



Policultivo de juveniles de pacú (*Piaractus mesopotamicus*) y sábalo (*Prochilodus lineatus*) en un sistema acuapónico

Santinón, J.J.^{1,2,3*} ; Hernández, D.R.¹ ; Ruiz Díaz, F.J.¹ ; Comolli, J.A.^{1,2} ;
Cerdán, D.M.³ ; González, A.O.^{1,2} 

¹Instituto de Ictiología del Nordeste, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. ²Cátedra de Producciones no Tradicionales, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. ³Cátedra de Acuicultura, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Nacional de Formosa, Argentina. ✉ juasantinon@vet.unne.edu.ar

Resumen

El sistema acuapónico representa una alternativa productiva sostenible que integra la cría de peces y el cultivo de vegetales en un mismo circuito de agua, optimizando el uso de recursos y reduciendo el impacto ambiental negativo. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño productivo de un sistema acuapónico en policultivo, integrado por juveniles de pacú (*Piaractus mesopotamicus*) y sábalo (*Prochilodus lineatus*), en combinación con el cultivo hidropónico de lechuga (*Lactuca sativa*), mediante el análisis de los parámetros de crecimiento, supervivencia y calidad del agua. El ensayo se llevó a cabo en cuatro módulos independientes, con una duración de 51 días. Cada módulo estuvo compuesto por un tanque para peces (700 L), un sedimentador de sólidos (clarificador) de 200 L, un filtro biológico de 100 L y canales de cultivo hidropónicos para las plantas (4 m²). Los resultados evidenciaron un adecuado crecimiento del pacú, con una tasa de crecimiento específico (TCE) de 1,61-2,16% día⁻¹; 96,67-98,33% de supervivencia y una biomasa final entre 9,05 y 11,09 kg por módulo. El sábalo, en cambio, presentó un crecimiento limitado (TCE: 0,13-0,34% día⁻¹), una tasa de supervivencia superior al 94% y una biomasa final entre 1,43 y 1,57 kg por módulo. La producción de lechuga alcanzó 5,66-8,52 kg por módulo, con rendimientos superiores en el módulo 2. Los parámetros físico-químicos del agua se mantuvieron dentro de rangos adecuados para ambas especies de peces, aunque se detectaron niveles moderadamente elevados de amonio y nitrito, pero sin efectos negativos sobre la supervivencia. Se concluye que el policultivo acuapónico con pacú y sábalo es viable y sustentable, destacándose el pacú por su adaptabilidad y crecimiento. Se recomienda ajustar la proporción de especies y el régimen alimentario para optimizar el rendimiento del sábalo y evaluar la viabilidad económica del sistema en futuras investigaciones.

Palabras claves: acuaponía, especies nativas, sistemas de recirculación, producción sustentable, crecimiento de peces.

Polyculture of pacu (*Piaractus mesopotamicus*) and sabalo (*Prochilodus lineatus*) juveniles in an aquaponic system

Abstract. The aquaponic system represents a sustainable production alternative that integrates fish farming and vegetable cultivation in a single water circuit, optimizing resource use and reducing environmental impact. The objective of this study was to evaluate the productive performance of an aquaponic polyculture system composed of juveniles of pacu (*Piaractus mesopotamicus*) and sabalo (*Prochilodus lineatus*), combined with the hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa*), based on growth, survival, and water quality parameters. The trial was conducted over 51 days in four independent modules, each consisting of a fish tank (700 L), a 200 L solids settler (clarifier), a 100 L biological filter, and hydroponic growing channels for plants (4 m²). The results showed adequate performance of pacu, with a specific growth rate

(SGR) of 1.61-2.16% day⁻¹, survival of 96.67-98.33%, and final biomass ranging from 9.05 to 11.09 kg per module. In contrast, sabalo showed limited growth (SGR: 0.13-0.34%/day), survival rates above 94%, and final biomass between 1.43 and 1.57 kg per module. Lettuce production reached 5.66-8.52 kg per module, with higher yields in module 2. Water physicochemical parameters remained within adequate ranges for both fish species, although moderately elevated levels of ammonium and nitrite were detected, without negative effects on survival. It is concluded that aquaponic polyculture with pacu and sabalo is viable and sustainable, with pacu standing out for its adaptability and growth. Adjustments in species proportions and feeding regime are recommended to optimize sabalo performance, as well as future studies to evaluate the economic feasibility of the system.

Key words: aquaponics, native species, recirculating systems, sustainable production, fish growth.

INTRODUCCIÓN

La acuicultura ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, consolidándose como una actividad clave en la producción de alimentos de alto valor proteico y en la seguridad alimentaria global (FAO 2022). En este contexto, el desarrollo de sistemas productivos más eficientes y sostenibles resulta fundamental frente al incremento de la demanda de alimentos y la presión sobre los recursos naturales (UNESCO 2023).

Las nuevas tecnologías aplicadas a la acuaponía surgen como una alternativa innovadora que integra el cultivo de peces con la producción hidropónica de plantas en sistemas de recirculación, permitiendo optimizar el uso del agua y reutilizar los nutrientes derivados de los desechos metabólicos de los peces (FAO 2020). En estos sistemas, los procesos de nitrificación cumplen un rol central en la transformación de compuestos nitrogenados en formas asimilables por las plantas (Goddek et al. 2019).

