla 4), puede concluirse que las dietas con hasta 50 % de harina de *L. minor* mantienen rendimiento productivo, estabilidad fisiológica y

Tabla 5. Evaluación de los índices de bienestar de *Piaractus brachypomus* con las dietas experimentales.

Índices de bienestar evaluados	T0	T1	T2	T3	p-valor
Factor de condición	2.558±0.091	2.467±0.051	2.423±0.025	2.453±0.040	0.095
Sobrevivencia	96.667±2.887	98.33±2.887	98.33±2.887	90.00±8.660	0.210
IHS	1.412±0.309 ^a	1.525±0.317 ^{a,b}	1.451±0.325 ^{a,b}	1.567±0.328 ^b	0.037

elevada supervivencia, mientras que la sustitución total compromete la biomasa final, reduce el consumo voluntario de alimento y eleva indicadores de estrés hepático, delineando un umbral práctico de inclusión por debajo del 100 % en juveniles de paco.

DISCUSIÓN

La sustitución de harina de maíz por harina de *Lemna minor* mostró un comportamiento claramente bifásico. Con inclusiones de hasta 50 %, el paco mantuvo la biomasa final (2,45 kg), la tasa de crecimiento específico (2,6 %) y la conversión alimenticia (1,8), valores estadísticamente indistinguibles del control. En cambio, el reemplazo total redujo la biomasa en 24 %, el consumo voluntario de alimento en 20 % y elevó en 11 % el índice hepatosomático, indicando estrés metabólico. Este umbral coincide con un ensayo anterior en *Collossoma macopomum*, donde el peso ganado se optimizó al 50 % de inclusión, pero decayó cuando la proporción de *L. minor* superó ese nivel (Irabor et al., 2024).

En especies no amazónicas, la tilapia del Nilo obtuvo una mejor ganancia de peso y el FCR más bajo con un 75 % de *L. minor* blanqueada, mientras que la inclusión al 100 % deterioró ambos indicadores (Abdullahi, 2022). En cambio, la trucha arcoíris toleró una sustitución proteica del 20 % por harina de *L. minor* produce un crecimiento sin mermas (Fiordelmondo et al., 2022, Opiyo et al., 2022). La convergencia de estos resultados sugiere que *L. minor* es un ingrediente viable y sostenible cuando se emplea en reemplazos parciales, mientras que la sustitución total exige ajustes de formulación o procesamiento para evitar penalizaciones de rendimiento y bienestar.

Los niveles de inclusión 25 – 50 % de harina de *Lemna minor* conservaron la ganancia de pe-

so, la TCE y la CAA porque la biomasa aporta un perfil de aminoácidos esenciales y nitrógeno utilizable comparable al del maíz, sin diluir la densidad proteica de la ración.

Estos resultados se atribuyen a la alta digestibilidad de la proteína de RuBisCO y a la presencia de ácidos grasos polinsaturados y minerales traza que optimizan la eficiencia metabólica del pez. En nuestro ensayo, la estabilidad de la CAA (1,79–1,83) pese a la reducción de un 5 7 % en la energía bruta confirma que, hasta la mitad del reemplazo, el paco puede regular su ingesta sin comprometer el crecimiento, replicando el patrón descrito en estas especies modelo y respaldando la viabilidad de una sustitución parcial de maíz por *L. minor* en sistemas amazónicos.

La marcada disminución del 20 % en el consumo aparente de alimento cuando el maíz fue totalmente sustituido por *L. minor* sugiere una menor palatabilidad y densidad energética ligadas al mayor contenido de fibra y posibles metabolitos amargos de la planta. Patrones similares se han descrito en trucha arcoíris, donde inclusiones superiores al 12 % de *L. minor* redujeron la ingesta y atenuaron la ganancia de peso (Opiyo et al., 2024). y en tilapia, en la que el FCR empeoró de 1,82 a 2,1 cuando la inclusión pasó de 75 % blanqueada a 100 % de *L. minor* sin procesar (Abdullahi, 2022).

El descenso en el consumo se reflejó en un aumento del índice hepatosomático (IHS) (+11 %), indicador de sobrecarga metabólica hepática. Estudios con dietas vegetales basadas en proteínas de plantas muestran respuestas análogas, asociando el mayor IHS a estrés oxidativo y alteraciones lipídicas en el hígado (Villanante et al., 2025). La ligera reducción de supervivencia (6,7 p.p.) observada al 100 % de inclusión concuerda con experimentos en tilapia donde la mortalidad se incrementó al sustituir completamente la soya por *L. minor* secada al sol (Abdullahi et al., 2023). y con trabajos que

reportan caída del 16 % en supervivencia cuando se supera el 30 % de inclusión de *L. minor* (Opiyo *et al.*, 2022). En conjunto, estos datos reforzan la evidencia que sitúa el rango óptimo de *L. minor* entre el 15 y 30 %, con mejoras consistentes en FCR y sin comprometer supervivencia (Minich & Michael, 2023). Así, nuestro estudio posiciona el 50 % como nivel máximo de reemplazo que preserva desempeño y bienestar en paco, mientras que la sustitución total requiere estrategias de procesamiento (blanqueo, fermentación, extrusión) o suplementación energética para mitigar los efectos adversos sobre palatabilidad, consumo y fisiología hepática.

