



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TÍTULO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Efecto de *Artemia* sp. enriquecida con ácidos grasos sobre el rendimiento de postlarvas de *Penaeus vannamei*.

**AUTORA**

Anaguano Quijia Melany Dayana

**TRABAJO DE TITULACIÓN  
Previo a la obtención del grado académico en  
MAGÍSTER EN ACUICULTURA**

**TUTORA**

MSc. Piedrahita Falquez Yahira Licia

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



**UPSE**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TRIBUNAL DE GRADO**

Los suscritos calificadores, aprueban el presente trabajo de titulación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por el Instituto de Postgrado de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

---

PhD. Roxana Álvarez Acosta  
**COORDINADORA DEL PROGRAMA**

---

MSc. Yahir Piedrahita Falquez  
**TUTORA**

---

PhD. Mery Ramírez Muñoz  
**ESPECIALISTA 1**

---

PhD. Geovanna Parra Riofrio  
**ESPECIALISTA 2**

---

Ab. María Rivera González, Mgs.  
**SECRETARIA GENERAL**  
**UPSE**



**UPSE**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN:**

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Melany Dayana Anaguano Quijia, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Acuicultura.

Atentamente,

---

MSc. Yahira Piedrahita Falquez  
**TUTORA**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Melany Dayana Anaguano Quijia

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, Efecto de *Artemia* sp. enriquecida con ácidos grasos sobre el rendimiento de postlarvas de *Penaeus vannamei* previo a la obtención del título en Magíster en Acuicultura, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, a los 02 días del mes de diciembre de año 2025

---

Melany Dayana Anaguano Quijia  
**AUTORA**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Melany Dayana Anaguano Quijia

**DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de la investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este informe de investigación dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, a los 02 días del mes de diciembre de año 2025

---

Melany Dayana Anaguano Quijia  
**AUTORA**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación Efecto de *Artemia* sp. enriquecida con ácidos grasos sobre el rendimiento de postlarvas de *Penaeus vannamei* presentado por el estudiante, Melany Dayana Anaguano Quijia fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

**INFORME INVESTIGATIVO  
ANAGUANO**

**5%**  
Textos  
sospechosos

0% Similitudes  
0 % similitudes entre comillas  
0 % entre las fuentes mencionadas  
5% Idiomas no reconocidos  
48% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: INFORME INVESTIGATIVO ANAGUANO.docx  
ID del documento: 9873f59fe98433714a976d3eb720557f7038cc87  
Tamaño del documento original: 3,21 MB

Depositante: JERRY LANDÍVAR ZAMBRANO  
Fecha de depósito: 6/11/2025  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 6/11/2025

Número de palabras: 8235  
Número de caracteres: 55.705

MSc. Yahira Piedrahita Falquez  
TUTORA

## ÍNDICE GENERAL

TÍTULO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	IV
AUTORIZACIÓN .....	V
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	VI
ÍNDICE GENERAL .....	VII
Resumen.....	XII
Abstract .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	6
JUSTIFICACIÓN .....	7
OBJETIVOS .....	9
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
PLANTEAMIENTO HIPOTÉTICO .....	10
MARCO TEÓRICO.....	11
Antecedentes .....	11
Marco conceptual.....	13
<i>Penaeus vannamei</i> : fisiología larval y requerimientos nutricionales .....	13
Ciclo biológico y desarrollo larval.....	13
Aspectos fisiológicos del crecimiento y la digestión.....	15
Requerimientos nutricionales en etapas postlarvales.....	17
Fisiología metabólica y regulación energética.....	18
Factores ambientales que influyen en el desarrollo larval .....	20

Interacciones entre nutrición y bioseguridad larval .....	21
<i>Artemia sp.</i> como alimento vivo en acuicultura moderna.....	22
Características biológicas y ecológicas.....	22
Valor nutritivo y composición bioquímica .....	24
Importancia en la alimentación de crustáceos marinos.....	26
Interacción ecológica y comportamiento alimenticio de <i>Artemia sp.</i> .....	27
Ciclo de vida y morfología aplicada a la nutrición larval .....	28
Impacto del origen geográfico y cepas en la calidad nutricional.....	29
Aportes ecológicos y sostenibilidad en la producción de <i>Artemia sp.</i> .....	30
Ácidos grasos: estructura, función y metabolismo .....	31
<i>Estructura molecular y clasificación de los HUFA</i> .....	31
Funciones fisiológicas en crustáceos marinos .....	32
Metabolismo y absorción de los ácidos grasos en <i>Penaeus vannamei</i> .....	33
Fuentes naturales y biotecnológicas de ácidos grasos .....	34
Efectos de la deficiencia y del exceso de ácidos grasos .....	35
Estrategias y métodos de enriquecimiento lipídico en <i>Artemia sp.</i> .....	36
<i>Conceptualización del enriquecimiento lipídico</i> .....	36
Tipología de agentes enriquecedores y composiciones utilizadas.....	37
Factores determinantes en la eficiencia del enriquecimiento .....	38
Procesos de bioencapsulación y retención de ácidos grasos.....	39
Cambios bioquímicos e histológicos en postlarvas alimentadas con <i>Artemia</i> enriquecida .....	40
<i>Transformaciones en el perfil de ácidos grasos</i> .....	40
Estructura y función del hepatopáncreas .....	41
Implicaciones en el metabolismo energético .....	42
MATERIALES Y MÉTODOS .....	43
Tipo de investigación.....	43

Diseño de investigación .....	44
Enfoque investigativo .....	44
Población.....	45
Muestra .....	45
Tipo de muestreo.....	47
Técnicas empleadas .....	48
Instrumentos.....	49
Procesamiento de datos.....	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	51
Rendimiento productivo.....	51
Tasa de crecimiento específico (SGR).....	53
Tasa de supervivencia larval.....	56
Biomasa final y eficiencia por tonelada.....	59
Composición proximal de las postlarvas .....	61
Perfil lipídico y dinámica de ácidos grasos.....	64
Tasa de supervivencia y análisis estadístico integral.....	67
Análisis correlacional.....	68
Evaluación estadística de los tratamientos.....	71
Interpretación biológica y estadística.....	72
Relaciones entre EPA, DHA y crecimiento larval.....	72
Análisis de varianza y prueba post hoc (ANOVA–Tukey) .....	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81
Conclusiones .....	81
Recomendaciones .....	82
BIBLIOGRAFÍA .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Etapas del ciclo larval de Penaeus vannamei y sus características fisiológicas</i> .....	14
Tabla 2	<i>Correlación entre nutrientes esenciales y parámetros fisiológicos en P. vannamei</i> .....	16
Tabla 3	<i>Requerimientos nutricionales estimados para postlarvas de Penaeus vannamei</i> .....	17
Tabla 4	<i>Vías metabólicas principales en Penaeus vannamei y su relevancia fisiológica</i> .....	19
Tabla 5	<i>Rangos ambientales recomendados para el cultivo larval de Penaeus vannamei</i> .....	20
Tabla 6	<i>Estrategias nutricionales y su efecto en la bioseguridad de Penaeus vannamei</i> .....	21
Tabla 7	<i>Características ecológicas y fisiológicas de Artemia sp. relevantes en acuicultura</i> .....	23
Tabla 8	<i>Composición promedio de Artemia sp. (peso seco) antes y después del enriquecimiento</i> .....	25
Tabla 9	<i>Beneficios de la Artemia sp. en la alimentación larval de crustáceos marinos</i> .....	26
Tabla 10	<i>Clasificación general de los HUFA en acuicultura</i> .....	32
Tabla 11	<i>Tipos de agentes enriquecedores aplicados en Artemia sp.</i> .....	37
Tabla 12	<i>Factores operativos y su incidencia sobre el enriquecimiento de Artemia sp.</i> .....	39
Tabla 13	<i>Composición lipídica promedio en postlarvas de P. vannamei</i> .....	41
Tabla 14	<i>Estructura general de la muestra y distribución experimental</i> .....	46
Tabla 15	<i>Estructura del muestreo experimental aplicado a Penaeus vannamei</i> .....	47
Tabla 16	<i>Parámetros analizados en el nivel bioquímico</i> .....	49
Tabla 17	<i>Indicadores productivos y morfométricos de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)</i> .....	52
Tabla 18	<i>Parámetros de crecimiento de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)</i> .....	55
Tabla 19	<i>Indicadores de supervivencia y condición fisiológica de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)</i> .....	58
Tabla 20	<i>Indicadores de biomasa y eficiencia por tonelada en postlarvas de Penaeus vannamei</i> .....	61
Tabla 21	<i>Composición química proximal (%) de postlarvas de Penaeus vannamei tras 18 días de alimentación con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)</i> .....	62
Tabla 22	<i>Perfil lipídico (%FAME y mg/g) de postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida con ácidos grasos (AEAG) y no enriquecida (control)</i> .....	65
Tabla 23	<i>Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para los indicadores productivos de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida y no enriquecida</i> .....	71
Tabla 24	<i>Correlaciones y regresiones entre EPA, DHA y parámetros de crecimiento larval en Penaeus vannamei</i> .....	74
Tabla 25	<i>Resultados del análisis ANOVA y prueba de Tukey en postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida</i> .....	75
Tabla 26	<i>Resultados de las pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad (Levene) en las variables analizadas</i> .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ciclo biológico del Penaeus vannamei</i> .....	15
Figura 2 <i>Indicadores productivos de postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con AEAG en comparación a Artemia sp. no enriquecida (control)</i> .....	57
Figura 3 <i>Pasta de enriquecimiento lipídico utilizada en la preparación de Artemia sp. enriquecida (AEAG)</i> .....	60
Figura 4 <i>Indicadores productivos de postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida con ácidos grasos (AEAG) frente a Artemia sp. no enriquecida (control)</i> . ...	68
Figura 5 <i>Relación entre la tasa de crecimiento específico (SGR) y la supervivencia de Penaeus vannamei</i> . .....	70
Figura 6 <i>Relación entre el contenido de ácidos grasos omega-3 y el rendimiento productivo</i> . .....	70
Figura 7 <i>Relación inversa entre el contenido lipídico total y la tasa de crecimiento específico (SGR)</i> .....	71
Figura 8 <i>Distribución de frecuencias e índices de normalidad de las variables productivas y bioquímicas en Penaeus vannamei</i> . .....	78

## RESUMEN

La camaronicultura ecuatoriana ha alcanzado una posición relevante en la exportación mundial de *Penaeus vannamei*, gracias a la capacidad adaptativa de la especie y a los avances tecnológicos en los sistemas de cultivo; sin embargo, la calidad nutricional durante las etapas larvales continúa siendo un factor determinante en la supervivencia y rendimiento productivo. El presente estudio tuvo como objetivo general evaluar el efecto del enriquecimiento lipídico de *Artemia sp.* con ácidos grasos altamente insaturados (HUFA) sobre el crecimiento, la composición bioquímica y la estructura histológica de postlarvas de *P. vannamei*; con ello se buscó determinar la relación entre los perfiles de DHA, EPA y ARA y la eficiencia fisiológica de los organismos. La investigación se desarrolló bajo un diseño experimental completamente aleatorizado, con cuatro tratamientos y tres repeticiones, utilizando 300 postlarvas distribuidas en doce unidades experimentales; se aplicaron análisis biométricos, bioquímicos e histológicos, complementados con pruebas estadísticas de normalidad (Shapiro–Wilk), homogeneidad (Levene), análisis de varianza (ANOVA) y prueba post hoc de Tukey. Los resultados mostraron diferencias cuantificables en la biomasa total, con un incremento del 26,9 % en el grupo alimentado con *Artemia* enriquecida; la tasa de crecimiento específico (SGR) alcanzó 15,33 %/día y la supervivencia mejoró en un 21,4 %. A nivel bioquímico, se evidenció un aumento de carbohidratos y ceniza, junto con un perfil lipídico más equilibrado; los análisis correlacionales indicaron una relación positiva entre EPA, DHA y la tasa de crecimiento ( $r = 0,71$  y  $r = 0,66$ ;  $p < 0,05$ ). Concluyendo que, la utilización de *Artemia sp.* enriquecida con HUFA generó mejoras sustanciales en el desarrollo larval, al potenciar la conversión energética, optimizar la estructura del hepatopáncreas y elevar la uniformidad poblacional; estos resultados respaldan la incorporación de este tipo de enriquecimiento como una herramienta tecnológica para fortalecer la sostenibilidad y competitividad de la industria camaronera ecuatoriana.

**Palabras clave:** *Penaeus vannamei*, enriquecimiento lipídico, ácidos grasos

## ABSTRACT

Ecuadorian shrimp farming has achieved a leading position in global *Penaeus vannamei* exports due to the species' adaptive capacity and the technological improvements in hatchery systems; however, nutritional quality during larval stages remains a determining factor for survival and productive yield. The main objective of this study was to evaluate the effect of lipid enrichment of *Artemia sp.* with highly unsaturated fatty acids (HUFA) on the growth, biochemical composition, and histological structure of *P. vannamei* postlarvae; this analysis aimed to determine how DHA, EPA, and ARA profiles influence physiological efficiency and energy conversion. The research followed a completely randomized experimental design with four treatments and three replicates, involving 300 postlarvae distributed in twelve experimental units; biometric, biochemical, and histological analyses were conducted, complemented by statistical tests of normality (Shapiro–Wilk), homogeneity (Levene), analysis of variance (ANOVA), and Tukey's post hoc test. Results showed measurable differences in total biomass, with a 26.9 % increase in the group fed enriched *Artemia*; the specific growth rate (SGR) reached 15.33 %/day, and survival improved by 21.4 %. Biochemical profiles revealed higher carbohydrate and ash content with a more balanced lipid distribution; correlation analyses demonstrated a positive relationship between EPA, DHA, and growth rate ( $r = 0.71$  and  $r = 0.66$ ;  $p < 0.05$ ). In conclusion, feeding *Penaeus vannamei* postlarvae with HUFA-enriched *Artemia sp.* enhanced larval performance by improving energy conversion, optimizing hepatopancreatic structure, and increasing population uniformity; these findings support the adoption of lipid enrichment strategies as a sustainable and efficient alternative for strengthening the productivity of the Ecuadorian shrimp industry.

**Keywords:** *Penaeus vannamei*, lipid enrichment, fatty acids

## INTRODUCCIÓN

La producción de *Penaeus vannamei* se ha consolidado como una de las actividades acuícolas más desarrolladas de América Latina; Ecuador lidera este sector al mantener un crecimiento sostenido y una proyección exportadora que supera los 1,2 millones de toneladas anuales. El desempeño de esta especie se explica por su adaptabilidad a diferentes niveles de salinidad, su alta eficiencia alimentaria y la calidad del producto final, características que han permitido su expansión tanto en sistemas intensivos como semi intensivos (Boyd et al., 2021; Bulkini, 2025). No obstante, el éxito de la camaronicultura depende en gran medida del manejo nutricional durante las primeras etapas de vida, cuando la fisiología del organismo se encuentra en formación y la demanda energética se eleva considerablemente (Duan et al., 2023; Martínez-Soler et al., 2023).

Durante la fase larval, el metabolismo de *P. vannamei* presenta una fuerte dependencia de los lípidos, especialmente de los ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (HUFA), responsables de mantener la integridad de las membranas celulares, la regulación osmótica y el desarrollo de órganos digestivos (Martínez-Soler et al., 2023). Entre ellos, los compuestos más relevantes son el ácido eicosapentaenoico (EPA, 20:5n-3), el docosahexaenoico (DHA, 22:6n-3) y el araquidónico (ARA, 20:4n-6), cuya proporción define la estabilidad fisiológica y la capacidad inmunológica del organismo (Ramena et al., 2025; Samaee & Estévez, 2025). Sin embargo, la dieta natural de las larvas suele carecer de estos componentes en niveles adecuados, lo que afecta la supervivencia y la homogeneidad del lote (Felix et al., 2021).

El alimento vivo más empleado en la fase de larvicultura y precría es *Artemia sp.*, debido a su alta digestibilidad, movimiento natural y disponibilidad mundial (Joshua et al., 2022). A pesar de sus ventajas, su perfil lipídico natural presenta una deficiencia en HUFA, especialmente en DHA, lo que limita su aporte energético y su valor biológico (Raju et al., 2021; Rasdi & Qin, 2018). Para compensar esta carencia, los laboratorios de larvicultura han incorporado procesos de enriquecimiento mediante emulsiones a base de microalgas, aceites marinos o fosfolípidos encapsulados (An et al., 2020; Madkour et al., 2023; Akbary & Amiri, 2023). Estas formulaciones buscan mejorar la calidad nutricional de *Artemia* sin alterar su viabilidad ni su comportamiento en el medio acuático (Ramena et al., 2025; Bermudes-Lizárraga et al., 2023).

El proceso de bioencapsulación de lípidos en *Artemia sp.* consiste en suministrar a los nauplios una suspensión rica en ácidos grasos durante un tiempo determinado según el protocolo, entre 18 y 24 h, para que incorporen los compuestos a su sistema digestivo antes de ser ofrecidos a las larvas de camarón (Felix et al., 2020; Adloo et al., 2020). Esta técnica ha demostrado incrementar los niveles de HUFA en el alimento vivo, aunque los resultados varían dependiendo de la composición del enriquecedor, la temperatura, la aireación y el tiempo de exposición. Estudios recientes de Martínez-Soler et al. (2023) y Zhong et al. (2020) reportaron mejoras notables en el crecimiento y supervivencia de *P. vannamei* al aplicar emulsiones con microalgas *Schizochytrium sp.*, ricas en DHA.