Como estrategia complementaria para potenciar la eficiencia de estos sistemas, la acuicultura integrada, particularmente el policultivo, ha cobrado relevancia en los últimos años, ya que permite el cultivo simultáneo de especies con diferentes hábitos alimenticios, favoreciendo el aprovechamiento de los recursos, la economía circular y la estabilidad trófica (Della Rosa et al. 2016, Campanati et al. 2022). No obstante, su implementación exitosa depende de la adecuada selección de especies, asegurando su compatibilidad y complementariedad para minimizar interacciones negativas y optimizar el uso de los recursos disponibles (Thomas et al. 2021, Amoussou et al. 2022).

En Argentina, particularmente en la región Nordeste, especies nativas como el pacú (*Piaractus mesopotamicus*), de hábito omnívoro (Valladão et al. 2016), y el sábalo (*Prochilodus lineatus*), de hábito iliófago (Sverlij et al. 1993), presentan un alto potencial productivo y comercial, lo que las convierte en candidatas relevantes para su integración en sistemas acuapónicos.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar los parámetros productivos de juveniles de pacú (*P. mesopotamicus*) y sábalo (*P. lineatus*) cultivados en policultivo bajo un sistema acuapónico, analizando su crecimiento, supervivencia y la calidad del agua como base para el desarrollo de modelos de producción sostenibles

con especies nativas del nordeste argentino.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de piscicultura experimental del Instituto de Ictiología del Nordeste (INICNE), dependiente de la Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Nordeste (Corrientes, Argentina), bajo un invernadero tipo “Macro túnel” (Figura 1) de 4 metros de ancho por 12 metros de largo (48 m²), con su eje longitudinal orientado en sentido norte-sur. El estudio tuvo una duración de 51 días, abarcando un ciclo productivo completo del componente vegetal del sistema.

Durante el período experimental, comprendido entre el 8 de abril y el 29 de mayo de 2021, el fotoperíodo natural en la ciudad de Corrientes (Argentina) presentó un promedio aproximado de 11 h 40 min de luz útil diaria.

El sistema contó con cuatro módulos acuapónicos independientes (M1, M2, M3 y M4), cada uno constituido por un tanque para la cría de peces (T) de 700 L (Figura 2); un tanque de 200 L ubicado a 3 m de altura por fuera del invernadero, el cual recibía el agua del tanque de los peces y funcionó como sedimentador de sólidos (clarificador), y un filtro biológico (FB) de 100 L de capacidad con diversos sustratos (piedras pómez, tapas plásticas y trozos de caño corrugado) para la fijación de las bacterias nitrificantes (Naranjo-Robayo et al. 2025). El agua que pasaba por cada filtro biológico se descargaba luego en los canales de cultivos hidropónicos (CCH), los que tuvieron una superficie de 4 m² por módulo. La recirculación del agua se realizó con una bomba individual de 0,5 hp de potencia (caudal máximo de 1.800 L h⁻¹) para cada módulo. Se utilizaron dos aireadores marca Atman (modelo hp 4000), con tres piedras difusoras conectadas a cada tanque de peces y dos en cada filtro biológico (Figura 3)..

El agua de cada módulo fue bombeada, de manera intermitente, desde el tanque de peces al depósito de 200 L (clarificador), de allí circulaba por gravedad al FB y luego al sistema hidropónico, retornando nuevamente al tanque de peces. El flujo fue regulado con válvulas, permitiendo la circulación de un volumen de 2 L min⁻¹ de agua a través de cada canal de cultivo del sistema hidropónico.



Figura 1. Invernadero tipo “macro túnel”. Vista interior donde se pueden observar los módulos hidropónicos individuales.



Figura 2. Tanque de peces cubierto con media sombra y descarga de los canales de cultivo hidropónicos.

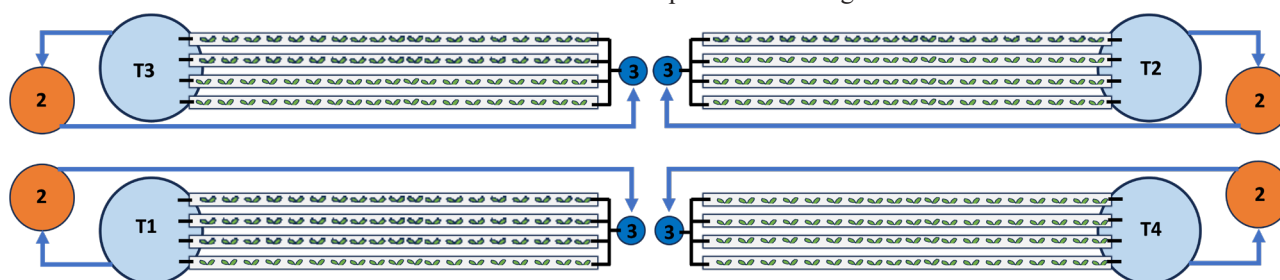


Figura 3. Esquema de los cuatro módulos acuapónicos individuales. Tanques de peces (T1; T2; T3; T4), filtro clarificador sobreelevado (2), filtro biológico (3). Las flechas azules señalan el sentido de circulación del agua (adaptado de Santinón et al. 2023).