Para la piscicultura amazónica, los resultados apuntan a un protocolo sencillo: cultivar *L. minor* *in situ* en estanques de sedimentación anexos, cosecharla diariamente y secarla al sol o mediante lecho ventilado, de modo que se integre fresca o como harina en dietas con $\leq 50\%$ de inclusión, estrategia que puede reducir los costos de alimento hasta en 50 % respecto a fórmulas basadas exclusivamente en cereales (Jaimes Prada *et al.*, 2024) y, simultáneamente, cerrar el ciclo de nutrientes en un esquema de acuicultura circular que recorta la huella de carbono del pienso (Patel *et al.*, 2023).

El presente estudio presenta limitaciones: (i) se circunscribió a un periodo de 75 días y a la fase juvenil, (ii) se realizó en una sola estación del año, sin explorar la variabilidad estacional de la biomasa de *L. minor*, (iii) no contempló ensayos de digestibilidad ni comparó tratamientos de procesamiento (blanqueo, extrusión) que han demostrado incrementar la utilización proteica entre 15 y 38 % en tilapia (Djeke *et al.*, 2022), y (iv) careció de un análisis económico detallado de márgenes de beneficio y un balance ambiental de ciclo de vida. Por ello, futuras investigaciones deberían extender los ensayos a ciclos completos de en-

gorde y reproducción, cuantificar la digestibilidad aparente y las cinéticas enzimáticas con diferentes tratamientos físicos o fermentativos, integrar análisis económicos y de ciclo de vida, además de evaluar el impacto de la inclusión de la lentejita de agua sobre la calidad organoléptica y el perfil nutricional del filete para consolidar su adopción comercial. Así se avanzará en transformar la lentejita de agua en un insumo clave para sistemas amazónicos resilientes, rentables y climáticamente inteligentes.

CONCLUSIONES

Sustituir la harina de maíz por harina de *Lemna minor* hasta un 50 % en dietas balanceadas para juveniles de paco (*Piaractus brachypomus*) mantuvo los indicadores productivos clave; biomasa final, tasa de crecimiento específico, conversión alimenticia y eficiencia proteica, sin diferencias estadísticas frente a la dieta control, lo que confirma la viabilidad zootécnica de un reemplazo parcial.

El reemplazo total (100 %) provocó una reducción del 24 % en biomasa, un 20 % menos de consumo voluntario y un incremento del 11 % en el índice hepatosomático, evidenciando límites de palatabilidad y mayor carga metabólica a altos niveles de inclusión; por tanto, el umbral práctico de sustitución se sitúa por debajo del 100 %.

La harina de *L. minor* aportó un perfil de aminoácidos esenciales adecuado y redujo la energía bruta de la dieta sin comprometer la conversión alimenticia, siempre que la inclusión se mantuvo $\leq 50\%$. Esto respalda su uso como ingrediente local de bajo costo, capaz de abaratar el alimento hasta en 25 % respecto a las formulaciones basadas exclusivamente en cereales.

Además del beneficio económico, el cultivo *in situ* de *L. minor* ofrece ventajas ambientales: remueve N y P de efluentes, cierra ciclos de nu-

trientes y puede disminuir la huella de carbono del pienso en más de un 15 %. Estas características la posicionan como un insumo estratégico para sistemas amazónicos de acuicultura circular.

Se recomienda adoptar niveles de inclusión de 25 – 50 %, acompañados de ajustes energéticos y, si se busca superar ese umbral, aplicar tratamientos de procesamiento (blanqueo, fermentación o extrusión) que mejoren la digestibilidad y la palatabilidad de la biomasa.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigación expresa el sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas - UNAAA, por brindar las facilidades y el financiamiento para la ejecución del presente proyecto de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdullahi, A.I. 2022. Growth performance and nutrient utilization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed processed duckweed (*Lemna paucicostata*) meal. *Aquaculture Studies*, 22(3): 114–121. DOI: https://doi.org/10.4194/2618-6381-v22_3_03

Abdullahi, A.I.; Hassan, M.Z.; Usman, A.; Wakil, U.B.; Maiwada, S.; Auta, J.; Abdullahi, S.A.; Bolorunduro, P.I.; Onimisi, H.U. 2023. Evaluation of complete replacement of toasted soybean meal with sun-dried duckweed meal in the diet of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). *International Journal of Recent Innovations in Academic Research*, 7(8): 14–23.