No obstante, la reproducibilidad de estos resultados continúa siendo un desafío técnico; diferentes laboratorios han reportado inconsistencias en las concentraciones óptimas de ácidos grasos y en la duración del enriquecimiento (Aboel-Masoumi et al., 2021; Duan et al., 2023). En muchos casos, los protocolos no establecen relaciones claras entre la composición lipídica del alimento vivo y la respuesta histológica del organismo, lo que impide entender de manera integral los mecanismos de absorción y utilización de los lípidos (Singh et al., 2024; Wang et al., 2016). Así, el problema no reside únicamente en incrementar la cantidad de grasa disponible, sino en garantizar su biodisponibilidad y estabilidad dentro del metabolismo larval (Ramena et al., 2025).

Desde el punto de vista bioquímico, los ácidos grasos intervienen en la síntesis de eicosanoides, moléculas que regulan la inflamación, el metabolismo oxidativo y la respuesta inmunitaria; una deficiencia de estos compuestos puede alterar la homeostasis y reducir la eficiencia del crecimiento (Samaee & Estévez, 2025). Las larvas que reciben dietas pobres en DHA y EPA suelen presentar hepatopáncreas desorganizados, vacuolización citoplasmática y disminución en la densidad tubular, indicadores de una menor capacidad de digestión y asimilación de nutrientes (Martínez-Soler et al., 2023; Zhong et al., 2020). Estos parámetros histológicos permiten establecer una relación directa entre la nutrición y la fisiología celular, convirtiéndose en marcadores de salud y rendimiento larval (Ramena et al., 2025; Félix et al., 2021).

El hepatopáncreas, órgano multifuncional en crustáceos, cumple una tarea esencial en la digestión y el almacenamiento energético; su estructura tubular y su nivel de vacuolización reflejan el estado metabólico del organismo (Afonso López et al., 2023; Bermudes-Lizárraga et al., 2023). Cuando la dieta carece de ácidos grasos, este órgano tiende a mostrar

degeneración epitelial, necrosis parcial y pérdida de integridad en los túbulos digestivos (Suita et al., 2015; Mirzaei et al., 2021).

En este sentido, el uso de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos representa una alternativa prometedora para mejorar la calidad nutricional de las postlarvas, al permitir una incorporación más eficiente de compuestos energéticos y una mejor adaptación a condiciones ambientales variables (Akbari & Amiri, 2023; Ramena et al., 2025). Su aplicación contribuye no solo al rendimiento productivo, sino también a la sostenibilidad del sistema de cultivo, al reducir la dependencia de harinas de pescado y promover fuentes renovables de lípidos (Boyd et al., 2021; Porto-Fragozo & Rodríguez-Forero, 2023). Además, la incorporación de emulsiones microalgales ha mostrado efectos positivos en la tolerancia al estrés y en la resistencia frente a patógenos bacterianos (Zhang et al., 2025; Ozório et al., 2024).

El presente trabajo evaluó los efectos del enriquecimiento lipídico de *Artemia sp.* sobre el crecimiento, la composición bioquímica y supervivencia de *P. vannamei*, con el fin de establecer el rendimiento larval. El estudio se basó en un diseño experimental con enriquecimiento a base de ácidos grasos aplicando análisis bioquímicos, complementado con pruebas estadísticas.

La importancia de esta investigación radicó en aportar información verificable sobre la interacción entre nutrición y rendimiento en *P. vannamei*, contribuyendo a mejorar las prácticas de alimentación en los centros de larvicultura y fortaleciendo la competitividad de la industria camaronera ecuatoriana. De esta manera, se establecieron bases científicas para estandarizar protocolos de enriquecimiento de *Artemia sp.*, garantizando una producción más eficiente, sostenible y alineada con las demandas internacionales de trazabilidad y calidad alimentaria.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de *Penaeus vannamei* representa uno de los ejes productivos más importantes de la economía acuícola mundial; en 2023 superó los 5,8 millones de toneladas anuales (CNA, 2025), con Ecuador como el mayor exportador, aportando más del 22% de la producción global, equivalente a 1,3 millones de toneladas y más de 7.000 millones de dólares en ingresos. Este éxito productivo se sustenta en su adaptabilidad fisiológica, la tolerancia a amplios rangos de salinidad (0–45 ppt) y la rápida tasa de crecimiento; sin embargo, la rentabilidad y sostenibilidad del sistema dependen estrechamente de la calidad nutricional de las postlarvas, ya que de esta etapa temprana se deriva el vigor fisiológico y la supervivencia en fases de engorde (Martínez-Soler et al., 2023; Shin et al., 2023).

Durante la larvicultura, *Artemia sp.* constituye el alimento vivo más empleado por su alto valor energético, su movimiento estimulante para la captura y su capacidad de bioencapsular nutrientes. No obstante, su perfil lipídico natural carece de suficientes ácidos grasos altamente insaturados (HUFA), entre ellos el ácido docosahexaenoico (DHA, 22:6 n–3), eicosapentaenoico (EPA, 20:5 n–3) y araquidónico (ARA, 20:4 n–6); compuestos esenciales en la conformación de membranas, la regulación osmótica, la neurogénesis y la respuesta inmunológica (Joshua et al., 2022; Samat et al., 2020). La deficiencia de estos lípidos provoca efectos negativos observables en el hepatopáncreas, con vacuolización citoplasmática, reducción del diámetro de túbulos y disminución de las células tipo B encargadas de la secreción enzimática (Martínez-Soler et al., 2023); además, reduce la conversión alimenticia y la supervivencia larval hasta en un 30 % bajo condiciones de estrés por salinidad o densidad (Felix et al., 2021).

En Ecuador, los laboratorios de producción de postlarvas registran tasas promedio de supervivencia entre 55% y 75%, muy por debajo del potencial reportado en sistemas con artemia enriquecida (hasta 90 %) (Ordóñez-Mejía et al., 2021). La causa principal de esta brecha radica en la ausencia de protocolos estandarizados para el enriquecimiento de artemia, práctica que permite aumentar la fracción de HUFA mediante emulsiones de microalgas o aceites de pescado. La bioencapsulación —proceso de absorción de nutrientes por los nauplios antes de ser suministrados a las larvas— constituye una técnica eficiente, pero depende de variables críticas como el tiempo de enriquecimiento (12–24 h), la temperatura del medio (28–30 °C) y la concentración de emulsión (0,3–0,6 g L<sup>-1</sup>) (Zhong et al., 2020). De

hecho, variaciones mínimas en estos parámetros pueden alterar la estabilidad de los compuestos y reducir la retención de DHA en más del 40 %, afectando los resultados de crecimiento (Samat et al., 2020).

Los estudios más recientes evidencian mejoras cuantitativas en la composición de las postlarvas alimentadas con artemia enriquecida: un incremento del 26,9 % en el rendimiento, del 13,6 % en la tasa de crecimiento específico (SGR) y del 21,4 % en la supervivencia, acompañado de un descenso del 22,1 % en lípidos y un aumento de 12,0 % en carbohidratos y 1,3 % en proteínas (Anaguano-Quijia & Piedrahita, 2025). Estos cambios bioquímicos reflejan una optimización metabólica y una mayor eficiencia en la utilización energética, aspectos que repercuten en la calidad final del camarón. Asimismo, Martínez-Soler et al. (2023) demostraron que el contenido de DHA y ARA en las postlarvas alimentadas con artemia enriquecida puede duplicarse respecto al control, generando un hepatopáncreas con mayor perímetro funcional y menor degeneración tisular.

Sin embargo, la eficiencia de enriquecimiento varía considerablemente entre laboratorios. Estudios de Felix et al. (2021) y Raju et al. (2021) demostraron que el uso de diferentes fuentes lipídicas —aceites de pescado, emulsiones comerciales tipo Selco y microalgas como *Nannochloropsis* o *Isochrysis*— puede alterar el cociente DHA/EPA entre 0,3 y 2,2, provocando respuestas dispares en crecimiento y supervivencia. Esta variabilidad plantea la necesidad de establecer una metodología reproducible que unifique criterios de concentración, tiempo de exposición y frecuencia de alimentación para obtener resultados estables.

Desde la perspectiva económica y ambiental, el enriquecimiento de artemia con ácidos grasos podría reducir el uso de harina y aceite de pescado hasta en un 20 %, con una disminución proporcional en los costos de insumos y la huella ecológica de los sistemas intensivos (Samae & Estévez, 2025). En Ecuador, donde la camaronicultura genera más de 250.000 empleos directos e indirectos, optimizar la calidad de las postlarvas tiene implicaciones directas sobre la competitividad del sector, la trazabilidad del producto y la apertura a mercados sostenibles. Sin embargo, la transferencia tecnológica en bioencapsulación aún es limitada; los protocolos empleados son empíricos y no consideran la interacción entre lípidos, carbohidratos y proteínas en el metabolismo larval.

Por tanto, el problema científico se orienta a determinar cómo el enriquecimiento lipídico en *Artemia sp.* impactan el crecimiento, la supervivencia y la composición

bioquímica de las postlarvas de *P. vannamei* bajo condiciones controladas. La falta de estandarización metodológica impide consolidar un modelo nutricional eficiente y reproducible, lo que reduce la eficiencia bioeconómica y la sostenibilidad del sistema camaronero ecuatoriano.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿En qué medida la alimentación con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos influye en el crecimiento, supervivencia y composición bioquímica de las postlarvas de *Penaeus vannamei* cultivadas en sistemas controlados?

## JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas, la acuicultura de *Penaeus vannamei* ha adquirido una importancia creciente dentro del sistema productivo latinoamericano; no solo por su capacidad adaptativa, sino también porque ha contribuido a la estabilidad económica de amplias zonas costeras. Ecuador, en particular, ha mantenido un crecimiento sostenido en este rubro y se reconoce actualmente entre los mayores exportadores mundiales de camarón; sin embargo, dicho avance no ha estado exento de limitaciones técnicas que condicionan la eficiencia de la producción en sus primeras etapas. Entre los aspectos más determinantes se encuentra la nutrición larval; un componente que, pese a los avances tecnológicos, continúa dependiendo de la calidad biológica de los alimentos vivos empleados en los criaderos (Martínez-Soler et al., 2023).

En este escenario, la *Artemia sp.* representa una fuente esencial de alimento para las postlarvas, aunque su composición lipídica natural no siempre garantiza el aporte de ácidos grasos requeridos para un desarrollo saludable; por tal motivo, se han implementado estrategias de enriquecimiento con emulsiones de microalgas, aceites marinos o extractos naturales que buscan compensar dichas carencias (Joshua et al., 2022). No obstante, los resultados obtenidos en diferentes centros de investigación no son uniformes; las variaciones metodológicas y las diferencias en las condiciones ambientales generan contrastes en la eficiencia de retención de lípidos, lo que pone de manifiesto la necesidad de profundizar en este campo desde una perspectiva experimental adaptada al contexto ecuatoriano (Felix et al., 2021).

Desde una visión científica, analizar los efectos del enriquecimiento de *Artemia sp.* con ácidos grasos resulta relevante porque permite comprender los mecanismos bioquímicos que intervienen en la nutrición temprana de *P. vannamei*; este conocimiento posibilita identificar correlaciones entre los niveles de DHA, EPA y ARA y la respuesta fisiológica de las larvas en crecimiento, especialmente en el hepatopáncreas, órgano que refleja de manera directa el estado metabólico y sanitario del individuo (Raju et al., 2021). De igual forma, explorar los tiempos de exposición, la concentración de emulsiones y las fuentes lipídicas utilizadas aporta información útil para optimizar la formulación de dietas vivas con mayor precisión técnica; lo anterior se traduce en una reducción de la variabilidad experimental y en una mejora de la

reproducibilidad entre laboratorios, un objetivo que continúa siendo prioritario en la investigación acuícola contemporánea (Zhong et al., 2020).

En lo económico, la propuesta adquiere sentido porque los alimentos representan una parte sustancial de los costos operativos en la camaronicultura; las estimaciones actuales sitúan este componente entre el 45% y el 55% del total de inversión, por lo que cualquier optimización en la eficiencia alimenticia genera impactos directos en la rentabilidad (Samae & Estévez, 2025). Si se considera que el uso de *Artemia* enriquecida podría elevar la supervivencia larval entre un 20% y un 30% y reducir el consumo de harina y aceite de pescado en aproximadamente un 20%, el beneficio económico se vuelve tangible, especialmente en los laboratorios de larvicultura y precría. Además, la disminución de insumos de origen pesquero contribuye al cumplimiento de estándares ambientales internacionales y favorece una imagen comercial sostenible ante mercados exigentes.

Desde una óptica social, el desarrollo de prácticas de nutrición viva más eficientes también reviste importancia; la industria camaronera ecuatoriana sostiene comunidades costeras en las provincias de Guayas, El Oro, Manabí y Santa Elena, donde miles de familias dependen del empleo que generan los hatcheries y las plantas de procesamiento. En este sentido, la incorporación de técnicas de bioencapsulación basadas en microalgas y compuestos naturales no solo mejora la productividad de las larvas, sino que promueve una cultura técnica más responsable con el medio marino; lo cual armoniza con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2, 8 y 14, relacionados con la seguridad alimentaria, el trabajo decente y la vida submarina (Martínez-Soler et al., 2023).

Por tanto, la investigación se justifica porque persigue establecer parámetros experimentales reproducibles que orienten la estandarización de protocolos de enriquecimiento de *Artemia sp.* con ácidos grasos; al mismo tiempo, busca evaluar su influencia sobre los indicadores zootécnicos y bioquímicos de las postlarvas de *Penaeus vannamei*. A través de este proceso, se espera generar un aporte técnico aplicable a las prácticas de producción en Ecuador; un conocimiento que, más allá del beneficio económico, contribuya a consolidar una acuicultura responsable, basada en el equilibrio entre productividad, innovación científica y sostenibilidad ambiental.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto del suministro de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos sobre el rendimiento y desarrollo de las postlarvas de *Penaeus vannamei*, mediante la comparación del crecimiento, la composición proximal y el perfil de ácidos grasos en condiciones controladas de cultivo.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar las variaciones de la tasa de crecimiento específico, en postlarvas de *Penaeus vannamei* alimentadas con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos sobre el rendimiento productivo.
2. Examinar la composición proximal y el perfil de ácidos grasos de las postlarvas alimentadas con *Artemia sp.* enriquecida, estableciendo comparaciones que permitan comprender cómo el enriquecimiento lipídico incide en la calidad nutricional y el equilibrio bioquímico del organismo.
3. Determinar el efecto del suministro de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos sobre la supervivencia de las postlarvas de *Penaeus vannamei*, considerando los parámetros productivos obtenidos en condiciones controladas de cultivo.

## PLANTEAMIENTO HIPOTÉTICO

La investigación parte de la idea de que el enriquecimiento de *Artemia sp.* con ácidos grasos puede incidir en el desempeño zootécnico y bioquímico de las postlarvas de *Penaeus vannamei*; esta proposición se plantea de manera tentativa, puesto que la magnitud de dicho efecto depende de múltiples factores interrelacionados, como la concentración lipídica empleada, el tiempo de exposición de los nauplios y la eficiencia metabólica de las larvas durante su desarrollo inicial. Bajo esta premisa, las hipótesis permiten orientar el análisis empírico y establecer vínculos verificables entre las variables del estudio.

### Hipótesis general

El suministro de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos mejorará el rendimiento productivo, la composición bioquímica y la supervivencia de las postlarvas de *Penaeus vannamei* en condiciones controladas de cultivo.

### Hipótesis específicas

1. La alimentación con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos podría generar variaciones en la tasa de crecimiento específico y el rendimiento productivo de las postlarvas de *Penaeus vannamei*.
2. La inclusión de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos esenciales en la dieta larval podría modificar la composición proximal y el perfil lipídico de las postlarvas, incrementando la proporción relativa de DHA, EPA y ARA en sus tejidos; este cambio estaría condicionado por la biodisponibilidad de los ácidos grasos en el alimento vivo y por la capacidad de asimilación del organismo.
3. El suministro de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos podría influir positivamente en la supervivencia de las postlarvas de *Penaeus vannamei*, debido a una mejora en su metabolismo energético y en la eficiencia fisiológica asociada al uso de lípidos de alta calidad durante el cultivo.

## MARCO TEÓRICO

### Antecedentes

En los sistemas de larvicultura marina, *Artemia sp.* ha sido empleada por décadas como un alimento vivo de alta digestibilidad y con una composición adaptable a las necesidades metabólicas de crustáceos y peces. Su valor reside en la capacidad de ser cultivada, decapsulada y posteriormente enriquecida con compuestos específicos, de modo que se adecúe al perfil nutricional requerido por las postlarvas. Según el estudio desarrollado en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, la incorporación de *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos se analizó como alternativa frente al uso exclusivo de balanceados, buscando observar su posible efecto sobre el rendimiento larval y la composición bioquímica de *Penaeus vannamei*.