Al inicio del ensayo se pesaron los peces, se distribuyeron en sus respectivos módulos experimentales y se trasplantaron las plántulas de lechuga, dando comienzo

al sistema acuapónico. La distribución de los peces en cada módulo se presenta en la Tabla 1, resultando en una relación aproximada de 75:25 para pacú y sábalo, respectivamente.

El sistema hidropónico empleado correspondió a la técnica NFT (*Nutrient Film Technique* o “Técnica de Película de Nutrientes”), basado en la recirculación continua del agua, reponiéndose únicamente el volumen perdido por evaporación o consumo vegetal. Las plantas de lechuga (*L. sativa*, variedad criolla) se dispusieron en los canales de cultivo hidropónicos con una separación uniforme de 25 cm entre plantas.

Se utilizaron 240 juveniles de pacú (*P. mesopotamicus*), 60 ejemplares por módulo, con un peso medio inicial (PMI) de $74,4 \pm 34,1$ g y 72 juveniles de sábalo (*P. lineatus*), 18 ejemplares por módulo, con un PMI de $75,05 \pm 15,9$ g. Todos los ejemplares provenían del plantel de reproductores propios del INICNE. Los peces fueron alimentados dos veces al día (9:00 y 17:00 h) con un alimento balanceado comercial conteniendo 32% de proteína bruta. La tasa diaria de alimentación (TDA) fue del 7% de la biomasa al inicio del ensayo, reduciéndose progresivamente hasta el 6% al finalizar el período experimental. Las biometrías se realizaron en tres etapas (día 0, 30 y 51), realizándose en las últimas dos etapas el muestreo aleatorio y el pesaje con balanza de precisión de 0,01 g de al menos el 25% de los animales de cada módulo.

Los animales utilizados en la presente experiencia no fueron sometidos a prácticas invasivas ni a sacrificio. El estudio se realizó bajo condiciones de manejo habitual, minimizando el estrés y garantizando adecuadas condiciones de mantenimiento, alimentación y calidad de agua, conforme a los estándares internacionales de bienestar animal para investigación.

El número de plantas cultivadas se determinó considerando que una oferta alimenticia de 40-60 g día⁻¹ a los peces permite sustentar 1 m² de hortalizas de hoja, con una distancia de plantación de 25 cm entre ejemplares (Somerville et al. 2022). En cada módulo se cultivaron 64 plantas de lechuga.

Tabla 1. Distribución de los juveniles de pacú (*P. mesopotamicus*) (n = 240) y sábalo (*P. lineatus*) (n = 72) en los respectivos módulos experimentales.

Módulo	Pacú			Sábalo		
	n	PMI (g)	BI (g)	n	PMI (g)	BI (g)
M 1	60	68,98	4.139	18	76,12	1.370
M 2	60	72,11	4.327	18	80,18	1.443
M 3	60	75,46	4.528	18	84,85	1.527
M 4	60	64,66	3.880	18	61,80	1.112

PMI: Peso Medio Inicial; BI: Biomasa Inicial.

Parámetros de calidad de agua. Los parámetros de calidad del agua: temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad, se monitorearon en los tanques de peces durante todo el ensayo en horario matutino (10:00 h), utilizando para ello equipos electrónicos marca Lutron. La temperatura ambiente se registró dentro del invernadero, utilizando un termómetro de máximas y mínimas. Asimismo, se determinaron las concentraciones de nitrógeno total, amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^{3-}) y potasio (K^+). Para ello se tomaron tres muestras por módulo a las 7:00 h, una vez por semana, en los tanques de peces (T), a la salida de los filtros biológicos (FB) y a la salida de los canales de cultivo hidropónicos (CCH). Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Química Ambiental (LABQUIAM) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste.

Indicadores de productividad evaluados. Se evaluaron las siguientes variables biométricas en los peces: Peso Medio Final (PMF): promedio del peso individual al finalizar el ensayo (g); Tasa de Supervivencia (S): $S (\%) = (\text{N}^\circ \text{ de individuos al final del ensayo} / \text{N}^\circ \text{ de individuos al inicio}) \times 100$; Biomasa Final (BF): $BF = PMF \times (\text{total de peces vivos al final del ensayo})$ y, Tasa de Crecimiento Específico (TCE): $TCE = 100 \times [(\ln PMF - \ln PMI) (T)^{-1}]$,

donde \ln es el logaritmo natural, PMF y PMI representan el peso medio final e inicial (en gramos), y T el tiempo transcurrido (en días).

Producción de lechuga. Se analizaron las siguientes variables: PP (peso medio de las plantas al final del ensayo, g); Biomasa Final Plantas (BFP): $BFP = PP \times \text{total de plantas al final del ensayo (kg)}$, Número de hojas: conteo de las hojas verdaderas fotosintéticamente activas, Peso húmedo de las hojas (g), Peso húmedo de las raíces (g) y Relación parte aérea/raíz: $\text{Relación } (\%) = (\text{Peso húmedo de hojas} \times 100) / (\text{peso húmedo de hojas} + \text{peso húmedo de raíces})$ (He et al. 2018).