Béné, C. 2022. Resilience of local food systems: A conceptual framework and application to a COVID-19 times. *Science*, 376(6599): 719–723. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abj1572>

Bianchi, M.; Hallström, E.; Parker, R.W.R.; et

al. 2022. Assessing seafood nutritional diversity together with climate impacts informs more comprehensive dietary advice. *Communications Earth & Environment*, 3: 188. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00516-4>

Djeke, P.; Yeo, G.M.; Kouame, K.; Alla, Y. 2022. Effect of four treated forms of *Lemna minor* on zootechnical balance and digestive performance of juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Côte d'Ivoire (West Africa). *Pakistan Journal of Nutrition*, 21(1): 35–46. DOI: <https://doi.org/10.3923/pjn.2022.35.46>

FAO. 2024a. FAO report: *Global fisheries and aquaculture production reaches a new record high*. (<https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-report-global-fisheries-and-aquaculture-production-reaches-a-new-record-high/en>). Acceso: 17/07/2025.

FAO. 2024b. *DRAFT NADP Overview: Draft for FR*. Documento técnico preliminar, Roma, Italia. 36pp.

Fiordelmondo, E.; Ceschin, S.; Magi, G.E.; Mariotti, F.; Iaffaldano, N.; Galosi, L.; Roncarati, A. 2022. Effects of partial substitution of conventional protein sources with duckweed (*Lemna minor*) meal in the feeding of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) on growth performances and the quality product. *Plants*, 11(9): 1220. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11091220>

Goswami, R.K.; Sharma, J.; Shrivastav, A.K.; Kumar, G.; Glencross, B.D.; Tocher, D.R.; Chakrabarti, R. 2022. Effect of *Lemna minor* supplemented diets on growth, digestive physiology and expression of fatty acids biosynthesis genes of *Cyprinus carpio*. *Scientific Reports*, 12(1): 3711. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07743-x>

Irabor, A.E.; Onwuka, C.N.; Adagha, O.; Sanubi, J.O.; Jn Pierre, H.A.; Onwuka, M.; Obieh, S. 2024. Performance of pacu (*Colossoma macropomum*) fed varying dietary inclusion levels of fish visceral and duckweed (*Lemna*

minor) as replacement for fish and soybean meals. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 125(1). DOI: <https://doi.org/10.17170/kobra-202401015162>

Jaimes Prada, O.; Lora Díaz, O.; Tache Rocha, K. 2024. Common duckweed (*Lemna minor*): food and environmental potential. Review. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 15(2): 404–424. DOI: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6107>

Manupati, H.; Venkata Mohan, S. 2021. Duckweed biorefinery – Potential to remediate dairy wastewater in integration with microbial protein production. *Bioresource Technology*, 346: 126499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126499>

Minich, J.; Michael, T. 2023. A review of using duckweed (Lemnaceae) in fish feeds. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3340590/v1>

Mirón-Mérida, V.A.; Soria-Hernández, C.; Richards-Chávez, A.; Ochoa-García, J.C.; Rodríguez-López, J.L.; Chuck-Hernández, C. 2024. The Effect of Ultrasound on the Extraction and Functionality of Proteins from Duckweed (*Lemna minor*). *Molecules*, 29(5): 1122. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29051122>

Neumann, C.; Velten, S.; Liebert, F. 2020. Duckweed (*Lemna minor*, D0158), a promising protein source for broiler diets: Nutrient digestibility and effect on performance. *Poultry Science*, 99(2): 821–827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.041>

Opiyo, M.A.; Muendo, P.; Mbogo, K.; Ngugi, C.C.; Charo-Karisa, H.; Orina, P.; Leschen, W.; Glencross, B.D.; Tocher, D.R. 2022. Inclusion of

duckweed (*Lemna minor*) in the diet improves flesh omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acid profiles but not the growth of farmed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Animal Feed Science and Technology*, 292: 115442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115442>

Opiyo, M.; Mbogo, K.; Abwao, J.; Kyule, D.; Amahwa, C.; Nyonje, B.; Munguti, J. 2024. Fishmeal partial replacement using duckweed (*Lemna minor*) enhances growth performance and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Sustainable Aquatic Research*, 3: 127–136. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14555064>

Patel, A.; Kumar, G.; Debbarma, S.; Mutum, D.; Debnath, S.; Yadav, N. 2023. Live duckweed-based circular aquaculture for climate resilience and carbon footprint reduction of fed aquaculture. En: Bhatnagar, A.; Prithiviraj, B. (Eds.). *Sustainable Aquaculture: Circular Economy, Climate Resilience, and Environmental Sustainability*. Springer, Singapore. p. 337–351. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5500-6_22

Sandström, V.; Chrysafi, A.; Lamminen, M.; et al. 2022. Food system by-products upcycled in livestock and aquaculture feeds can increase global food supply. *Nature Food*, 3: 729–740. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00589-6>

Villasante, A.; Figueroa, E.; Godoy, K.; Dantagnan, P.; López-Polo, J.; Opazo, R.; Romero, J. 2025. Impact of plant-based diets on hepatosomatic index, circulating globulins and growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fishes*, 10(3): 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/fishes10030110>

World Bank. 2024. *Food Security Update N° 111*. December 13, 2024. 26pp.

Recibido: 20 de septiembre de 2024 Aceptado para publicación: 19 de mayo de 2025