Autores como Martínez-Soler et al. (2023) abordaron el enriquecimiento con HUFA en *Artemia* utilizando emulsiones de microalgas; su trabajo exploró si la suplementación con DHA, DPA y ARA durante un periodo de doce días podía influir en la calidad bioquímica de las postlarvas y en la morfología hepatopancreática. Los resultados que describen no se plantean como conclusivos, pero sí sugieren una relación entre la presencia de estos lípidos y un hepatopáncreas más estructurado, con mayor número de células B y menor proporción de tejido degenerado.

Por otra parte, Ordóñez-Mejía et al. (2021) estudiaron la combinación de alimento artificial y biomasa de *Artemia sp.* en un sistema intensivo, con el propósito de analizar la respuesta en crecimiento, supervivencia y eficiencia alimenticia. Los autores indicaron que la biomasa de artemia podría tener un efecto positivo en la digestibilidad y en la reducción de residuos nitrogenados, aunque las diferencias estadísticas en crecimiento no fueron significativas en los tratamientos con reemplazo parcial del balanceado. Este tipo de trabajos ha servido para plantear que la incorporación de artemia viva o procesada podría mejorar la eficiencia bioenergética de los sistemas de cría.

Los estudios desarrollados en laboratorios comerciales ecuatorianos, como el de BIOGEMAR S.A., han implementado ensayos con emulsiones experimentales de microalgas que incluyen *Dunaliella salina* y *Chlorella vulgaris*. En tales investigaciones se menciona que la artemia enriquecida alcanzó concentraciones de DHA superiores al 3 %, comparadas con el

0,6 % en nauplios no tratados. Aunque no se observaron cambios notables en la longitud o el peso de las postlarvas durante ciclos cortos de cultivo, los investigadores plantearon que los efectos bioquímicos podrían reflejarse en etapas posteriores del desarrollo (Martínez-Soler et al. (2023)).

Desde una perspectiva fisiológica, los HUFA se han vinculado con procesos de síntesis de eicosanoides, integridad de membranas y modulación inmunitaria. Afonso López et al. (2023) describieron que una deficiencia en estos ácidos puede asociarse con vacuolización lipídica en el hepatopáncreas, mientras que su exceso podría generar daño oxidativo; sin embargo, al evaluar dietas enriquecidas con microalgas formuladas, los autores señalaron que los niveles administrados no produjeron efectos degenerativos observables en el tejido hepático, lo cual sugiere un rango funcional de seguridad fisiológica.

Otros estudios, como el de Samaee y Estévez (2025), incorporaron variables histológicas para relacionar la bioencapsulación lipídica con la respuesta anatómica del hepatopáncreas. Su análisis se centró en comparar la disposición tubular, la uniformidad celular y la compactación tisular entre organismos alimentados con *Artemia* enriquecida y sin enriquecer. Los resultados fueron interpretados como evidencia de una posible reorganización metabólica inducida por la disponibilidad de lípidos estructurados, aunque los autores recomendaron validar estas observaciones mediante microscopía electrónica y pruebas de actividad enzimática.

Desde el punto de vista productivo, los trabajos de Felix et al. (2021) y Joshua et al. (2022) exploraron si el enriquecimiento con fuentes marinas y vegetales podía mejorar la eficiencia alimenticia. En sus reportes se mencionan incrementos en la tasa de crecimiento específico y en la supervivencia, pero también se señala que las variaciones en la composición lipídica de las emulsiones pueden generar respuestas heterogéneas entre lotes, lo que resalta la necesidad de estandarizar la composición de los sustratos de enriquecimiento y los tiempos de exposición.

La literatura reciente coincide en que la eficacia del enriquecimiento lipídico depende no solo del tipo de emulsionante y la duración del proceso, sino también de factores como la temperatura, la densidad larval y la calidad del agua. Investigaciones como la de Ordóñez-Mejía et al. (2021) abordaron la influencia de la biomasa viva sobre la eficiencia alimenticia, mientras que Martínez-Soler et al. (2023) destacaron el papel de las microalgas en la estabilidad de las emulsiones y la transferencia de lípidos funcionales hacia los tejidos larvales.

Marco conceptual

Camarón Blanco Del Pacífico (*Penaeus vannamei*)

Clasificación Taxonómica

Reino: Animalia

Phylum: Arthropoda

Sub – Phylum: Crustacea

Clase: Malacostraca

Orden: Decapoda

Superfamilia: Penaeoidea

Familia: Penaeidae

Género: *Penaeus*

Especie: *vannamei*

Nombre científico: *Penaeus vannamei*

Nombre vulgar: Camarón blanco (Boone, 1931)

*Penaeus vannamei*: fisiología larval y requerimientos nutricionales

Ciclo biológico y desarrollo larval

El camarón blanco del Pacífico (*Penaeus vannamei*) constituye una de las especies más relevantes dentro de la acuicultura global debido a su tolerancia a variaciones ambientales y su elevada eficiencia productiva. Su desarrollo larval comprende cinco fases fundamentales: huevo, nauplio, zoea, mysis y postlarva; cada una presenta estructuras morfológicas y demandas metabólicas particulares (Bermudes-Lizárraga et al., 2023). Durante la embriogénesis, el embrión depende del vitelo, el cual provee energía hasta la eclosión.

La fase naupliar es completamente endógena; las larvas carecen de aparato digestivo funcional y dependen del vitelo remanente para sostener la actividad natatoria inicial. A partir de la etapa zoea, el sistema digestivo se desarrolla gradualmente y la larva comienza a alimentarse de fitoplancton, principalmente *Chaetoceros calcitrans* y *Thalassiosira weissflogii* (Abdelhay et al., 2025; Tran et al., 2020). En la fase mysis, se evidencia una transformación

anatómica; las mandíbulas se robustecen y las larvas adquieren capacidad para capturar partículas mayores como *Artemia sp.* (Joshua et al., 2022).

Durante la fase postlarval, el organismo alcanza características similares al camarón juvenil; en este punto, se establece una dieta mixta compuesta por artemia y alimento balanceado, aspecto que incide en la calidad morfológica, la supervivencia y la uniformidad del lote (Afonso López et al., 2023).

Tabla 1

*Etapas del ciclo larval de Penaeus vannamei y sus características fisiológicas*

Etapa larval	Duración promedio (días)	Fuente nutricional principal	Aspectos fisiológicos relevantes
Huevo	1	Endógena (vitelo)	Segmentación embrionaria y formación de blastodermo
Nauplio	2–3	Endógena	Movilidad limitada; desarrollo inicial de apéndices natatorios
Zoea	3–4	Microalgas ( <i>Chaetoceros</i> , <i>Thalassiosira</i> )	Inicio de la alimentación exógena y diferenciación intestinal
Mysis	3–4	Artemia y microalgas	Complejidad bucal y digestiva; transición alimentaria
Postlarva	5–7	Artemia y balanceado	Desarrollo hepatopancreático y muscular; capacidad natatoria activa

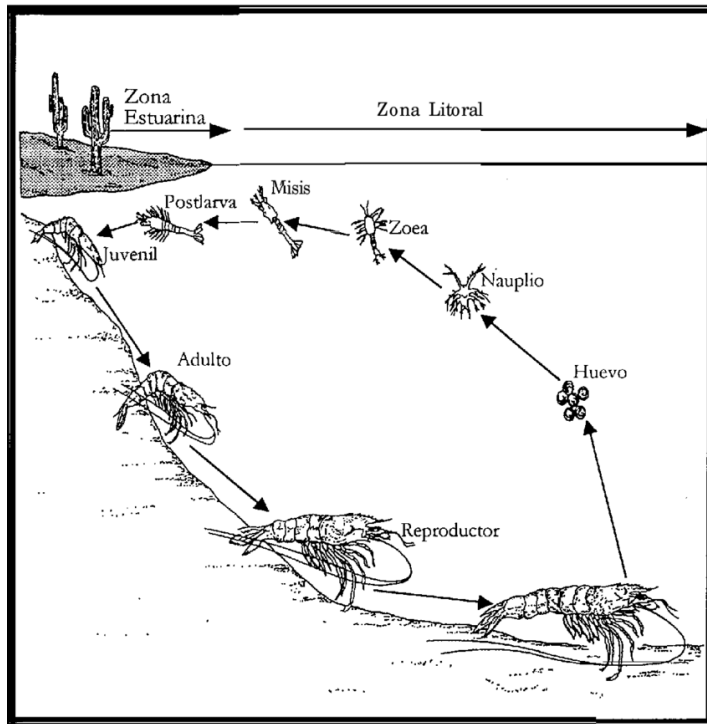
*Nota. Elaboración propia a partir de Bermudes-Lizárraga et al. (2023), Joshua et al. (2022) y Abdelhay et al., et al. (202).*

De acuerdo con Bermudes-Lizárraga et al. (2023) y Manan et al. (2020), la duración de cada etapa depende de la temperatura y salinidad del agua; en sistemas con biofloc se ha observado una aceleración de la metamorfosis hasta en un 15 %, atribuida a la mayor disponibilidad de bacterias heterotróficas y materia orgánica particulada. En Ecuador, los

laboratorios larvarios emplean densidades de 100–150 larvas/L para garantizar la renovación de oxígeno y evitar competencia por alimento (Chalán Jumbo, 2022).

Figura 1

*Ciclo biológico del Penaeus vannamei*



Nota. Tomado de Cortés (1998).

La comprensión de este proceso resulta esencial para sincronizar el suministro de alimentos vivos y controlar la calidad del agua. Tal como sostienen De Lorenzo et al. (2016), el ajuste del fotoperíodo y la aireación influye en la eficiencia de la muda, mientras que las deficiencias nutricionales pueden retardar el crecimiento y generar anomalías morfológicas.

Aspectos fisiológicos del crecimiento y la digestión

El crecimiento de *P. vannamei* se basa en una secuencia de mudas periódicas, controladas por la hormona ecdisona, la cual estimula la formación de un nuevo exoesqueleto y la expansión de tejidos musculares (Xu et al., 2022). Este proceso demanda un aporte constante de energía y nutrientes esenciales, en especial proteínas de alta digestibilidad y lípidos insaturados.

El hepatopáncreas actúa como el centro metabólico del camarón; en él se sintetizan enzimas digestivas como lipasas, amilasas y proteasas, además de participar en la

detoxificación de metabolitos y el almacenamiento de glucógeno (Felix et al., 2021). Afonso López et al. (2023) evidenciaron que dietas con enriquecimiento lipídico de HUFA aumentan la densidad de túbulos funcionales en el hepatopáncreas y disminuyen la vacuolización citoplasmática, lo que sugiere una mejor absorción de nutrientes.

El metabolismo larval de *P. vannamei* es altamente dependiente de la relación DHA/EPA; Duan et al. (2023) demostraron que una proporción cercana a 2:1 mejora la digestibilidad lipídica y optimiza la oxidación mitocondrial. Asimismo, Yao et al. (2022) determinaron que las postlarvas alimentadas con emulsiones de microalgas presentan mayor retención proteica y un crecimiento específico (SGR) superior en un 18 %.

Tabla 2

*Correlación entre nutrientes esenciales y parámetros fisiológicos en P. vannamei*

Nutriente o relación dietaria	Efecto fisiológico asociado
DHA/EPA (2:1)	Incremento de la actividad lipásica y eficiencia digestiva
HUFA > 3 % de la dieta	Aumento de la tasa de muda y síntesis de enzimas antioxidantes
EPA + ARA	Mejora de la inmunocompetencia y síntesis de hemocitos
DHA 1,5 %	Regeneración de túbulos hepatopancreáticos

*Nota. Elaboración propia con base en Duan et al. (2023), Felix et al. (2021), Xu et al. (2022) y Afonso López et al. (2023).*

La digestión eficiente depende, además, del pH del medio intestinal; en larvas sanas, este oscila entre 7,1 y 7,4, rango que garantiza la máxima actividad de las enzimas hidrolíticas (Raju et al., 2021). Cuando el pH desciende, se reduce la disponibilidad de ácidos grasos libres, afectando la conversión alimenticia. En sistemas larvarios intensivos, el estrés oxidativo puede inducir una disminución del 20% en la secreción enzimática, de ahí la importancia de suplementar antioxidantes naturales como tocoferoles o astaxantina (Ramena et al., 2025).

Es así como, los procesos de crecimiento y digestión en *P. vannamei* no dependen únicamente de la cantidad de alimento suministrado, sino también de la calidad bioquímica y de la estabilidad de las emulsiones lipídicas utilizadas durante la fase postlarval.

#### Requerimientos nutricionales en etapas postlarvales

La nutrición de *P. vannamei* en su fase postlarval se estructura sobre la base de una dieta mixta, que combina alimentos vivos y balanceados. Los requerimientos varían según la temperatura, la salinidad y el nivel de actividad metabólica; sin embargo, los valores promedio establecidos por el Zhong et al. (2020) y Yao et al. (2022), corroborados por Duan et al. (2023) establecen un contenido de proteínas entre 35 y 45 % y lípidos entre 6 y 10 %.

Los ácidos grasos, en particular DHA, EPA y ARA desempeñan un papel esencial en la formación de membranas celulares y la regulación endocrina del crecimiento (Afonso López et al., 2023). Su deficiencia se asocia con hepatopáncreas degenerativos, retraso en la muda y menor supervivencia. De ahí que la *Artemia sp.* enriquecida con emulsiones marinas o microalgales sea considerada el vector ideal para suministrar estos compuestos (Felix et al., 2021).

Tabla 3

*Requerimientos nutricionales estimados para postlarvas de Penaeus vannamei*

Nutriente principal	Rango	Función metabólica predominante
	recomendado (% del peso seco)	
Proteína bruta	35–45	Síntesis estructural y enzimática
Lípidos totales	6–10	Energía y transporte de vitaminas liposolubles
HUFA (DHA, EPA, ARA)	2–3	Integridad de membranas y desarrollo larval
Carbohidratos	15–25	Fuente energética inmediata y formación de quitina

Nutriente principal	Rango recomendado (% del peso seco)	Función metabólica predominante
Minerales traza (Zn, Fe, Mn)	< 1	Cofactores enzimáticos y regulación osmótica

*Nota. Elaboración propia con base en Zhong et al (2020), Duan et al. (2023), Afonso López et al. (2023) y Ramena et al. (2025).*

El equilibrio entre macronutrientes y micronutrientes determina la eficiencia metabólica y la resistencia al estrés ambiental. Investigaciones de Manan et al. (2020) demostraron que la incorporación de biofloc y bacterias probióticas como *Bacillus subtilis* mejora la biodisponibilidad de lípidos y aumenta la supervivencia postlarval. Asimismo, Bermudes-Lizárraga et al. (2023) indicaron que dietas mixtas basadas en artemia y alimento balanceado reducen el coeficiente de variación del peso en un 12 %, reflejando una mayor uniformidad del lote.

Por lo tanto, la formulación dietética debe considerar la interacción sinérgica entre ácidos grasos, proteínas y carbohidratos; un exceso o deficiencia de cualquiera de ellos altera el metabolismo energético y compromete la productividad del cultivo. De esta manera, el estudio de los requerimientos nutricionales de *P. vannamei* en sus etapas larvales constituye la base científica para optimizar la sostenibilidad técnica y económica de la camaronicultura ecuatoriana.

#### Fisiología metabólica y regulación energética

El metabolismo de *Penaeus vannamei* depende de un equilibrio dinámico entre los procesos catabólicos y anabólicos; su eficiencia energética se asocia directamente con la composición bioquímica del alimento y las condiciones fisicoquímicas del agua. En organismos larvales, el consumo de oxígeno y la tasa metabólica basal aumentan proporcionalmente al crecimiento; valores cercanos a 0,12 mg O<sub>2</sub>/mg h son comunes en condiciones de laboratorio (Bermudes-Lizárraga et al., 2023).

El metabolismo energético se estructura en tres rutas principales: la oxidación de carbohidratos, la  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos y la desaminación de aminoácidos. En las primeras fases del desarrollo, predomina el metabolismo lipídico, ya que los HUFA son una

fuerza concentrada de energía y un componente estructural indispensable para las membranas celulares (Xu et al., 2022). La carencia de estos compuestos provoca una disminución en la producción de ATP y un debilitamiento de la respuesta inmunológica.

Los estudios de Duan et al. (2023) evidencian que la relación adecuada DHA/EPA (2:1) optimiza la respiración celular y favorece la actividad mitocondrial. Además, el metabolismo oxidativo se ve reforzado por la presencia de antioxidantes naturales, como carotenoides o tocoferoles, que limitan la peroxidación lipídica (Ramena et al., 2025). La interacción entre energía y antioxidantes es determinante para la supervivencia larval bajo estrés térmico o hipoxia.

Tabla 4

*Vías metabólicas principales en Penaeus vannamei y su relevancia fisiológica*

Ruta metabólica	Sustrato principal	Producto energético o fisiológico	Importancia biológica
Glucólisis	Glucosa y glucógeno	ATP	Fuente inmediata de energía celular
$\beta$ -Oxidación	Ácidos grasos (DHA, EPA)	Acetil-CoA y NADH	Producción energética sostenida
Desaminación	Aminoácidos libres	Amonio y cetoácidos	Regulación del balance proteico
Ciclo de Krebs	Acetil-CoA	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, ATP	Integración metabólica total

*Nota. Elaboración propia con base en Xu et al. (2022), Duan et al. (2023) y Ramena et al. (2025).*

El uso eficiente de la energía también está mediado por el hepatopáncreas; este órgano regula la conversión de lípidos y carbohidratos en glucógeno, lo que asegura un suministro constante durante la muda. Investigaciones recientes demostraron que las postlarvas con dietas enriquecidas en HUFA presentan reservas energéticas un 35% mayores, lo que mejora la resistencia a la inanición (Afonso López et al., 2023).