RESULTADOS

Dado el carácter observacional y descriptivo del estudio, los resultados se presentan mediante estadística descriptiva, utilizando medidas de tendencia central y dispersión, sin la aplicación de pruebas inferenciales.

Los parámetros de calidad del agua se mantuvieron dentro de los rangos recomendados para ambas especies evaluadas (Tabla 2). Los resultados de los análisis químicos complementarios realizados en laboratorio se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Valores promedio de los parámetros de calidad de agua registrados en los tanques de peces durante el ensayo experimental.

Tanques	T° Ambiente (°C)	T° Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (%)	Oxígeno Disuelto (mg L ⁻¹)	pH	Conductividad (μS cm ⁻¹)
T 1	25,7	23,7	87,06	7,38	6,68	227
T 2	25,7	23,7	88,21	7,24	6,12	276
T 3	25,7	23,6	71,61	6,36	6,70	232
T 4	25,7	23,6	68,84	5,74	6,67	280

Producción de Pacú. Los indicadores de crecimiento obtenidos para *P. mesopotamicus* se resumen en la Tabla 4.

Al analizar los resultados, se observó que el T2 registró los valores más altos de PMF y BF, mientras que la TCE fue superior en el T4. En todos los módulos, las tasas de supervivencia fueron superiores al 96%.

Producción de Sábalo. El crecimiento de *P. lineatus* resultó inferior al esperado en los cuatro tanques experimentales (Tabla 5). El T4 alcanzó la mayor biomasa final, relacionada directamente con el mayor PMF obtenido

por esos individuos. Excepto en el T2, donde se registró una leve disminución en la supervivencia, no se observó mortalidad en ninguno de los tanques restantes.

Producción de plantas. Los parámetros productivos de las plantas de lechuga (*L. sativa*) cultivadas en los cuatro módulos acuapónicos se presentan en la Tabla 6. El módulo 2 registró el mayor peso de planta (PP), junto con un mayor número de hojas y una biomasa final superior. En cuanto a la relación parte aérea/raíz, los módulos 1 y 3 mostraron valores más elevados de desarrollo foliar en comparación con los módulos 2 y 4.

DISCUSIÓN

Durante el ensayo, los parámetros de calidad del agua se mantuvieron dentro de los rangos recomendados para ambas especies (Khan et al. 2020, Mastrochirico-Filho et al. 2020, Nitz et al. 2020, Zuffo et al. 2021), en concordancia con lo reportado para peces de climas tropicales y

subtropicales. En sistemas de recirculación, el monitoreo de amonio, nitrito y nitrato resulta determinante debido a su impacto sobre la salud de los peces y la eficiencia de la biofiltración (Timmons y Ebeling 2013), mientras que nutrientes como fosfato y potasio cumplen un rol relevante en la producción vegetal (Kubitza 2017a,b, Somerville et al. 2022).

Tabla 3. Valores promedio de los compuestos nitrogenados, fosfato y potasio registrados en los distintos puntos de muestreos del sistema acuapónico, expresados en mg L⁻¹.

Pt M	Amonio	Nitrito	Nitrato	Fosfato	Potasio
T 1	0,65	1,73	3,75	0,54	37,45
FB 1	0,76	1,37	9,86	0,27	34,88
CCH 1	4,27	3,35	4,63	0,24	32,51
T 2	1,49	1,06	2,39	0,27	40,09
FB 2	2,97	0,57	3,59	0,13	40,16
CCH 2	0,35	2,31	9,78	0,40	40,56
T 3	1,37	2,90	4,40	0,22	34,93
FB 3	2,27	1,43	6,85	0,54	34,68
CCH 3	2,56	2,36	7,01	0,65	32,70
T 4	0,49	1,64	5,54	0,77	43,53
FB 4	2,56	1,10	3,67	0,24	42,00
CCH 4	0,37	1,67	5,95	0,48	42,11

Pt M (Punto de Muestreo), FB (Filtro Biológico), CCH (Canales de Cultivo Hidropónico).

Los valores de amonio se mantuvieron dentro de límites aceptables en los tanques de peces, aunque se registraron concentraciones superiores en los filtros biológicos, posiblemente asociadas a limitaciones en su diseño o funcionamiento, como el dimensionamiento o la disponibilidad de oxígeno (Timmons y Ebeling 2013,

Somerville et al. 2022). El pH inferior a 7 favoreció la predominancia de amonio (NH₄⁺) sobre amoníaco (NH₃), reduciendo su toxicidad, en concordancia con lo reportado para sistemas de recirculación con pacú (Domínguez Castanedo y Martínez Espinosa 2012).

Tabla 4. Valores de crecimiento y supervivencia promedio observados en los juveniles de pacú (*P. mesopotamicus*) al final del ensayo experimental.