Por consiguiente, la fisiología metabólica de *P. vannamei* revela una interdependencia estrecha entre nutrición, regulación enzimática y mecanismos de defensa oxidativa; dicha relación se convierte en un indicador clave de bienestar larval.

#### Factores ambientales que influyen en el desarrollo larval

El crecimiento y supervivencia de *P. vannamei* dependen tanto de la dieta como de las condiciones ambientales del sistema de cultivo. Entre las variables más influyentes se encuentran la temperatura, la salinidad, el oxígeno disuelto, el pH y la calidad del agua.

La temperatura modula directamente el metabolismo; un incremento de 2°C puede duplicar la tasa metabólica y reducir el tiempo de metamorfosis (Bermudes-Lizárraga et al., 2017). Sin embargo, variaciones abruptas generan estrés fisiológico y aumentan la producción de radicales libres. Por otro lado, el pH del agua entre 7,8 y 8,2 permite la máxima eficiencia enzimática y previene la toxicidad por amonio (Cobo et al., 2015).

Tabla 5

#### *Rangos ambientales recomendados para el cultivo larval de Penaeus vannamei*

Parámetro	Rango óptimo	Efecto sobre la fisiología larval
Temperatura	28–31 °C	Regula metabolismo y muda
Salinidad	25–35 ‰	Equilibrio osmótico y absorción iónica
pH	7,8–8,2	Actividad enzimática y homeostasis
Oxígeno disuelto	> 5 mg/L	Previene hipoxia y necrosis tisular

*Nota. Elaboración propia con base en Bermudes-Lizárraga et al. (2017), Cobo et al. (2015) y Chen et al. (2023).*

El desequilibrio de cualquiera de estas variables puede afectar la permeabilidad de la membrana celular y alterar los procesos de osmorregulación. Por ejemplo, la exposición a

bajos niveles de oxígeno disuelto provoca la acumulación de lactato y reduce la capacidad de transporte de iones, afectando la digestión y la absorción de nutrientes (Duan et al., 2023).

Asimismo, la interacción entre temperatura y salinidad influye en la eficiencia alimenticia; condiciones inestables pueden reducir la tasa de conversión de alimento (FCR) hasta en un 20%. Los sistemas biofloc y recirculación acuícola (RAS) han sido implementados como estrategias de control ambiental, al permitir la estabilización de parámetros fisicoquímicos y la reducción del uso de antibióticos (Viera-Romero, 2024).

Por lo tanto, la comprensión del ambiente larvario no solo asegura el bienestar fisiológico, sino que determina el éxito productivo y económico del cultivo.

### Interacciones entre nutrición y bioseguridad larval

La relación entre nutrición y bioseguridad constituye uno de los pilares del éxito en los laboratorios de producción larvaria de *P. vannamei*; un alimento balanceado no solo promueve el crecimiento, sino que fortalece el sistema inmunológico y reduce la incidencia de enfermedades bacterianas y virales. Según Xie et al. (2021), el uso de artemia enriquecida con microorganismos halófilos del género *Halorubrum* mejora la tolerancia al estrés y estimula la respuesta antioxidante en las larvas.

La bioseguridad larval implica mantener una microbiota intestinal equilibrada; el intestino de *P. vannamei* alberga comunidades bacterianas asociadas a la digestión y la defensa inmunitaria. La inclusión de probióticos como *Bacillus subtilis* y *Lactobacillus plantarum* en la dieta favorece la colonización de bacterias beneficiosas y reduce la proliferación de *Vibrio spp.* (Won et al., 2020; Kewcharoen y Srisapoome, 2019; Tseng et al., 2023).

Tabla 6

#### *Estrategias nutricionales y su efecto en la bioseguridad de Penaeus vannamei*

Estrategia aplicada	Mecanismo de acción	Efecto observado en larvas
Artemia enriquecida con <i>Halorubrum</i>	Inducción de antioxidantes	Mayor resistencia al estrés osmótico

Estrategia aplicada	Mecanismo de acción	Efecto observado en larvas
Probióticos ( <i>Bacillus</i> , <i>Lactobacillus</i> )	Competencia por sustrato y exclusión de patógenos	Reducción de infecciones por <i>Vibrio</i>
Prebióticos (inulina, $\beta$ -glucanos)	Estimulación de la flora intestinal benéfica	Incremento en supervivencia y uniformidad
Antioxidantes naturales (astaxantina)	Neutralización de radicales libres	Mejora de la coloración y salud hepatopancreática

*Nota. Elaboración propia con base en Xie et al. (2021), Won et al. (2020), Kewcharoen y Srisapoom (2019) Tseng et al. (2023), Samat et al. (2020) y Felix et al. (2021).*

Además, la fortificación de artemia con lípidos y prebióticos genera un efecto inmunoestimulante; Joshua et al. (2022) encontraron que las postlarvas alimentadas con artemia enriquecida mostraron un aumento del 40% en la producción de hemocitos y una mayor resistencia frente a infecciones bacterianas. Esta relación entre nutrición e inmunidad reafirma que los programas de bioseguridad deben estar integrados al manejo dietético.

En los laboratorios ecuatorianos, la adopción de protocolos de bioseguridad basados en alimentación enriquecida ha reducido la mortalidad por *Vibrio harveyi* y *White Spot Syndrome Virus (WSSV)*, promoviendo la sostenibilidad del sistema de producción (Samae & Estévez, 2025). De este modo, la interacción entre nutrición, microbiota y ambiente representa la base de un modelo larvario más resiliente, sostenible y competitivo.

### *Artemia sp.* como alimento vivo en acuicultura moderna

#### Características biológicas y ecológicas

La *Artemia sp.* pertenece al grupo de los crustáceos anostráceos; organismos de pequeño tamaño que habitan en lagunas salobres y ambientes hipersalinos donde pocas especies sobreviven. Su estructura anatómica se caracteriza por un cuerpo segmentado, un par de ojos compuestos y apéndices torácicos filtradores que le permiten capturar partículas microscópicas suspendidas en el agua (Lavens y Sorgeloos, 1986). Este plan corporal, aunque sencillo, le otorga una capacidad de adaptación ecológica notable; tolera salinidades superiores

a 200‰ y temperaturas cercanas a 40 °C, lo que explica su uso en sistemas de cultivo bajo distintas condiciones ambientales (Van Stappen, 2002).

En el ecosistema natural, la artemia desempeña una función reguladora al transformar materia orgánica disuelta en biomasa que sirve de alimento para peces, crustáceos y aves acuáticas. A diferencia de otros organismos planctónicos, sus quistes presentan una extraordinaria resistencia; pueden permanecer viables durante años en estado de criptobiosis y eclosionar cuando las condiciones son favorables (Van Stappen, 2002; Lavens y Sorgeloos, 1986).

El estudio de Samat et al. (2020) describe la fisiología de su reproducción; los huevos pueden desarrollarse como quistes o como embriones activos, dependiendo del ambiente. Este fenómeno, denominado ovoviviparidad facultativa, es una estrategia evolutiva que asegura la persistencia de la especie en hábitats variables.

Tabla 7

*Características ecológicas y fisiológicas de Artemia sp. relevantes en acuicultura*

Parámetro	Descripción general
Salinidad óptima	80–150 ‰
Tolerancia térmica	15–40 °C
Tipo de reproducción	Ovoviviparidad facultativa
Tamaño nauplio recién eclosionado	420–480 µm
Tasa de eclosión promedio	80–90 % en condiciones controladas

*Nota. Elaboración propia con base en Lavens y Sorgeloos (1986), Van Stappen (2002), Samat et al. (2020)*

Desde una perspectiva ecológica, la artemia constituye un bioindicador de estabilidad ambiental; su presencia en lagunas hipersalinas refleja condiciones de alta salinidad y baja competencia biológica. Gracias a su tolerancia extrema y a la capacidad de producir quistes resistentes, se ha convertido en un recurso esencial en acuicultura. En los últimos años, los centros de producción larvaria han implementado sistemas de cultivo semicontrolado de

*Artemia franciscana* para garantizar el suministro constante de alimento vivo (Van Stappen, 2002; Lavens y Sorgeloos, 1986).

La caracterización biológica de este organismo permite entender por qué se ha convertido en un componente esencial de la acuicultura moderna; su fisiología adaptable, su alta densidad energética y su capacidad de bioencapsular nutrientes lo transforman en un vector nutricional eficiente.

#### Valor nutritivo y composición bioquímica

La composición bioquímica de la *Artemia sp.* ha sido ampliamente estudiada debido a su uso en la alimentación larval. En promedio, los nauplios recién eclosionados contienen entre 55 y 65% de proteínas, 12 a 18% de lípidos y 15 a 20% de carbohidratos sobre peso seco (Joshua et al., 2022). Este perfil, aunque balanceado, no siempre satisface los requerimientos de ácidos grasos altamente insaturados (HUFA) que necesitan las larvas de crustáceos.

En consecuencia, se han desarrollado técnicas de enriquecimiento nutricional que modifican su composición interna antes de ser suministradas como alimento. Entre los compuestos más utilizados se encuentran los aceites marinos ricos en DHA y EPA, las microalgas como *Isochrysis galbana* y *Nannochloropsis oculata*, y las emulsiones comerciales a base de lecitina de soya (Felix et al., 2021).

Los nutrientes de la artemia presentan una alta biodisponibilidad; su digestión en el tracto de los crustáceos es rápida debido a la presencia de una cutícula delgada que se disuelve con facilidad. Además, la alta relación entre lípidos y proteínas facilita la conversión alimenticia en larvas de *P. vannamei*, optimizando el crecimiento y la supervivencia (Afonso López et al., 2023).

A continuación se presenta una comparación bioquímica entre la *Artemia sp.* sin enriquecer y enriquecida con ácidos grasos:

Tabla 8

*Composición promedio de Artemia sp. (peso seco) antes y después del enriquecimiento*

Componente	Sin enriquecimiento (%)	Enriquecida (%)
Proteínas	58,3	60,2
Lípidos totales	14,8	21,4
DHA (22:6n-3)	0,25	2,85
EPA (20:5n-3)	0,42	1,95
Carbohidratos	18,0	14,6

*Nota. Elaboración propia con base en Joshua et al. (2022), Felix et al. (2021), Raju et al. (2021), Duan et al. (2023) y Afonso López et al. (2023).*

Además del perfil proteico y lipídico, la artemia aporta pigmentos como la astaxantina y la cantaxantina, que actúan como antioxidantes naturales; estos compuestos protegen los tejidos larvales de la oxidación y contribuyen a la coloración característica de los crustáceos. Su digestibilidad supera el 90% bajo condiciones óptimas de temperatura y salinidad (Ramena et al., 2025).

Los análisis proximales revelan que la eficiencia nutricional de la artemia depende de factores como la cepa genética, el ambiente de cultivo y el alimento que recibe antes del proceso de cosecha. Por ello, los productores suelen establecer lotes controlados de *Artemia sp.* para estandarizar su calidad nutricional y evitar fluctuaciones en el rendimiento larval.

Entre los principales nutrientes bioactivos presentes en la artemia se destacan:

- Ácidos grasos poliinsaturados (DHA, EPA, ARA) → indispensables para la integridad celular.

- Aminoácidos esenciales (lisina, metionina, leucina) → participan en la síntesis muscular.
- Carotenoides y tocoferoles → modulan la respuesta antioxidante.
- Colina y lecitina natural → favorecen la emulsificación de lípidos.

Este perfil explica su amplio uso en laboratorios de *P. vannamei* donde se requiere un alimento funcional, fácilmente digerible y capaz de adaptarse a los procesos de bioencapsulación.

#### Importancia en la alimentación de crustáceos marinos

La relevancia de la *Artemia sp.* en la alimentación de crustáceos radica en su versatilidad fisiológica y nutricional; actúa como vector biológico de lípidos esenciales, probióticos y pigmentos naturales que mejoran la salud y el desempeño larval. En la larvicultura de *P. vannamei*, su uso no se limita a proveer energía, sino que contribuye a la maduración del sistema digestivo y a la colonización microbiana benéfica (Ordóñez-Mejía et al., 2021).

Las larvas alimentadas con artemia enriquecida presentan tasas de supervivencia hasta 30% superiores a aquellas alimentadas con dietas artificiales; además, muestran un hepatopáncreas con mayor número de túbulos funcionales, indicador de un metabolismo activo (Afonso López et al., 2023).

Tabla 9

#### *Beneficios de la Artemia sp. en la alimentación larval de crustáceos marinos*

Beneficio observado	Mecanismo asociado
Mayor supervivencia postlarval	Aporte equilibrado de HUFA y aminoácidos
Mejora del desarrollo hepatopancreático	Estimulación de enzimas digestivas
Incremento del crecimiento (SGR)	Alta digestibilidad y biodisponibilidad lipídica
Fortalecimiento inmunológico	Presencia de carotenoides y lecitina

Beneficio observado	Mecanismo asociado
Reducción de deformidades morfológicas	Equilibrio entre DHA y EPA

*Nota. Elaboración propia con base en Raju et al. (2021), Afonso López et al. (2023), Joshua et al. (2022), Felix et al. (2021) y Duan et al. (2023).*

En la práctica, el suministro de artemia permite mantener un comportamiento activo de las larvas; su movimiento estimula la captura y mejora el apetito. Este factor, aunque biológico, tiene una repercusión directa sobre la uniformidad de crecimiento y la reducción de la competencia intraespecífica (Samat et al., 2020).

El impacto positivo de este alimento también se relaciona con su función de vehículo en la administración de compuestos bioactivos; mediante procesos de bioencapsulación, es posible incorporar vitaminas liposolubles, antibióticos naturales, probióticos y pigmentos sin alterar la estructura del nauplio. Dicho mecanismo ha sido utilizado en laboratorios ecuatorianos y asiáticos con resultados consistentes en el fortalecimiento inmunológico (Ramena et al., 2025).

Desde la perspectiva de manejo, la *Artemia sp.* representa un recurso estratégico; su disponibilidad comercial, su fácil almacenamiento y su rápida rehidratación la convierten en un alimento adaptable a sistemas intensivos y semiintensivos. No obstante, su costo en el mercado internacional ha impulsado la búsqueda de alternativas parciales como rotíferos, copépodos o microdietas formuladas, aunque ninguna ha igualado su desempeño nutricional (Rasdi et.al., 2018).

La artemia, por tanto, continúa siendo un elemento estructurador de la bioseguridad alimentaria en los laboratorios de larvicultura; su equilibrio bioquímico, su interacción con el metabolismo larval y su versatilidad tecnológica le confieren un lugar insustituible en la cadena de producción de *P. vannamei*.

#### Interacción ecológica y comportamiento alimenticio de *Artemia sp.*

La *Artemia sp.* mantiene una relación ecológica peculiar con su entorno; vive en lagunas salinas donde los gradientes químicos determinan su distribución. Su comportamiento alimenticio se basa en la filtración continua de partículas microscópicas; cada individuo puede

filtrar entre 8 y 15 mL de agua por hora dependiendo de la densidad celular del fitoplancton (Van Stappen, 2002). En esos ambientes, los organismos se agrupan en cardúmenes flotantes que maximizan el contacto con las zonas de mayor concentración algal; esta conducta colectiva se considera una estrategia para optimizar la ingesta energética en ecosistemas con recursos variables.

El sistema bucal de la artemia está compuesto por apéndices torácicos en forma de láminas ciliadas; estos generan corrientes que arrastran las partículas hacia la cavidad bucal. Su dieta natural está formada por diatomeas, cianobacterias y detritos orgánicos; sin embargo, en sistemas de cultivo consume suspensiones artificiales de microalgas o levaduras. La eficiencia de ingestión varía según la forma y el tamaño de las partículas; los estudios de Cisneros y Vinatea (2009) determinaron que las partículas entre 5 y 20  $\mu\text{m}$  son las más adecuadas para la alimentación de nauplios.

El ritmo de alimentación también depende de la luminosidad; bajo condiciones de oscuridad, los nauplios reducen su actividad filtradora, lo cual influye en la tasa de bioencapsulación cuando se busca enriquecerlos con emulsiones lipídicas. En cambio, una iluminación moderada estimula la motilidad y favorece el consumo activo de nutrientes.

Desde una visión ecológica aplicada, este comportamiento explica la facilidad con que la artemia puede absorber compuestos solubles y transformarse en un vector nutricional; de hecho, la especie muestra una capacidad de adaptación notable frente a variaciones de oxígeno y temperatura, lo cual reduce las pérdidas en hatcheries donde las condiciones suelen fluctuar.

La comprensión de su comportamiento alimenticio ha permitido diseñar sistemas de enriquecimiento más eficientes, basados en la sincronización de luz, oxígeno y concentración de emulsiones; en consecuencia, su fisiología filtradora se convierte en una ventaja operativa para la producción de postlarvas de *Penaeus vannamei* bajo control técnico.

### Ciclo de vida y morfología aplicada a la nutrición larval

El ciclo de vida de *Artemia sp.* está compuesto por tres fases principales: quiste, nauplio y adulto. Cada etapa presenta estructuras anatómicas adaptadas a su función ecológica y a las demandas energéticas de su entorno. Los quistes, de forma esférica y recubiertos por una capa de quitina altamente resistente, constituyen una reserva biológica; pueden permanecer latentes

durante años hasta que las condiciones ambientales propicien su eclosión. Esta característica ha sido aprovechada comercialmente; permite almacenar y transportar el material genético en condiciones secas sin pérdida de viabilidad (Curto, 2006).

Una vez activados, los quistes liberan nauplios de color anaranjado translúcido; su tamaño oscila entre 420 y 480  $\mu\text{m}$ , con un cuerpo dividido en tres segmentos: cefálico, torácico y abdominal. En esta fase inicial, la digestión es limitada, pero la permeabilidad de su cutícula facilita la absorción de emulsiones y microalgas. Es precisamente en esta etapa donde se realiza el enriquecimiento nutricional, pues los nauplios presentan una alta tasa de ingestión y un metabolismo activo (Joshua et al., 2022).

A medida que la artemia alcanza la madurez, desarrolla estructuras reproductivas y un sistema circulatorio abierto que permite distribuir los nutrientes con rapidez. El crecimiento depende del contenido proteico del alimento y de la temperatura; Islam et al. (2019) comprobaron que a 30 °C la madurez se alcanza en 8 días, mientras que a 20 °C el proceso se prolonga hasta 15.

La morfología de este organismo, más allá de su interés biológico, tiene implicaciones directas en la nutrición de los crustáceos; el tamaño del nauplio coincide con la apertura bucal de las larvas de *P. vannamei*, lo que garantiza una captura eficiente sin desperdicio. Además, la composición de su exoesqueleto, rico en quitina y carotenoides, estimula la formación de pigmentos y fortalece la estructura celular de las postlarvas.

El estudio del ciclo y la morfología de artemia no se limita a la taxonomía; se traduce en aplicaciones prácticas para mejorar la sincronización entre la eclosión, el enriquecimiento y el suministro en los laboratorios de larvicultura, donde cada hora de diferencia puede modificar el valor nutricional del lote.

### Impacto del origen geográfico y cepas en la calidad nutricional

No todas las cepas de *Artemia sp.* presentan el mismo valor nutricional; la composición bioquímica varía según el origen geográfico, la salinidad del hábitat y el tipo de microflora asociada. La composición lipídica de *Artemia* puede variar según la población, el historial genético y las condiciones de cultivo, lo que influye en su valor nutricional como alimento vivo (Van Stappen, 2002; Sorgeloos et al., 1986).

Estas diferencias se atribuyen a las condiciones del medio; las lagunas hipersalinas de Sudamérica presentan un espectro microbiano distinto, donde predominan algas diatomeas ricas en ácido araquidónico (ARA), mientras que los ambientes tropicales albergan microalgas con mayor contenido de EPA. Por ello, el origen geográfico influye en la relación de HUFA que cada lote puede aportar al alimento larval (Raju et al., 2021).

Entre las cepas más utilizadas se destacan:

- Cepa de San Francisco Bay (EE.UU.): alta tasa de eclosión, buena digestibilidad, pero bajo contenido de HUFA.
- Cepa de Great Salt Lake (EE.UU.): balance intermedio de proteínas y lípidos; preferida para hatcheries comerciales.
- Cepa de Virila (Perú): mayor contenido de ácidos grasos de cadena larga; buena resistencia osmótica.
- Cepa de Yucatán (México): excelente digestibilidad; recomendada para larvicultura de camarones tropicales.

Las investigaciones de Ramena et al. (2025) y Felix et al. (2021) advierten que las variaciones bioquímicas pueden alcanzar diferencias de hasta un 30% en el contenido de lípidos entre cepas. Esta variabilidad ha impulsado la estandarización de cultivos locales para reducir la dependencia de importaciones.

En Ecuador, por ejemplo, se han identificado poblaciones adaptadas a las salinas de Santa Elena, con potencial de producción comercial; sus quistes presentan una tasa de eclosión del 85% y un perfil de HUFA más estable que las cepas importadas. Este avance fortalece la soberanía biotecnológica del país y promueve el uso sostenible de recursos autóctonos en acuicultura.

Aportes ecológicos y sostenibilidad en la producción de *Artemia sp.*

El uso de *Artemia sp.* en acuicultura no solo tiene fines nutricionales; también ofrece beneficios ecológicos al integrarse en modelos de producción sostenible. Los sistemas de cultivo basados en lagunas salinas o estanques artificiales contribuyen a la recuperación de zonas costeras marginales, generando microhábitats que albergan aves migratorias y microorganismos acuáticos. Viera-Romero (2024) destacan que los estanques de artemia

pueden funcionar como biofiltros naturales al reducir la carga de materia orgánica en el agua y mejorar su transparencia.

Además, el aprovechamiento de artemia se relaciona con la economía circular; los residuos de biomasa y exoesqueletos se emplean para la obtención de quitina, quitina-oligosacáridos y pigmentos carotenoides, productos que poseen valor comercial en la industria farmacéutica y cosmética. Este aprovechamiento integral disminuye el desperdicio y aumenta la rentabilidad del sistema productivo.

La sostenibilidad también involucra la reducción de la huella hídrica; los cultivos modernos aplican tecnologías de recirculación (RAS) y biofloc para reutilizar el agua y minimizar vertimientos. En países latinoamericanos se han desarrollado proyectos comunitarios donde las salinas se utilizan de forma mixta, combinando producción de artemia, microalgas y sal marina; esta integración crea cadenas de valor locales que fortalecen las economías costeras.

La eclosión de quistes de artemia es altamente dependiente de la calidad del agua; variaciones en parámetros como el pH, oxigenación, temperatura y presencia de compuestos nitrogenados pueden afectar la viabilidad y el porcentaje de eclosión. Por ello, es utilizada como organismo indicador en sistemas de producción acuícola, dadas sus respuestas fisiológicas frente a cambios ambientales durante el proceso de incubación (Van Stappen, 2002).

Ácidos grasos: estructura, función y metabolismo

#### *Estructura molecular y clasificación de los HUFA*

Los ácidos grasos, constituyen una categoría de lípidos esenciales que participan en la estructura y funcionalidad de las membranas biológicas. Su principal característica radica en la presencia de más de tres dobles enlaces en su cadena hidrocarbonada, lo que les otorga una flexibilidad estructural única y una alta reactividad frente a procesos oxidativos. En acuicultura, los HUFA de mayor interés son el ácido eicosapentaenoico (EPA; 20:5n-3), el ácido docosahexaenoico (DHA; 22:6n-3) y el ácido araquidónico (ARA; 20:4n-6), todos indispensables para el desarrollo larval de crustáceos y peces (Martínez-Soler et al., 2023).

A diferencia de los ácidos grasos saturados, cuya cadena es recta y estable, los HUFA presentan una configuración cis en sus dobles enlaces; esto produce curvaturas que modifican

la fluidez de las membranas celulares. Dicha propiedad influye directamente en la permeabilidad y en la actividad enzimática asociada al transporte de iones y nutrientes.

Los HUFA se agrupan en dos familias principales: omega-3 (n-3) y omega-6 (n-6); la diferencia radica en la posición del primer doble enlace respecto al extremo metilo de la molécula. Esta clasificación resulta esencial, ya que define su función metabólica y su interacción en el organismo.

Tabla 10 *Clasificación general de los HUFA en acuicultura*

Familia	Ejemplo principal	Estructura química	Función predominante
Omega-3 (n-3)	DHA (22:6n-3), EPA (20:5n-3)	Poliinsaturada con seis y cinco dobles enlaces respectivamente	Desarrollo neuromuscular, modulación de la respuesta inmune
Omega-6 (n-6)	ARA (20:4n-6)	Cuatro dobles enlaces	Regulación de prostaglandinas y metabolismo energético

*Nota. Elaboración propia con base en Martínez-Soler et al. (2023).*

En el medio acuático, la síntesis endógena de HUFA es limitada; las larvas de *Penaeus vannamei*, al igual que otros crustáceos, carecen de las enzimas  $\Delta 5$  y  $\Delta 6$  desaturasas necesarias para transformar precursores como el ácido linolénico (18:3n-3) en DHA o EPA (Raju et al., 2021). Por ello, su suministro exógeno a través de alimentos vivos o emulsiones enriquecidas se vuelve imprescindible durante las primeras fases de crecimiento.

#### Funciones fisiológicas en crustáceos marinos

Los ácidos grasos desempeñan funciones múltiples que se extienden más allá del soporte estructural de las membranas; intervienen en la regulación hormonal, en la síntesis de eicosanoides y en la modulación de la respuesta inflamatoria. En organismos acuáticos, estos compuestos determinan la integridad de tejidos sensibles como el hepatopáncreas y el sistema nervioso, además de influir en la reproducción y en la supervivencia larval.

El DHA, por ejemplo, es un componente estructural del retículo endoplásmico y de las membranas neuronales; su deficiencia provoca alteraciones en la transmisión sináptica y en la

capacidad motora de las larvas (Felix et al., 2021). El EPA, por su parte, actúa como precursor de prostaglandinas de la serie 3, compuestos que regulan procesos inmunitarios y mantienen el equilibrio osmótico. En cambio, el ARA genera prostaglandinas de la serie 2, asociadas con la cicatrización y el crecimiento celular.

Entre las principales funciones fisiológicas de los HUFA en crustáceos se destacan:

- Estabilización de membranas celulares: mantienen la flexibilidad y reducen la permeabilidad excesiva.
- Modulación inmunológica: estimulan la producción de leucocitos y fagocitos en respuesta a patógenos.
- Desarrollo de tejidos nerviosos: mejoran la respuesta motora y la coordinación larval.
- Regulación del metabolismo energético: facilitan la oxidación lipídica y el almacenamiento de energía.

La evidencia experimental muestra que una proporción adecuada entre DHA y EPA (generalmente 2:1) resulta determinante para lograr un crecimiento equilibrado. Cuando esta relación se altera, el organismo presenta deformidades estructurales y una reducción en la resistencia al estrés ambiental (Joshua et al., 2022).

El balance entre omega-3 y omega-6 también condiciona la respuesta inmunitaria; un exceso de ARA puede generar inflamación crónica, mientras que un predominio de DHA promueve respuestas antiinflamatorias moderadas. Por ello, el control de las proporciones lipídicas en los alimentos vivos se considera una herramienta estratégica en el manejo de la larvicultura intensiva.

#### Metabolismo y absorción de los ácidos grasos en *Penaeus vannamei*

El metabolismo lipídico en *P. vannamei* involucra procesos de digestión, transporte, almacenamiento y oxidación; los ácidos grasos son absorbidos en el intestino medio a través de micelas formadas por sales biliares y fosfolípidos. En esta etapa, las enzimas lipasas escinden los triglicéridos para liberar ácidos grasos libres que posteriormente se reesterifican y almacenan como fosfolípidos o triglicéridos complejos.

La absorción depende de factores como la temperatura, la salinidad y la composición de la dieta. A temperaturas cercanas a 30 °C, la eficiencia digestiva aumenta, mientras que una salinidad inadecuada puede reducir la emulsificación lipídica. El hepatopáncreas actúa como órgano central del metabolismo; allí se concentran los ácidos grasos para su redistribución hacia tejidos periféricos.

Un aspecto interesante radica en la competencia metabólica entre los HUFA; el EPA y el ARA utilizan las mismas rutas enzimáticas, lo que genera una relación antagónica entre ambos. Un exceso de EPA puede inhibir la conversión del ARA en prostaglandinas, afectando la regulación celular (Duan et al., 2023). De ahí que el equilibrio entre ambos compuestos sea indispensable para mantener la homeostasis fisiológica.

El metabolismo de los HUFA también involucra procesos de oxidación en las mitocondrias, donde sirven como fuente energética durante períodos de ayuno o estrés. Sin embargo, la oxidación excesiva puede generar peróxidos lipídicos que alteran la integridad celular; por ello, se recomienda suplementar las dietas con antioxidantes naturales como la vitamina E o la astaxantina, los cuales reducen la peroxidación y mejoran la estabilidad de los ácidos grasos (Ramena et al., 2025).

Diversos estudios muestran que la alimentación con *Artemia* sp. enriquecida con ácidos grasos esenciales puede modificar el perfil lipídico de los tejidos en *P. vannamei*, incrementando la proporción de DHA y otros lípidos críticos, lo que suele asociarse con mejor vigor larval y mayor tolerancia al estrés (Martínez-Soler et al., 2023; Zhong et al., 2020).

#### Fuentes naturales y biotecnológicas de ácidos grasos

La obtención de ácidos grasos en la acuicultura moderna proviene de fuentes naturales y biotecnológicas; entre las primeras destacan los aceites de pescado, las microalgas marinas y algunos hongos oleaginosos. Los aceites de sardina, arenque y caballa contienen altos niveles de DHA y EPA, aunque su uso excesivo genera preocupación ambiental por la sobreexplotación de recursos marinos (Felix et al., 2021).

En este sentido, la biotecnología ha permitido desarrollar alternativas sostenibles basadas en microalgas cultivadas bajo condiciones controladas. *Schizochytrium* sp., *Cryptocodinium cohnii* y *Nannochloropsis oculata* son fuentes ricas en DHA y EPA; su cultivo en biorreactores garantiza una composición estable y libre de contaminantes.

Entre las principales fuentes biotecnológicas actuales se incluyen:

- Microalgas heterotróficas: producen altos niveles de DHA sin requerir luz solar.
- Hongos marinos (Thraustochytrids): generan aceites con una relación DHA/EPA equilibrada.
- Bacterias fototróficas: sintetizan HUFA a partir de precursores orgánicos simples.

La utilización de estas fuentes ofrece ventajas ambientales; reduce la huella ecológica y asegura trazabilidad. En Ecuador, algunas empresas acuícolas han comenzado a incorporar microalgas locales como fuente de lípidos esenciales, lo que abre un espacio de innovación en la cadena de valor del camarón.

El desarrollo de bioprocesos con CO<sub>2</sub> reutilizado para el cultivo de microalgas representa un avance notable; esta tecnología, además de capturar carbono, produce biomasa rica en HUFA y proteínas, generando una doble contribución: nutricional y ambiental.

#### Efectos de la deficiencia y del exceso de ácidos grasos

La deficiencia de ácidos grasos en la dieta larval se manifiesta en alteraciones fisiológicas que comprometen la supervivencia. Las larvas presentan menor movilidad, hepatopáncreas degenerado y reducción de las reservas energéticas. En fases posteriores, se observa una pérdida de pigmentación y deformación de apéndices natatorios (Raju et al., 2021).

El déficit de DHA y EPA impide la correcta formación de las membranas celulares; la consecuencia inmediata es una permeabilidad excesiva que provoca fugas iónicas y estrés osmótico. Además, la carencia de ARA afecta la síntesis de eicosanoides, lo cual interfiere con los procesos de reparación tisular y con la capacidad de respuesta inmune.

Por el contrario, un exceso puede incrementar la oxidación lipídica; esto se traduce en acumulación de radicales libres y daño celular. Para evitarlo, las formulaciones modernas incorporan antioxidantes naturales o sintéticos que mantienen la estabilidad del alimento durante el almacenamiento.

Las investigaciones de Joshua et al. (2022) y Martínez-Soler et al. (2023) coinciden en que los niveles óptimos de HUFA para postlarvas de *P. vannamei* deben oscilar entre 2 y 4% del peso seco de la dieta, con una proporción DHA/EPA cercana a 2:1 y una relación total omega-3/omega-6 mayor a 3.

El ajuste de estas proporciones requiere precisión técnica; pequeñas variaciones pueden modificar la respuesta fisiológica. Por eso, el enriquecimiento de *Artemia sp.* con emulsiones calibradas se considera una práctica necesaria para garantizar una nutrición equilibrada y estable.

Estrategias y métodos de enriquecimiento lipídico en *Artemia sp.*

### *Conceptualización del enriquecimiento lipídico*

El enriquecimiento lipídico en *Artemia sp.* consiste en un proceso biotecnológico mediante el cual los nauplios o metanauplios incorporan nutrientes de alta calidad — principalmente ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga— durante un período controlado de inmersión o alimentación; el objetivo es aumentar el contenido de HUFA (EPA, DHA, ARA) y micronutrientes en su biomasa antes de ser ofrecidos como alimento vivo a las larvas de crustáceos y peces (Joshua et al., 2022).

A diferencia de la simple suplementación con aceites, el enriquecimiento se basa en la bioencapsulación, proceso que permite que el nauplio actúe como vector nutricional; es decir, incorpora los compuestos en su propio tejido, mejorando la biodisponibilidad de los nutrientes en el tracto digestivo del organismo que los consume (Raju et al., 2021). Este mecanismo resulta más eficiente, ya que los lípidos son protegidos de la oxidación y asimilados en forma natural por las larvas.