Tanques	PMI (g)	PMF (g)	BI (g)	BF (g)	TCE (%)	S (%)
T 1	74,36	153,44	4.139	9.053	1,61	98,33
T 2	77,68	191,15	4.327	11.087	2,00	96,67
T 3	81,12	173,11	4.528	10.213	1,68	98,33
T 4	62,80	165,87	3.880	10.284	2,16	98,33

PMI: Peso Medio Inicial, PMF: Peso Medio Final, BI: Biomasa Inicial, BF: Biomasa Final, TCE: Tasa de Crecimiento Específico, S: Tasa de Supervivencia.

Las concentraciones de nitrito superaron levemente los valores recomendados (<1 mg L⁻¹; Ibrahim et al. 2023), lo que sugiere un posible desequilibrio temporal en la nitrificación. Este comportamiento podría estar vinculado a una menor actividad microbiana durante las primeras horas del día, cuando se registran menores niveles de oxígeno disuelto y pH, especialmente en sistemas NFT (Timmons y Ebeling 2013). No obstante, en condiciones adecuadas, el nitrito se oxida rápidamente a nitrato, compuesto preferentemente asimilado por las plantas (Heise et al. 2021, Thakur 2023, Wang et al. 2023).

Las concentraciones de nitrato se mantuvieron por debajo de niveles considerados críticos para peces, los cuales han sido asociados a efectos negativos sobre el crecimiento y la fisiología en exposiciones elevadas (Monsees et al. 2017), aunque sin evidencias de impacto en rangos moderados (Davidson et al. 2014). Esto sugiere que

los valores registrados no representaron un riesgo para las especies evaluadas.

Por último, los niveles de fosfato y potasio se mantuvieron relativamente estables, contribuyendo al desarrollo vegetal sin evidenciar efectos sobre el rendimiento de los peces. Resultados similares han sido reportados en sistemas acuapónicos con pacú y tilapia, donde variaciones en estos nutrientes no afectaron la supervivencia ni el desempeño productivo (Mello Pinho et al. 2018), lo que respalda la estabilidad y funcionalidad del sistema evaluado. En sistemas acuapónicos destinados a la producción de lechuga, el potasio y el fósforo suelen encontrarse en concentraciones inferiores a las recomendadas para hidroponía convencional, siendo frecuentes valores de 30-80 mg L⁻¹ para K y 5-30 mg L⁻¹ para P, dependiendo de la carga animal y del grado de suplementación (Goddek et al. 2019).

Tabla 5. Valores de crecimiento promedio observados en los juveniles de sábalo (*P. lineatus*) al final del ensayo experimental.

Tanques	PMI (g)	PMF (g)	BI (g)	BF (g)	S (%)	TCE (%)
T 1	75,06	84,17	1.400	1.515	100	0,25
T 2	75,06	83,57	1.400	1.497	94,4	0,24
T 3	75,06	79,52	1.400	1432	100	0,13
T 4	75,06	87,36	1.400	1.573	100	0,34

PMI: Peso Medio Inicial, PMF: Peso Medio Final, BI: Biomasa Inicial, BF: Biomasa Final, S: Tasa de Supervivencia, TCE: Tasa de Crecimiento Específico.

En cuanto a los parámetros productivos, se observaron diferencias marcadas entre *P. lineatus* y *P. mesopotamicus*, siendo esta última la especie con mejores resultados de crecimiento y biomasa. Estas diferencias pueden atribuirse a características fisiológicas y ecológicas propias de cada especie, que determinan respuestas diferenciales frente a las condiciones, especialmente a la exposición a compuestos nitrogenados como el amonio y el amoníaco, así como a sus hábitos alimenticios y metabolismo proteico (De Silva y Anderson 1994, Ip et al. 2001). En particular, el pacú presenta mayor plasticidad fisiológica, mientras que el sábalo, de hábito iliófago, depende en mayor medida de recursos bentónicos, lo que puede limitar su desempeño en sistemas intensivos (Sverlij et al. 1993).

En el caso del pacú, los ejemplares del T4 mostraron las mayores tasas de crecimiento específico, a pesar de haber iniciado el ensayo con pesos medios iniciales inferiores. Este comportamiento concuerda con el patrón descrito para peces, en el cual los individuos de menor tamaño presentan

tasas de crecimiento relativo más elevadas (Márquez et al. 2024).

Si bien actualmente no existen estudios publicados sobre el policultivo de *P. mesopotamicus* y *P. lineatus* en sistemas de recirculación acuícola (SRA), Mello Pinho et al. (2018) desarrollaron una experiencia con pacú en sistema acuapónico, obteniendo una TCE de 2,3%, ligeramente superior a la registrada en el presente estudio (2,16%). Estos autores utilizaron ejemplares de menor peso inicial (33 g), lo que podría explicar la mayor TCE obtenida, dado que los peces de menor tamaño presentan mayores tasas de crecimiento relativo, de acuerdo con los principios de crecimiento alométrico y bioenergético en peces (NRC 2011). Aun así, la biomasa final alcanzada fue similar a la obtenida en nuestro estudio. Resultados comparables fueron reportados por Poleo et al. (2011) en el cultivo de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) en sistemas de recirculación, y por Abad et al. (2014) en juveniles de la misma especie criados bajo sistema Biofloc.