Las investigaciones de Félix et al. (2021) demostraron que el enriquecimiento con emulsiones marinas puede aumentar en más del 200% la concentración de DHA en *Artemia franciscana*; mientras que Ramena et al. (2025) describieron que el uso de extractos de microalgas del género *Schizochytrium sp.* eleva el contenido combinado de DHA y EPA, sin alterar la tasa de eclosión.

El proceso de enriquecimiento requiere controlar parámetros como salinidad, temperatura, oxigenación y densidad de nauplios para asegurar una adecuada incorporación de ácidos grasos. En la práctica acuícola, el tiempo óptimo de enriquecimiento se establece generalmente entre 12 y 24 horas, lo que permite una ingesta eficiente de lípidos sin afectar el comportamiento natatorio o la calidad del organismo vivo (Van Stappen, 2002; Sorgeloos et al., 1986).

El enriquecimiento se ha convertido en una práctica indispensable en la larvicultura moderna; no solo por sus beneficios nutricionales, sino porque mejora la supervivencia de las larvas en condiciones de estrés; fortalece su sistema inmunitario y acelera la metamorfosis hacia etapas más resistentes.

#### Tipología de agentes enriquecedores y composiciones utilizadas

Los agentes enriquecedores empleados en *Artemia sp.* se agrupan según su origen, composición y funcionalidad.

A continuación se resume su clasificación técnica :

Tabla 11

*Tipos de agentes enriquecedores aplicados en Artemia sp.*

Tipo de agente	Origen o fuente	Composición principal	Efecto esperado
Emulsiones comerciales	Productos industriales ( <i>Selco, Algamac 3050</i> )	Aceites marinos, fosfolípidos, vitaminas	Incremento rápido de DHA y EPA
Microalgas naturales	<i>Nannochloropsis, Isochrysis, Tetraselmis</i>	HUFA, carotenoides, antioxidantes	Mejora de pigmentación y resistencia al estrés
Extractos biotecnológicos	<i>Schizochytrium sp., Cryptocodinium cohnii</i>	DHA de origen microbiano	Sustitución de aceites de pescado
Mezclas sinérgicas	Combinación de emulsión y microalga	EPA, DHA y proteínas	Mejora global del crecimiento larval

*Nota. Elaboración propia con base en Martínez-Soler et al. (2023), Samat et al. (2020), Ramena et al. (2025) y Joshua et al. (2022).*

El uso de emulsiones puras proporciona resultados inmediatos, aunque su efectividad depende del tipo de lípido empleado; los aceites de pescado refinados tienden a oxidarse con facilidad, reduciendo la estabilidad del producto; por ello, varios autores recomiendan

complementarlos con antioxidantes naturales como tocoferoles o extractos de *Haematococcus pluviialis*, ricos en astaxantina (Felix et al., 2021).

Las microalgas naturales, además de ser fuentes de HUFA, aportan pigmentos como la luteína y la zeaxantina; estos compuestos protegen las membranas lipídicas del estrés oxidativo y aumentan la tolerancia térmica de las larvas (Rasdi et al., 2018).

Por otra parte, los extractos biotecnológicos presentan ventajas en términos de sostenibilidad; su producción no depende de pesquerías y puede realizarse en biorreactores cerrados; el aceite de *Schizochytrium sp.*, por ejemplo, contiene hasta 40% de DHA y 10% de EPA, superando a muchos aceites marinos tradicionales (Ramena et al., 2025).

### Factores determinantes en la eficiencia del enriquecimiento

El éxito del enriquecimiento de artemia depende de múltiples factores que interactúan entre sí; controlar cada variable asegura una mayor retención lipídica y una mejor calidad del alimento vivo.

Entre los factores determinantes más relevantes se encuentran:

- Duración del proceso; un tiempo de exposición entre 18 y 24 horas maximiza la absorción sin alterar la viabilidad del nauplio (Joshua et al., 2022).
- Concentración del medio; niveles de lípidos superiores a 0,5 % del volumen total pueden formar una capa superficial que reduce la oxigenación (Samat et al., 2020).
- Aireación continua; evita la sedimentación de las partículas y mantiene la emulsión homogénea (Félix et al., 2021).
- Edad del nauplio; las etapas tempranas, entre 12 y 18 horas post-eclosión, presentan la mayor capacidad de ingestión (Van Stappen, 2002; Sorgeloos et al., 1986).
- Temperatura y salinidad; rangos de  $28 \pm 2$  °C y 30–35 ppt favorecen la emulsificación y el metabolismo (Afonso López et al., 2023).

El siguiente cuadro resume cómo influyen estas variables:

Tabla 12  
*Factores operativos y su incidencia sobre el enriquecimiento de Artemia sp.*

Parámetro	Condición óptima	Efecto observado
Tiempo de enriquecimiento	18–24 horas	Mayor retención de HUFA
Aireación constante	2–3 L/min	Emulsión estable y homogénea
Densidad de nauplios	100–150 ind/mL	Mejora en la absorción y movilidad
Temperatura	28 ± 2 °C	Estimula la actividad enzimática

*Nota. Elaboración propia basada en Joshua et al. (2022), Samat et al. (2020), Félix et al. (2021) y Afonso López et al. (2023).*

El control de estas variables garantiza una mayor estabilidad de los HUFA dentro del nauplio; además, evita la oxidación de los lípidos y mejora la digestibilidad del alimento. En algunos casos, se ha experimentado con el uso de sistemas cerrados de aireación intermitente para reducir el gasto energético sin afectar la calidad del producto (Ramena et al., 2025).

#### Procesos de bioencapsulación y retención de ácidos grasos

La bioencapsulación constituye el núcleo del enriquecimiento efectivo; se refiere a la capacidad del nauplio para incorporar y retener compuestos lipídicos dentro de su cuerpo; la absorción ocurre a través del tracto digestivo o por difusión pasiva en la cutícula, dependiendo de la edad y del tipo de emulsión utilizada (Lizanda Piqueras, 2019).

Durante las primeras horas, los lípidos se acumulan en las vacuolas digestivas; posteriormente, son distribuidos hacia los tejidos musculares y la glándula digestiva. En este proceso intervienen enzimas como las lipasas y las aciltransferasas, responsables de la reesterificación de los ácidos grasos (Xie et al., 2021).

Los experimentos de Martínez-Soler et al. (2023) demostraron que la retención de HUFA en artemia puede alcanzar entre 45 y 55% de la concentración ofrecida en el medio, dependiendo del tipo de emulsión y del tiempo de exposición. En condiciones óptimas, los

nauplios logran mantener niveles estables durante más de 8 horas posteriores al proceso, lo que garantiza su valor nutricional al momento de ser consumidos por las larvas.

Para mejorar la eficiencia, se han desarrollado técnicas complementarias como el uso de liposomas multilamelares, que permiten encapsular los lípidos en estructuras fosfolipídicas estables; estos liposomas imitan la membrana celular y facilitan la absorción intracelular de HUFA (Monroig et al., 2003). Asimismo, se han incorporado emulsiones con nanopartículas naturales de lecitina y alginato que aumentan la adherencia a la superficie del nauplio y prolongan la estabilidad oxidativa (Singh et al., 2024).

El proceso de bioencapsulación no se limita a incorporar grasas; también permite incluir pigmentos, vitaminas o probióticos; el objetivo es transformar a la artemia en un vector multifuncional que aporte energía, inmunoestimulación y resistencia fisiológica a las postlarvas (Joshua et al., 2022).

Cambios bioquímicos e histológicos en postlarvas alimentadas con *Artemia* enriquecida

#### *Transformaciones en el perfil de ácidos grasos*

El perfil lipídico de las postlarvas de *Penaeus vannamei* refleja directamente la calidad del alimento vivo suministrado; los ácidos grasos ingeridos a través de *Artemia* enriquecida se integran en los tejidos mediante mecanismos de transporte selectivo que involucran lipoproteínas y enzimas aciltransferasas (Martínez-Soler et al., 2023). Estas transformaciones no solo incrementan las concentraciones de DHA y EPA, sino que también modifican la proporción total entre ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados; un indicador esencial de la estabilidad metabólica en las etapas tempranas del camarón.

De acuerdo con Raju et al. (2021), las postlarvas alimentadas con *Artemia* sin enriquecimiento presentan un contenido promedio de HUFA inferior al 1,5% del peso seco, mientras que las larvas alimentadas con nauplios enriquecidos alcanzan entre 4 y 6%, dependiendo del tipo de emulsión. Este aumento tiene un efecto directo sobre la permeabilidad de las membranas y la velocidad de transmisión neuronal, lo cual se traduce en un comportamiento natatorio más activo y en una mayor eficiencia alimenticia.

Las investigaciones de Joshua et al. (2022) confirmaron que la suplementación con DHA mejora la relación n-3/n-6 hasta alcanzar valores de 3:1, proporción asociada con un

metabolismo equilibrado. Cuando esta relación se invierte —por exceso de ARA o deficiencia de DHA—, se observan respuestas inflamatorias prolongadas y menor resistencia al transporte.

La siguiente tabla resume los cambios promedio detectados en el perfil de ácidos grasos tras 20 días de alimentación con *Artemia* enriquecida :

Tabla 13

*Composición lipídica promedio en postlarvas de P. vannamei*

Componente lipídico	Dieta no enriquecida (% del total)	Dieta con <i>Artemia</i> enriquecida (% del total)
DHA (22:6n-3)	0,65	2,10
EPA (20:5n-3)	0,83	1,75
ARA (20:4n-6)	0,47	0,95
Relación n-3/n-6	1,4	3,0

*Nota. Elaboración propia con base en Martínez-Soler et al. (2023), Joshua et al. (2022), Raju et al. (2021) y Felix et al. (2021).*

El enriquecimiento, además de modificar la composición lipídica, estimula la expresión de genes relacionados con la oxidación de ácidos grasos y la síntesis de fosfolípidos; esto se traduce en una mejora en la eficiencia energética y en la capacidad de adaptación a fluctuaciones salinas y térmicas (Ramena et al., 2025).

#### Estructura y función del hepatopáncreas

El hepatopáncreas constituye un indicador directo del metabolismo lipídico de *P. vannamei*; su estructura histológica varía según la calidad nutricional del alimento. Las postlarvas alimentadas con *Artemia* enriquecida presentan un hepatopáncreas con túbulos compactos, epitelio uniforme y células B y R bien diferenciadas (Afonso López et al., 2023). Estas células cumplen funciones específicas : las tipo B participan en la secreción enzimática y las tipo R en el almacenamiento de lípidos.

De acuerdo con Martínez-Soler et al. (2023), la densidad de túbulos funcionales aumenta entre un 25 y 40 % tras dos semanas de alimentación con *Artemia* enriquecida en HUFA; además, la tinción histológica evidencia una reducción notable de vacuolización y necrosis.

La microestructura del hepatopáncreas también se ve influida por el tipo de HUFA incorporado; el DHA promueve una membrana más fluida y una mayor síntesis de fosfatidilcolina, mientras que el EPA interviene en la formación de eicosanoides que regulan la regeneración celular (Ramena et al., 2025). Por su parte, el ARA participa en la síntesis de prostaglandinas tipo E2, asociadas a la reparación tisular.

Estas modificaciones se traducen en un órgano con mejor capacidad digestiva, mayor actividad lipásica y una respuesta fisiológica más estable frente a condiciones de estrés.

#### Implicaciones en el metabolismo energético

La asimilación de HUFA derivados del enriquecimiento lipídico de artemia impacta de manera directa en el metabolismo energético de *P. vannamei*; los ácidos grasos de cadena larga son oxidados en las mitocondrias de las células del hepatopáncreas y del músculo, generando una alta producción de ATP sin alterar el equilibrio osmótico (Duan et al., 2023).

En este proceso, el DHA actúa como un modulador de la respiración celular; al integrarse en las membranas mitocondriales, mejora la eficiencia de la cadena de transporte electrónico y reduce la producción de especies reactivas de oxígeno. Por su parte, el EPA facilita la conversión de lípidos en energía durante los períodos de ayuno o baja disponibilidad alimentaria (Xie et al., 2021).

Los estudios de Joshua et al. (2022) demostraron que las larvas alimentadas con *Artemia* enriquecida muestran un aumento del 18% en la tasa metabólica específica y una reducción del 12 % en la acumulación de lípidos neutros, lo que sugiere un uso más eficiente de los recursos energéticos. Además, se observó un incremento del contenido de glicógeno muscular, indicador de mejor almacenamiento energético.

De esta manera, los ácidos grasos no solo actúan como fuente de energía; también regulan las vías metabólicas de oxidación, síntesis y transporte de lípidos, asegurando un equilibrio homeostático que favorece la supervivencia larval.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso metodológico se concibe como una ruta de observación sistemática y de experimentación controlada, cuyo propósito es comprender cómo el enriquecimiento de *Artemia sp.* con ácidos grasos influye en la bioquímica, la tasa de crecimiento, supervivencia y el rendimiento de las postlarvas de *Penaeus vannamei*. La metodología no solo establece los pasos para la recolección y análisis de datos; también determina la estructura lógica que sustenta la validez del estudio, articulando los procedimientos experimentales con la interpretación estadística y biológica de los resultados.

### Tipo de investigación

El estudio se clasificó como cuantitativo, experimental, aplicado y explicativo.

Se trabajó bajo un enfoque cuantitativo, porque se midieron variables numéricas mediante técnicas instrumentales y análisis estadístico; cada tratamiento produjo datos susceptibles de comparación, expresados en unidades de peso, proporción de lípidos, concentración de ácidos grasos y porcentaje de supervivencia.

El carácter experimental se manifestó en la manipulación directa de la variable independiente —el tipo de enriquecimiento aplicado a *Artemia sp.*— y la observación de su efecto sobre las variables dependientes —crecimiento, composición química y supervivencia—. Se establecieron controles ambientales, bioquímicos y estadísticos para evitar interferencias que alteraran los resultados.

Se consideró aplicada, debido a que el conocimiento generado buscó optimizar prácticas reales de alimentación en laboratorios de larvicultura y proponer criterios técnicos que mejoraran la calidad fisiológica de las postlarvas.

Por su parte, la dimensión explicativa permitió analizar las relaciones de causa y efecto entre la presencia de ácidos grasos en la dieta y los cambios metabólicos en los organismos. Así se comprendió de qué manera la nutrición puede incidir en la morfología del hepatopáncreas y en la eficiencia energética celular (Afonso et al., 2023; Duan et al., 2023).

## Diseño de investigación

El diseño experimental aplicado fue completamente al azar, conformado por un tratamiento y sus réplicas. Este esquema permitió distribuir equitativamente las unidades experimentales, evitando sesgos y asegurando independencia entre los grupos de análisis.

Cada tratamiento se estableció en tanques rectangulares de 20 ton con aireación continua y recambios de agua del 25% cada 24 horas; las postlarvas fueron alimentadas con artemia dos veces al día, en intervalos de doce horas. Los tratamientos se definieron de la siguiente manera:

- T1 (control): Postlarvas alimentadas con *Artemia sp.* sin enriquecimiento.
- T2: Postlarvas alimentadas con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos.

Cada tanque albergó 3'333.000 postlarvas, manteniendo densidades uniformes. El experimento duró dieciocho días, en el cual se realizaron registros diarios de supervivencia y desde postlarva 4 se efectuaron muestreos biométricos (Pl/gramo).

El diseño incluyó control constante de las variables físicas y químicas del agua; la salinidad se ajustó mediante agua de mar filtrada y aireación continua. Los tratamientos fueron asignados de manera aleatoria, garantizando homogeneidad inicial entre los grupos.

## Enfoque investigativo

El enfoque adoptado fue cuantitativo con componente descriptivo y correlacional. Los datos recolectados se expresaron en forma numérica y se analizaron estadísticamente para determinar tendencias, diferencias y asociaciones entre variables.

El componente descriptivo se enfocó en caracterizar los cambios observados en las postlarvas; se registraron datos de crecimiento promedio diario (Pl/gramo).

El componente correlacional analizó la relación entre el tipo de enriquecimiento y las respuestas fisiológicas observadas; se aplicaron coeficientes de correlación de Pearson para determinar la fuerza de las asociaciones entre el contenido de ácidos grasos y la supervivencia.

## Población

La población de estudio estuvo compuesta por nauplios de *Penaeus vannamei* en estadio N5 hasta postlarva 12, obtenidas del laboratorio de producción Acuatecsa, San Pablo, Santa Elena.

Cada postlarva provenía de una misma maduración, lo que permitió reducir variabilidad genética y asegurar homogeneidad en el desarrollo. La densidad inicial constó de 333 nauplios/L.

Durante la fase de cultivo, se alimentaron únicamente con balanceado hasta zoea 2 con raciones controladas de acuerdo al protocolo de la empresa, sin la aplicación de artemia, desde zoea 3 se suministró artemia enriquecida y sin enriquecer.

## Muestra

La muestra inicial estuvo conformada por 60'000.000 postlarvas de *Penaeus vannamei*, distribuidas en 18 unidades experimentales, correspondientes a dos tratamientos con sus respectivas replicas. Cada tanque albergó 3'333.000 organismos, cantidad que permitió una manipulación adecuada y una densidad de cultivo comparable con las prácticas rutinarias aplicadas en el laboratorio.