Tabla 6. Valores promedio obtenidos para el cultivo de vegetales al final del ensayo experimental.

Módulos	PP (g)	BFP (g)	Nº Hojas	Parte Aérea (%)	Raíz (%)
M 1	117,8	7.070	13	88,19	11,81
M 2	142	8.520	15	85,95	14,05
M 3	94,3	5.660	12	86,60	13,40
M 4	111,5	6.690	15	83,97	16,03

PP: Peso Planta, BFP: Biomasa Final Plantas.

En cuanto a la tasa de supervivencia (TS), los resultados obtenidos en el presente estudio (98,3%) superaron ampliamente los valores reportados en sistemas semi intensivos en estanques excavados, donde solamente se registraron tasas cercanas al 80% (Della Rosa et al. 2016). Estos resultados reflejan las ventajas del manejo controlado y de las condiciones ambientales más estables que ofrecen los sistemas de recirculación. Respecto a la biomasa final alcanzada tras 51 días de cultivo (11,66 kg por tanque), se observó un incremento del 100% de la biomasa inicial, lo que demuestra una buena adaptación de los peces al sistema acuapónico. En sistemas acuapónicos convencionales, la biomasa de peces suele mantenerse entre 15 y 20 kg m⁻³; sin embargo, bajo condiciones intensivas y con adecuada aireación y biofiltración, pueden alcanzarse densidades de 30-40 kg m⁻³ e incluso valores cercanos a 70 kg m⁻³ en sistemas altamente tecnificados (Rakocy 2012, Goddek et al. 2019, Somerville et al. 2022).

En relación al sábalo (*P. lineatus*), su desempeño en sistemas de policultivo en estanques resulta particularmente interesante desde el punto de vista ecológico, ya que aprovecha de manera eficiente los diferentes estratos del ecosistema acuático (Negri et al. 2023). Sin embargo, si bien la tasa de supervivencia fue cercana al 100%, el crecimiento de esta especie fue limitado. El escaso crecimiento registrado podría atribuirse a la competencia alimentaria con el pacú, especie de hábitos omnívoros y mayor dominancia en el consumo del alimento balanceado, lo que probablemente restringió el acceso del sábalo a la ración suministrada. En consecuencia, estos ejemplares habrían recurrido principalmente a detritos y materia orgánica sedimentada en el fondo de los tanques, en concordancia con su hábito alimenticio iliófago (Sverlij et al. 1993). García et al. (2011), observaron un comportamiento similar en juveniles de bocachico (*P. magdalenae*), los cuales consumieron alimento balanceado durante las etapas

iniciales del cultivo, aunque su crecimiento se vio afectado cuando la disponibilidad de este recurso fue limitada.

Los resultados obtenidos en la producción de lechuga fueron consistentes con los reportados en experiencias previas desarrolladas en las mismas instalaciones (Santinón et al. 2023), e incluso superiores a los obtenidos por Meza Arroyo (2018), quien observó un mejor desempeño con el sistema de camas flotantes en comparación con el NFT. Del mismo modo, Moreno Simón y Zafra Trelles (2014) registraron menores pesos finales en plantas cultivadas junto a tilapias, con cosechas realizadas a los 90 días de cultivo. Pérez Gómez (2017) obtuvo resultados similares a los de este trabajo utilizando una densidad de 20 kg m⁻³ de tilapia, aunque al reducir la densidad a 10 kg m⁻³ los rendimientos fueron significativamente menores.

En este sentido, el sistema acuapónico empleado demostró ser eficiente en la utilización de nutrientes y en el sostenimiento de un equilibrio funcional entre los componentes biológicos, consolidándose como una alternativa sustentable para el cultivo simultáneo de peces y hortalizas. Asimismo, los resultados respaldan el potencial de la acuaponía como estrategia productiva adaptada a las condiciones del NEA argentino, coincidiendo con investigaciones previas realizadas en sistemas acuapónicos con especies autóctonas del NEA, que demostraron la viabilidad del policultivo de pacú y sábalo asociado a la producción vegetal (González et al. 2021).

CONCLUSIONES

La implementación de sistemas acuapónicos con especies nativas representa una alternativa promisoriosa para diversificar la producción acuícola regional, favoreciendo la sostenibilidad ambiental mediante un uso eficiente del agua y la generación de alimentos de alta calidad. Este tipo de sistemas podría orientarse tanto a emprendimientos familiares de autoconsumo como a producciones comerciales a pequeña escala, destacando la obtención de productos, tanto vegetales como animales, libres de la adición de medicamentos y agroquímicos y la posibilidad de alcanzar certificaciones diferenciadas. Finalmente, se recomienda incorporar estudios de rentabilidad económica en contextos productivos locales.

Agradecimientos. A la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste por el financiamiento recibido en el marco del proyecto 21B005.

Contribución de los autores. SJJ, GAO y HDR: diseñaron y realizaron el ensayo experimental, procesaron los datos y redactaron el artículo con la colaboración de todos los autores. RDFJ, CJA y CDM: contribuyeron durante los muestreos y colaboraron en la ejecución general del ensayo experimental.

Declaración de conflictos de intereses. Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Disponibilidad de datos. Los datos estarán disponibles previa solicitud.

ORCID

Santinón J.J.  <https://orcid.org/0000-0003-3373-8717>
 Hernández, D.R.  <https://orcid.org/0000-0001-8375-3021>
 Ruiz Díaz F.J.  <https://orcid.org/0000-0002-3403-6533>
 Comolli, J.A.  <https://orcid.org/0000-0002-9732-4698>
 Cerdán, D.M.  <https://orcid.org/0009-0008-2703-4231>
 González, A.O.  <https://orcid.org/0009-0007-7278-6558>

REFERENCIAS

1. Abad D, Rincón D, Poleo G. Índices de rendimiento corporal en morocoto *Piaractus brachypomus* cultivado en sistemas Biofloc. *Zootec. Trop.* 2014; 32(2): 119-130. Disponible en: <https://ve.scielo.org/pdf/zt/v32n2/art03.pdf>
2. Amoussou N, Lecocq T, Fourrier C, Nivellet R, Fleck C, Fontaine P, Pasquet A, Thomas M. A multi-trait evaluation framework to assess the consequences of polyculture in fish production: An application for pikeperch in recirculated aquaculture systems. *Aquac. Rep.* 2022; 27: 101349. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101349>
3. Campanati C, Willer D, Schubert J, Aldridge DC. Sustainable intensification of aquaculture through nutrient recycling and circular economies: more fish, less waste, blue growth. *Rev. Fish. Sci. Aquac.* 2022; 30(2): 143-69. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1897520>
4. Davidson J, Good C, Welsh C, Summerfelt ST. Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Eng.* 2014; 59: 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.01.003>
5. De Silva SS, Anderson TA. Fish nutrition in aquaculture. Springer Science & Business Media; 1994.
6. Della Rosa P, Ortiz JC, Cáceres AD, Sánchez S, Roux JP. Desempeño del sábalo *Prochilodus lineatus* en policultivo con pacú *Piaractus mesopotamicus*. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 2016; 44(2): 336-341. <https://doi.org/10.3856/vol44-issue2-fulltext-14>
7. Domínguez Castanedo O, Martínez Espinosa DA. Desempeño de los sistemas acuícolas de recirculación en el cultivo intensivo del pacú *Piaractus mesopotamicus* (Characiformes: Characidae). *Rev. Biol. Trop.* 2012; 60(1): 381-391.
8. FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. La sostenibilidad en acción. Roma. 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
9. FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformación azul. Roma. 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc0461es>
10. García JJ, Celis LM, Villalba EL, Mendoza LC, Brú SB, Atencio VJ, Pardo SC. Evaluación del policultivo de bocachico (*Prochilodus*