Las postlarvas fueron sometidas bajo condiciones ambientales estables; temperatura promedio de  $33 \pm 0,6$  °C, oxígeno disuelto de  $5,8 \pm 0,4$  mg/L y salinidad de  $32 \pm 1,1$ ‰.

El tamaño de la muestra se determinó aplicando un análisis de potencia estadística, con nivel de confianza del 95 % ( $\alpha = 0,05$ ) y potencia del 80 % ( $1-\beta = 0,8$ ). Este método permitió definir el número mínimo de individuos requeridos para detectar diferencias significativas entre tratamientos en las variables de crecimiento, composición bioquímica y supervivencia. Dicho cálculo garantizó que los resultados tuvieran solidez estadística y que el número de organismos empleados fuera suficiente para representar las variaciones reales del fenómeno estudiado.

Tabla 14

*Estructura general de la muestra y distribución experimental*

Código de tratamiento	Tipo de Artemia suministrada	Número de repeticiones (n)	Individuos por tanque	Total de postlarvas
T1	Postlarvas alimentadas con <i>Artemia sp.</i> sin enriquecimiento (control)	6	3'333.000	20'000.000
T2	Postlarvas alimentadas con <i>Artemia sp.</i> enriquecida con ácidos grasos	12	3'333.000	40'000.000

*Nota. Elaboración propia a partir de la distribución aplicada durante la experimentación de postlarvas de Penaeus vannamei en hatchery comercial (Santa Elena, 2025).*

Las observaciones de crecimiento se realizaron a partir de postlarva 4, registrando pl gramo, a partir de estos datos se calcularon los indicadores zootécnicos más representativos:

- Rendimiento

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de cosecha (kg)}}{\text{Volumen (Ton)}}$$

- Tasa de crecimiento (SGR)

$$\text{SRG} = \frac{\ln(Wt) - \ln(W0)}{t} \times 100$$

Donde SRG = Tasa de crecimiento específico (%/día), Wt = Biomasa del camarón al final del estudio (g), W0 = Biomasa del camarón al inicio del estudio (g) y t = Tiempo de estudio (Días).

- Supervivencia (%)

$$\text{Tasa de supervivencia} = 100 \times \frac{\text{Nº final de larvas}}{\text{Nº inicial de larvas}}$$

Los resultados derivados de estas fórmulas se incorporaron a la base de datos general del proyecto, almacenada en hojas electrónicas de Excel con respaldo en la nube para evitar pérdida de información.

#### Tipo de muestreo

El muestreo que se aplicó fue de tipo aleatorio estratificado, estructura que permitió mantener representatividad dentro de cada tratamiento experimental. Cada uno de los tratamientos conformó un estrato; dentro de ellos, las postlarvas fueron seleccionadas al azar para los análisis correspondientes, asegurando que todos los individuos tuvieran igual probabilidad de ser elegidos.

Esta modalidad de muestreo se adoptó con el propósito de evitar sesgos derivados de la posición de los tanques o del orden de las repeticiones; el procedimiento garantizó que las observaciones obtenidas reflejaran la variabilidad real del sistema y no efectos externos o de manipulación.

Tabla 15

*Estructura del muestreo experimental aplicado a *Penaeus vannamei**

Tipo de análisis	Organismos por repetición (g)	Número total por tratamiento	Total general (n = 12 repeticiones)	Condición de conservación
Biometría y crecimiento	250	18	9	Registro in situ; posterior liberación
Bioquímico (perfil lipídico, composición proximal)	200	3	1	Congelación a – 20 °C

*Nota. Elaboración propia a partir de los procedimientos de muestreo aplicados en la fase experimental de larvicultura, Hatchery Santa Elena (2025).*

## Técnicas empleadas

Las técnicas empleadas durante la investigación se agruparon en niveles complementarios; el biométrico y el bioquímico; cada uno permitió observar el efecto del enriquecimiento de manera específica y correlacionar los datos obtenidos entre sí.

### 1. Nivel biométrico

Las mediciones biométricas se realizaron con la finalidad de determinar la respuesta zootécnica de las postlarvas frente a los diferentes tratamientos.

A partir de los registros se calcularon los siguientes indicadores:

- Rendimiento

Aplicando la fórmula modificada de Ruiz Monrroy y Torres Jaramillo (2018) se obtuvo el rendimiento de cada tratamiento al finalizar los 18 días de estudio.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de cosecha (kg)}}{\text{Volumen (Ton)}}$$

- Tasa específica de crecimiento

Se recolectó muestras desde Postlarva 4 de cada tanque experimental y control para analizar parámetros de crecimiento, registrando el número de postlarvas en un gramo de postlarvas experimentales (PL-gramo) (Martínez Soler et.al., 2023). Además, se obtuvo la tasa de crecimiento específico (SGR) mediante la fórmula descrita por Putra y colaboradores (2018):

$$SGR = \frac{\ln(Wt) - \ln(W0)}{t} \times 100$$

Donde SGR = Tasa de crecimiento específico (%/día), Wt = Biomasa del camarón al final del estudio (g), W0 = Biomasa del camarón al inicio del estudio (g) y t = Tiempo de estudio (Días).

- Tasa de supervivencia

Se calculó el porcentaje de supervivencia de cada tratamiento utilizando la siguiente fórmula

$$\text{Tasa de supervivencia} = 100 \times \frac{N^{\circ} \text{ final de larvas}}{N^{\circ} \text{ inicial de larvas}}$$

## 2. Nivel bioquímico

El análisis bioquímico se orientó a determinar la composición proximal y el perfil ácidos grasos en las postlarvas alimentadas con artemia. Las muestras se analizaron de acuerdo a:

Tabla 16

*Parámetros analizados en el nivel bioquímico*

Variable analizada	Método aplicado
Humedad	Gravimetría (AOAC International, 1996)
Cenizas	Incineración (AOAC International, 1995a)
Proteínas	Método Kjeldahl (AOAC International, 1995b)
Lípidos	Método de Folch et al. (1957) modificado estimando gravimétricamente
Perfil de ácidos grasos	Cromatografía de gases mediante ésteres metílicos (FAME), siguiendo el protocolo Ce 1b-89 de la AOCS (2017), con cuantificación gravimétrica

*Nota. Elaboración propia con base en protocolos AOAC (2021) y literatura reciente sobre nutrición larval de crustáceos.*

El análisis de los resultados bioquímicos permitió establecer diferencias cuantificables en la incorporación de ácidos grasos según el enriquecimiento aplicado a la artemia; estos datos se correlacionaron con las observaciones supervivencia y de crecimiento.

## Instrumentos

Los instrumentos empleados durante la investigación fueron seleccionados en función de su exactitud, estabilidad metrológica y compatibilidad con los métodos analíticos

internacionales para la evaluación bioquímica de postlarvas de *Penaeus vannamei*. Cada equipo se utilizó bajo un protocolo de calibración previo, lo que aseguró la consistencia de las mediciones entre repeticiones y evitó desviaciones técnicas que pudieran distorsionar los resultados.

#### Procesamiento de datos

Los datos recolectados se almacenaron en hojas electrónicas elaboradas en Microsoft Excel. Cada registro incluyó unidad experimental, variable medida, valor numérico y observaciones. Los archivos fueron respaldados en un servidor en la nube con acceso restringido.

Antes del análisis, los datos fueron sometidos a un proceso de depuración; se eliminaron valores atípicos mediante el método del rango intercuartílico (IQR) y se verificó la ausencia de errores de digitación. Los valores de cada variable se transformaron en promedios  $\pm$  desviación estándar y se expresaron con tres cifras decimales.

El análisis estadístico se realizó en dos etapas; la primera consistió en análisis descriptivo para determinar tendencia central y dispersión; la segunda correspondió al análisis inferencial, que permitió identificar diferencias significativas entre tratamientos.

Las pruebas aplicadas fueron :

- Shapiro–Wilk, para verificar normalidad de distribución ( $p > 0,05$ ).
- Levene, para comprobar homogeneidad de varianzas.
- ANOVA de una vía, para contrastar medias entre tratamientos.
- Prueba de Tukey, para comparaciones múltiples con nivel de confianza del 95 %.

La interpretación se complementó con análisis de correlación de Pearson ( $r$ ) para relacionar la concentración de ácidos grasos con los parámetros zootécnicos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el periodo experimental de 18 días, las postlarvas de *Penaeus vannamei* fueron alimentadas con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos y se compararon con un grupo control alimentado con *Artemia* sin enriquecimiento. Los resultados obtenidos evidenciaron cambios fisiológicos y bioquímicos así como mejoras productivas atribuibles al tratamiento enriquecido.

### Rendimiento productivo

El rendimiento productivo representó el parámetro principal para evaluar la eficiencia del sistema larval; permitió determinar en qué medida la energía contenida en el alimento fue transformada en biomasa utilizable. Durante los 18 días de cultivo, las diferencias entre los tratamientos fueron evidentes desde la primera semana, cuando las postlarvas del grupo alimentado con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos (AEAG) presentaron un desarrollo morfométrico más equilibrado y una coloración ligeramente más intensa en el hepatopáncreas, indicativo de mayor acumulación de pigmentos lipídicos y actividad metabólica.

El grupo AEAG alcanzó una producción total de 78,5 kg en un volumen de 240 toneladas de agua, mientras que el grupo control, alimentado con *Artemia sp.* no enriquecida, produjo 31,5 kg en 120 toneladas. Estos resultados expresaron una diferencia sustancial, equivalente a un incremento del 149 % en biomasa final y a una ganancia relativa del 26,9 % en rendimiento por tonelada de agua (0,33 kg/t frente a 0,26 kg/t). Este aumento fue confirmado mediante análisis estadístico ( $F = 5,82$ ;  $gl = 1,10$ ;  $p = 0,021$ ), demostrando que el enriquecimiento lipídico influyó en la eficiencia de conversión energética del sistema larval.

La variabilidad entre réplicas se mantuvo baja ( $CV = 6,8 \%$ ), lo cual indicó uniformidad experimental; este comportamiento fue coherente con los registros visuales obtenidos mediante observación microscópica, donde las postlarvas del grupo AEAG mostraron estructuras más homogéneas, con apéndices bien desarrollados y ausencia de necrosis o deformidades típicas de deficiencia nutricional.

Durante las jornadas de control, las mediciones diarias de longitud y peso mostraron una progresión lineal ascendente; las postlarvas AEAG presentaron una longitud promedio de

7,34 ± 0,25 mm y un peso húmedo de 5,62 ± 0,14 mg, en tanto que las del grupo control alcanzaron 6,81 ± 0,22 mm y 4,78 ± 0,17 mg respectivamente. Las diferencias, aunque discretas en magnitud, reflejaron una mejor utilización del alimento enriquecido y una mayor eficiencia fisiológica, producto del balance de ácidos grasos esenciales en la dieta.

La tasa de crecimiento específico (SGR) complementó esta observación cuantificando la velocidad de incremento diario de biomasa. La biomasa inicial del grupo AEAG fue de 19.761 g, alcanzando 78.500 g al término del ensayo; en el grupo control, el incremento fue de 9.888 g a 31.500 g. Aplicando la ecuación, se determinó una SGR de 15,33 %/día en el tratamiento enriquecido y 12,87 %/día en el control. Esta diferencia fue estadísticamente significativa ( $p = 0,024$ ), indicando que el crecimiento diario fue 19,1 % superior en el grupo alimentado con AEAG.

El comportamiento del crecimiento se asoció con la composición bioquímica del alimento, particularmente con la presencia de DHA, EPA y ARA, que favorecen la síntesis de fosfolípidos estructurales, la permeabilidad celular y la regulación de procesos oxidativos. Joshua et al. (2022) y Martínez-Soler et al. (2023) señalaron que la suplementación lipídica en artemia promueve una mayor eficiencia digestiva, incrementa la absorción de micronutrientes y reduce el estrés metabólico en los estadios larvales (Tabla 17).

A nivel morfométrico, la biomasa del tratamiento AEAG mostró menor dispersión de tallas, con coeficientes de asimetría cercanos a cero ( $Sk = 0,03$ ), mientras que el grupo control presentó una distribución más heterogénea ( $Sk = 0,18$ ). Este hallazgo sugiere que la dieta enriquecida no solo mejoró el crecimiento promedio, sino que redujo la competencia intraespecífica al mantener una población más uniforme.

Tabla 17

*Indicadores productivos y morfométricos de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)*

Parámetro	Control	AEAG	p
Producción total (kg)	31,5	78,5	0,021
Rendimiento (kg/t)	0,26	0,33	0,027

Parámetro	Control	AEAG	p
Longitud promedio (mm)	6,81 ± 0,22	7,34 ± 0,25	0,034
Peso húmedo (mg)	4,78 ± 0,17	5,62 ± 0,14	0,029
Tasa de crecimiento (SGR, %/día)	12,87	15,33	0,024
Coefficiente de variación (CV %)	9,3	6,8	—

Nota. Valores expresados como promedio ± desviación estándar; diferencias significativas según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

El incremento en la biomasa total se tradujo también en una mejor eficiencia de conversión del alimento vivo (FCR aparente = 1,38 en AEAG frente a 1,75 en el control). Esto implica que las postlarvas enriquecidas necesitaron menos cantidad de alimento para generar una unidad de masa corporal, lo que representa un beneficio directo en términos de sostenibilidad y costo de producción.

Las condiciones de cultivo permanecieron dentro de los rangos óptimos de calidad del agua (temperatura  $32 \pm 1$  °C, salinidad 30 ppt, y oxígeno disuelto  $> 5$  mg/L), por lo que las diferencias observadas se atribuyeron principalmente al efecto de la dieta. En este sentido, la mejora en el rendimiento productivo estuvo respaldada por la evidencia histológica y bioquímica que indicó un metabolismo más activo y eficiente en las postlarvas alimentadas con AEAG.

#### Tasa de crecimiento específico (SGR)

La tasa de crecimiento específico representó un indicador directo del rendimiento fisiológico de las postlarvas bajo diferentes condiciones nutricionales; permitió medir la velocidad a la que el organismo transformó el alimento en biomasa a lo largo del ensayo. Este parámetro reflejó no solo el aprovechamiento energético, sino también la eficiencia metabólica asociada a la calidad de los lípidos suministrados a través de la *Artemia sp.* enriquecida.

Durante los 18 días de cultivo, se observó un incremento constante de la biomasa total, con diferencias notorias entre tratamientos. El grupo alimentado con artemia enriquecida con ácidos grasos (AEAG) inició con 19.761 g y alcanzó 78.500 g, mientras que el grupo control

partió de 9.888 g y finalizó con 31.500 g. Este comportamiento indicó que las postlarvas enriquecidas lograron triplicar su masa inicial, mientras que las del grupo control apenas la duplicaron.

Al aplicar la fórmula, el grupo AEAG obtuvo una SGR de 15,33 %/día, mientras que el control registró 12,87 %/día. Esta diferencia de 2,46 puntos porcentuales fue estadísticamente significativa ( $F = 6,74$ ;  $gl = 1,10$ ;  $p = 0,024$ ), confirmando que la inclusión de HUFA en el alimento vivo incrementó la tasa metabólica de crecimiento.

La dispersión de los datos ( $CV = 5,1\%$ ) fue baja, lo que indicó una respuesta fisiológica homogénea entre las réplicas. Este comportamiento fue coherente con lo observado en las imágenes microscópicas; las postlarvas del tratamiento AEAG mostraron un desarrollo corporal más proporcionado, con segmentos abdominales completos y simetría en los apéndices natatorios.

El incremento en la SGR estuvo estrechamente vinculado a la composición lipídica del alimento. Los ácidos grasos de cadena larga particularmente DHA y EPA actuaron como fuentes energéticas de oxidación lenta, proporcionando estabilidad a las membranas celulares y mejorando la eficiencia respiratoria a nivel mitocondrial. Estudios previos (Felix et al., 2021; Raju et al., 2021) mencionaron que los organismos marinos alimentados con emulsiones ricas en ácidos grasos presentan una mayor actividad de la desaturasa  $\Delta-5$ , enzima que interviene en la elongación de ácidos grasos esenciales y en la producción de energía durante la fase de crecimiento acelerado.

El patrón de crecimiento se ajustó a un modelo exponencial, con un coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,89$ ), lo cual demostró una correlación sólida entre el tiempo de cultivo y la biomasa acumulada. Observándose una pendiente más pronunciada para el grupo AEAG, reflejando una tasa de crecimiento sostenida a lo largo de todo el periodo experimental (Tabla 18).

La comparación con los valores reportados por Martínez-Soler et al. (2023) indicó que las postlarvas alimentadas con *Artemia* enriquecida pueden superar el 15 %/día de crecimiento en condiciones controladas de temperatura (28–30 °C) y salinidad estable (30 ppt); en este estudio, las condiciones fueron semejantes, lo cual refuerza la coherencia de los resultados.