- magdalenae*) y tilapia (*Oreochromis niloticus*) utilizando superficies fijadoras de perifiton. *Rev. Med. Vet. Zoot.* 2011; 58(2): 71-83. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sciarttext&pid=S0120-29522011000200002>
11. Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM. Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer Nature. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
 12. González O, González L, Comolli J, Santinón J, Agüero C, Roux J. Parámetros Productivos de dos especies de peces autóctonos (*Piaractus mesopotamicus* y *Prochilodus lineatus*) en un sistema acuapónico con lechuga (*Lactuca sativa* sp). *Agrotecnia.* 2021; 31: 43-55. <https://doi.org/10.30972/agr.0315815>
 13. He J, Qin L, Chong ELC, Choong TW, Lee SK. Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics and substrate culture. *Horticulturae.* 2018; 4(4): 35. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040035>
 14. Heise J, Müller H, Probst AJ, Meckenstock RU. Ammonium removal in aquaponics indicates participation of comammox *Nitrospira*. *Curr. Microbiol.* 2021; 78: 894-903. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02358-3>
 15. Ibrahim LA, Shaghaleh H, El-Kassar GM, Abu-Hashim M, Elsadek EA, Alhaj Hamoud Y. Aquaponics: a sustainable path to food sovereignty and enhanced water use efficiency. *Water.* 2023; 15(24): 4310. <https://doi.org/10.3390/w15244310>
 16. Ip YK, Chew SF, Randall DJ. Ammonia toxicity, tolerance, and excretion. In: Wright PA, Anderson PM, editors. *Fish Physiology*. Vol. 20. San Diego: Academic Press; 2001. p. 109-148.
 17. Khan KU, Gous RM, Mansano CF, Nascimento TM, Romaneli RD, Rodrigues AT, Sakomura NK, Fernandes JB. Response of juvenile pacu (*Piaractus mesopotamicus* Holmberg, 1887) to balanced digestible protein. *Aquac. Res.* 2020; 51(9): 3729-40. <https://doi.org/10.1111/are.14722>
 18. Kubitz F. pH da água regula excreção e toxidez de amônia. *Revista Panorama de Aquicultura.* 2017a; 27(160): 14-23.
 19. Kubitz F. O impacto da amônia, do nitrito e do nitrato sobre o desempenho e a saúde dos peixes e camarões. *Revista Panorama de Aquicultura.* 2017b; 27(164): 14-27.
 20. Márquez L, Almansa E, Ruiz Díaz NE, Díaz M, Moyano FJ. Relationships between the specific growth rate and the thermal-unit growth coefficient applied to cultured juvenile fish. *Front. Mar. Sci.* 2024; 11: 1332912. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1332912>
 21. Mastrochirico-Filho VA, Hata ME, Kuradomi RY, De Freitas MV, Ariede RB, Pinheiro DG, Robledo D, Houston R, Hashimoto DT. Transcriptome profiling of pacu (*Piaractus mesopotamicus*) challenged with pathogenic *Aeromonas hydrophila*: inference on immune gene response. *Front. Genet.* 2020; 11: 604. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00604>
 22. Mello Pinho S, de Mello GL, Fitzsimmons KM, Emerenciano MG. Integrated production of fish (pacu *Piaractus mesopotamicus* and red tilapia *Oreochromis* sp.) with two varieties of garnish (scallion and parsley) in aquaponics system. *Aquac. Int.* 2018; 26(1): 99-112. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0198-y>
 23. Meza Arroyo M. Comportamiento de tres técnicas de cultivo hidropónico con lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un sistema acuapónico - Echarati - La Convención - Cusco (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. (2018).
 24. Monsees H, Klatt L, Kloas W, Wuertz S. Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquac. Res.* 2017; 48(7): 3482-92. <https://doi.org/10.1111/are.13174>
 25. Moreno Simón EW, Zafra Trelles A. Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. *REBIOL.* 2015 34(2): 60-72. Disponible en: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/770>
 26. Naranjo-Robayo N, Castro-González M, Gómez-Ramírez E. Quantification and characterization of nitrifying bacteria isolated from an aquaponic system. *Rev. U.D.C.A. Actual. Divulg. Cient.* 2025; 28(1): e2653. <https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2653>
 27. National Research Council. *Nutrient requirements of fish and shrimp*. Washington (DC): The National Academies Press; 2011. <https://doi.org/10.17226/13039>
 28. Negri M, Romera DM, Garcia F. Integrated multitrophic aquaculture in ponds using substrate for periphyton as natural source of food. *Bol. Inst. Pesca.* 2023; 49.
 29. Nitz LF, Pellegrin L, Maltez LC, Pinto D, Sampaio LA, Monserrat JM, Garcia L. Temperature and hypoxia on oxidative stress responses in pacu *Piaractus mesopotamicus*. *J. Therm. Biol.* 2020; 92: 102682. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102682>
 30. Pérez Gómez EA. Producción de Lechuga y Tilapia en Acuaponia. In: Congreso Nacional de Acuaponia. Universidad Autónoma de Chapingo. Mexico 2017.
 31. Poleo G, Aranbarrio JV, Mendoza L, Romero O. Cultivo de cachama blanca en altas densidades y en dos sistemas cerrados. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 2011; 46: 429-37.
 32. Rakocy J. Aquaponics—integrating fish and plant culture. In J. H. Tidwell (Ed.), *Aquaculture production systems*. Wiley-Blackwell, Oxford. 2012; pp. 343-386.
 33. Santinón JJ, Hernandez DR, Ruiz Diaz FJ, Comolli JA, Sánchez S, Roux JP, González AO. Recría de juveniles de *Piaractus mesopotamicus* (Pacú) en sistema acuapónico. *Agrotecnia.* 2023; 34: 24-33. <https://doi.org/10.30972/agr.347269>
 34. Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A. Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas (FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No.

- 589). FAO, Roma. 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/i4021es>
35. Sverlij SB, Espinach Ros A, Orti G. Sinopsis de los datos biológicos y pesqueros del sábalo (*Prochilodus lineatus*). FAO Fisheries Synopsis No. 154. Rome: FAO; 1993.
36. Thakur K. An alternative approach towards nitrification and bioremediation of wastewater from aquaponics using biofilm-based bioreactors: A review. *Sci. Total Environ.* 2023; 888: 164022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137849>
37. Thomas M, Pasquet A, Aubin J, Nahon S, Lecocq T. When more is more: taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biol. Rev.* 2021; 96(2): 767-84. <https://doi.org/10.1111/brv.12677>
38. Timmons MB, Ebeling JM. *Recirculating Aquaculture* (3.^a ed.). Ithaca Publishing Company. 2013.
39. UNESCO. Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua. 2023. Disponible en: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/es/home>
40. Valladão GMR, Gallani SU, Pilarski F. South American fish for continental aquaculture. *Rev. Aquacult.* 2016; 10: 351-369. <https://doi.org/10.1111/raq.12164>
41. Wang YJ, Yang T, Kim HJ. pH dynamics in aquaponic systems: Implications for plant and fish crop productivity and yield. *Sustainability.* 2023; 15(9): 7137. <https://doi.org/10.3390/su15097137>
42. Zuffo TI, Durigon EG, Morselli MB, Picoli F, Folmann S, Kinan JF, Savaris T, Zampar A, Lopes DL. Lethal temperature and toxicity of ammonia in juveniles of Curimatá (*Prochilodus lineatus*). *Aquaculture.* 2021; 545: 737138. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737138>