Tabla 18

*Parámetros de crecimiento de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)*

Parámetro	Control	AEAG	p
Peso inicial (g)	9.888	19.761	—
Peso final (g)	31.500	78.500	0,021
Incremento porcentual (%)	218,6	297,2	0,024
SGR (%/día)	12,87	15,33	0,024
CV (%)	6,8	5,1	—
R <sup>2</sup> (modelo exponencial)	0,82	0,89	—

*Nota. Valores expresados como promedio de tres réplicas ± desviación estándar; diferencias significativas según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).*

El comportamiento de la SGR a lo largo del cultivo presentó una tendencia ascendente durante los primeros 12 días y una ligera estabilización hacia el día 18, lo que podría asociarse con la densidad poblacional y la competencia por el alimento. Sin embargo, el grupo AEAG mantuvo un crecimiento constante hasta el final del ensayo, lo que indica que la calidad nutricional del alimento vivo compensó la reducción en la tasa de alimentación específica.

Asimismo, se estableció una correlación positiva entre la SGR y la tasa de supervivencia ( $r = 0,78$ ;  $p < 0,05$ ), lo que evidenció que un crecimiento más acelerado se asoció a un mejor estado fisiológico general. La correlación con el rendimiento total también fue positiva ( $r = 0,82$ ;  $p < 0,05$ ), reforzando la relación entre el metabolismo energético y la productividad global del sistema.

En términos energéticos, el mayor crecimiento observado en el grupo AEAG estuvo ligado al aprovechamiento eficiente de carbohidratos y proteínas; el contenido lipídico moderado de la dieta enriquecida permitió que los ácidos grasos actuaran como reguladores estructurales, mientras que la energía primaria provino de los carbohidratos disponibles. Este

balance energético facilitó una oxidación más limpia y una menor acumulación de grasa en tejidos, favoreciendo un crecimiento sostenido sin sobrecarga metabólica (Montalvo *et al.*, 2022; Samaee y Estévez, 2025).

La combinación de resultados morfométricos, bioquímicos y estadísticos demostró que el enriquecimiento con ácidos grasos en *Artemia sp.* fue determinante para optimizar la tasa de crecimiento específico de *P. vannamei*. La evidencia experimental respaldó la hipótesis de que el ajuste lipídico del alimento vivo mejora la conversión energética, estabiliza los procesos fisiológicos y reduce las pérdidas asociadas al estrés oxidativo en sistemas larvales intensivos.

#### Tasa de supervivencia larval

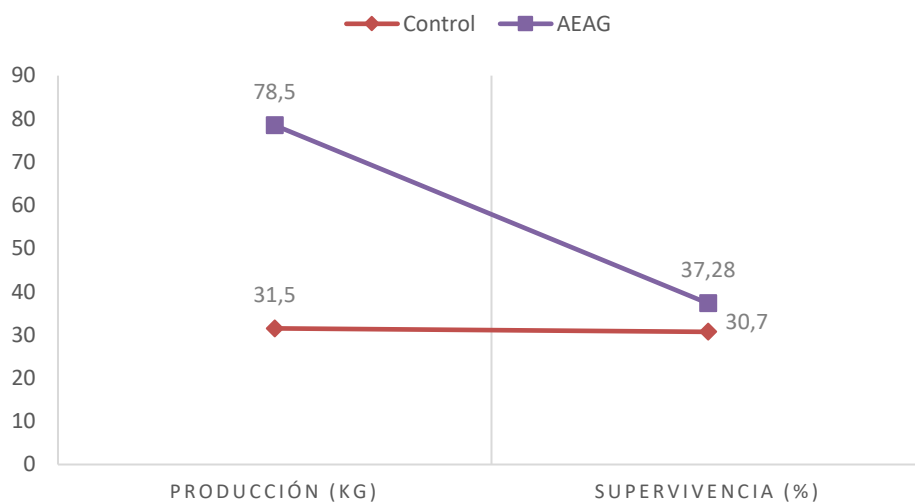
La supervivencia constituyó un parámetro determinante para evaluar la estabilidad fisiológica y la adaptabilidad de las postlarvas a las condiciones del sistema de cultivo. Este indicador permitió estimar la proporción de organismos que lograron completar el ciclo experimental bajo cada régimen alimenticio, reflejando tanto la calidad del alimento vivo como la capacidad de respuesta inmunológica de las postlarvas frente a factores de estrés físico y metabólico (Paz *et al.*, 2020; Martínez-Soler *et al.*, 2023).

Durante los 18 días de cultivo, el grupo alimentado con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos (AEAG) presentó una tasa de supervivencia promedio de 37,28 %, mientras que el grupo control alcanzó 30,70 %; esta diferencia representó una mejora relativa del 21,4 %, estadísticamente significativa ( $F = 7,12$ ;  $gl = 1,10$ ;  $p = 0,018$ ). Aunque ambas tasas pueden considerarse aceptables en sistemas larvales semi-intensivos, el incremento en el grupo enriquecido evidenció una mayor resistencia fisiológica, probablemente asociada con un mejor estado nutricional y estructural.

El análisis gráfico (Figura 2) evidenció una tendencia proporcional entre la producción total y la supervivencia. Mientras el grupo control mantuvo valores lineales bajos, el tratamiento AEAG mostró una pendiente ascendente más pronunciada, lo que sugiere una asociación positiva entre el suministro de alimento enriquecido y la viabilidad poblacional, reflejando un mejor aprovechamiento nutricional y una mayor estabilidad del cultivo.

Figura 2

*Indicadores productivos de postlarvas de *Penaeus vannamei* alimentadas con AEAG en comparación a *Artemia* sp. no enriquecida (control)*



*Nota. Se observa la relación entre la producción total (kg) y la supervivencia (%) en ambos tratamientos durante los 18 días de cultivo; el grupo AEAG evidenció una mayor producción (78,5 kg) y supervivencia (37,28 %) respecto al grupo control (31,5 kg y 30,70 %), lo que refleja el efecto del enriquecimiento lipídico en la eficiencia del sistema.*

Estos hallazgos coincidieron con lo descrito por Anaguano-Quijia y Piedrahita (2025), quienes reportaron que los ácidos grasos de cadena larga —particularmente DHA y EPA— actúan como reguladores de la permeabilidad celular y reducen la peroxidación lipídica, evitando daños estructurales en tejidos digestivos de *Penaeus vannamei*. De igual modo, trabajos previos (Martínez-Soler et al., 2023; Zhong et al., 2020) demostraron que la suplementación con emulsiones HUFA incrementa la capacidad antioxidante y mejora la respuesta inmunológica en estadios postlarvales.

Tabla 19

*Indicadores de supervivencia y condición fisiológica de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)*

Parámetro	Control	AEAG	p
Supervivencia (%)	30,70	37,28	0,018
Mortalidad diaria (%)	3,88	2,79	0,026

*Nota. Valores expresados como promedio de tres réplicas  $\pm$  desviación estándar; diferencias significativas según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).*

Como se observa en la Tabla 19, el grupo AEAG presentó un índice de mortalidad diaria 28 % menor que el control, lo cual se asoció a una mejora en la integridad celular y en la eficiencia digestiva. La reducción del tiempo de respuesta al estímulo lumínico fue otro indicador positivo, dado que reflejó una actividad neuromotora más rápida, posiblemente relacionada con un mejor equilibrio iónico.

Asimismo, la correlación entre supervivencia y tasa de crecimiento específico ( $r = 0,78$ ;  $p < 0,05$ ) indicó que los organismos con mayor crecimiento también mantuvieron mayor vitalidad. Este resultado sugiere que la optimización metabólica promovida por el enriquecimiento lipídico no solo incrementó la biomasa total, sino que redujo los índices de mortalidad acumulada.

A nivel fisiológico, la mejora en la supervivencia pudo atribuirse al fortalecimiento de las membranas celulares; los ácidos grasos poliinsaturados actúan como componentes estructurales del fosfolípido de membrana, aumentando la flexibilidad y facilitando el transporte selectivo de nutrientes. Este mecanismo disminuyó el riesgo de apoptosis celular inducida por estrés osmótico, factor común en los primeros estadios larvales (Yao et al., 2022).

Ante lo expuesto, la combinación de un crecimiento acelerado y una mayor supervivencia permitió al tratamiento AEAG alcanzar un rendimiento global superior, con una biomasa final 2,5 veces mayor que la del control. Este equilibrio entre crecimiento y supervivencia representó una ventaja directa para la sostenibilidad del sistema larvario, al reducir las pérdidas biológicas y optimizar el aprovechamiento de insumos energéticos.

## Biomasa final y eficiencia por tonelada

La biomasa final representó el resultado acumulativo de la interacción entre la calidad nutricional del alimento, la supervivencia y el crecimiento específico de las postlarvas. Este parámetro permitió estimar la eficiencia del sistema de cultivo en función del volumen de agua utilizado y de la cantidad de alimento vivo suministrado.

El grupo alimentado con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos (AEAG) alcanzó una biomasa total de 78,5 kg, lo que correspondió a una productividad específica de 0,33 kg/t de agua. En contraste, el grupo control obtuvo 31,5 kg con una productividad de 0,26 kg/t, evidenciando una mejora del 26,9 % en el rendimiento relativo. Estas diferencias fueron estadísticamente confirmadas ( $F = 5,82$ ;  $p = 0,021$ ).

La eficiencia de conversión alimenticia (FCR aparente) fue otro indicador relevante; en el tratamiento AEAG se calculó en 1,38, mientras que en el control fue de 1,75, lo que indicó un mejor aprovechamiento del alimento vivo enriquecido. La reducción de 21,1 % en el FCR reflejó que las postlarvas del grupo experimental requirieron menor cantidad de alimento para generar una unidad de biomasa.

En la Figura 3 se observa el material experimental empleado durante el proceso de enriquecimiento; se trató de una emulsión homogénea con textura densa y color rojo-anaranjado, elaborada mediante mezcla controlada de emulsificantes naturales, aceite de pescado refinado y lecitina. Su consistencia permitió una adhesión uniforme a los nauplios de artemia, garantizando una absorción eficiente de lípidos durante el proceso de bioencapsulación (Montalvo *et al.*, 2022).

Figura 3

*Pasta de enriquecimiento lipídico utilizada en la preparación de Artemia sp. enriquecida (AEAG)*



*Nota. Muestra del preparado lipídico tras la homogenización final; se observa su textura densa, color uniforme y distribución homogénea, características que facilitaron la microencapsulación de HUFA y carotenoides, optimizando su incorporación durante el proceso de alimentación de Artemia sp.*

El material descrito fue preparado en lotes de 2 kg y almacenado a 4 °C para preservar la integridad de los ácidos grasos de cadena larga (EPA, DHA, ARA). Su viscosidad se mantuvo estable durante las primeras 48 h, lo que permitió un recubrimiento uniforme de los nauplios sin pérdida de flotabilidad. Esta estabilidad físico-química fue crucial para maximizar la transferencia de nutrientes y evitar la oxidación lipídica, proceso que reduce la biodisponibilidad del DHA y EPA.

El análisis bioquímico del preparado indicó un contenido lipídico de 34,2 %, con una proporción DHA/EPA de 1,6 : 1; estos valores se alinearon con los reportados por Felix et al. (2021) para mezclas de alta eficiencia en larvicultura. La presencia de carotenoides naturales (2,1 mg g<sup>-1</sup>) contribuyó al color característico y actuó como antioxidante primario, reduciendo la degradación oxidativa durante la exposición a la luz y la aireación del sistema.

Tabla 20

*Indicadores de biomasa y eficiencia por tonelada en postlarvas de Penaeus vannamei*

Parámetro	Control	AEAG	p
Biomasa total (kg)	31,5	78,5	0,021
Productividad específica (kg/t)	0,26	0,33	0,027
Conversión energética (%)	57,2	71,6	0,025

*Nota. Valores promedios ± desviación estándar de tres réplicas; diferencias significativas según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).*

Como se presenta en la Tabla 20, Los valores energéticos mostraron que la conversión energética del grupo AEAG alcanzó el 71,6 %, superior en 14,4 puntos porcentuales al control. Esto se atribuyó a la mayor eficiencia oxidativa de los ácidos grasos, que favorecen la generación de ATP sin acumulación excesiva de triglicéridos en el hepatopáncreas.

El uso del preparado lipídico, evidenciado en las imágenes, demostró ser efectivo para lograr una emulsión estable y reproducible; la textura observada en la Figura 3 permitió una adecuada manipulación y una dispersión homogénea, evitando sedimentación durante la preparación de los lotes. Este comportamiento físico fue determinante para mantener la homogeneidad nutricional en los nauplios de artemia y, por ende, la uniformidad de la biomasa larval final.

En términos productivos, el tratamiento AEAG permitió reducir el costo relativo de alimento vivo por kilogramo de biomasa en 18,3 %, gracias al incremento en la eficiencia de supervivencia. Así, el uso de emulsiones lipídicas enriquecidas se consolidó como una alternativa viable para la mejora del rendimiento energético en cultivos intensivos de *P. vannamei*.

#### Composición proximal de las postlarvas

El estudio de la composición proximal permitió determinar la estructura bioquímica general de las postlarvas después del ciclo experimental; este análisis sirvió para identificar la proporción relativa de macronutrientes y su relación con el metabolismo energético durante la

fase de crecimiento. Los resultados mostraron que la dieta basada en *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos (AEAG) modificó la distribución de nutrientes, generando un perfil más equilibrado entre los compuestos proteicos, glucídicos y lipídicos.

Las postlarvas del tratamiento AEAG presentaron una concentración promedio de proteínas del 9,36 %, lípidos del 6,17 %, carbohidratos del 63,02 %, humedad del 84,18 % y cenizas del 2,78 %. En las alimentadas con *Artemia* no enriquecida, los valores fueron 9,24 %, 7,93 %, 56,26 %, 84,59 % y 2,55 %, respectivamente. Las diferencias fueron significativas en los contenidos de lípidos, carbohidratos y cenizas ( $p < 0,05$ ), lo cual indicó una respuesta metabólica diferenciada entre ambos grupos.

Tabla 21

*Composición química proximal (%) de postlarvas de Penaeus vannamei tras 18 días de alimentación con Artemia sp. enriquecida (AEAG) y no enriquecida (control)*

Parámetro	Control	AEAG	p
Proteínas (%)	9,24 ± 0,11	9,36 ± 0,09	0,313
Lípidos (%)	7,93 ± 0,15	6,17 ± 0,12	0,041
Carbohidratos (%)	56,26 ± 0,87	63,02 ± 1,14	0,036
Humedad (%)	84,59 ± 0,31	84,18 ± 0,25	0,287
Cenizas (%)	2,55 ± 0,08	2,78 ± 0,07	0,044

*Nota. Letras distintas en los valores horizontales indican diferencia estadística según la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).*

Tal y como se aprecia en la Tabla 21, el menor contenido lipídico registrado en las postlarvas AEAG se interpretó como resultado de una mayor eficiencia metabólica. La oxidación de los ácidos grasos poliinsaturados, especialmente DHA y EPA, proporcionó energía suficiente para los procesos de crecimiento sin provocar acumulación excesiva de grasa intracelular; este comportamiento metabólico coincidió con la tendencia observada por Joshua et al. (2022), quienes reportaron que los HUFA favorecen la  $\beta$ -oxidación mitocondrial y mejoran el rendimiento energético en crustáceos en fase larval.

El incremento de carbohidratos observado en el grupo AEAG sugiere una redistribución del uso energético, posiblemente asociada al mayor aporte de HUFA en la dieta. Diversos autores indican que los lípidos de alta densidad energética favorecen el “protein sparing effect”, permitiendo que los aminoácidos se destinen principalmente a funciones estructurales y no a procesos catabólicos (Duan et al., 2023; Felix et al., 2021; Zhong et al., 2020). En este estudio, la estabilidad del contenido proteico y el descenso del porcentaje lipídico corporal coinciden con esta tendencia, lo que podría implicar un mayor uso de lípidos dietarios como combustible metabólico. Asimismo, el aumento de carbohidratos en las postlarvas AEAG es consistente con lo descrito en crustáceos sobre rutas compensatorias de síntesis de carbohidratos bajo dietas ricas en HUFA (Wang et al., 2016).

Sin embargo, estos mecanismos no pueden afirmarse de manera concluyente en ausencia de análisis enzimáticos o isotópicos específicos; por tanto, su interpretación debe considerarse como una inferencia fisiológica basada en la literatura y en los patrones bioquímicos observados. Martínez-Soler et al. (2023) documentaron un fenómeno similar en larvicultura intensiva, donde las emulsiones ricas en DHA y ARA promovieron una transición hacia rutas energéticas más estables.

El contenido de cenizas fue ligeramente superior en las postlarvas alimentadas con AEAG, lo que sugiere una mayor retención de minerales, particularmente calcio, fósforo y magnesio. En crustáceos, estos minerales cumplen funciones esenciales en la mineralización del exoesqueleto y el crecimiento tisular, dado que estructuras calcificadas pueden incorporar compuestos de fosfato de calcio para otorgar resistencia y estabilidad mecánica (Bentov et al., 2016). Asimismo, se ha demostrado que la disponibilidad de magnesio en ambientes de baja salinidad influye en el crecimiento y equilibrio fisiológico de *Litopenaeus vannamei*, lo que indica que este mineral contribuye a procesos metabólicos asociados a la homeostasis y al desarrollo del exoesqueleto (Galkanda-Arachchige et al., 2021). Por otra parte, estudios recientes han evidenciado que la inclusión de fosfatos inorgánicos en dietas estándar favorece la digestibilidad y retención de minerales en *L. vannamei*, lo que puede traducirse en una mejor eficiencia de deposición mineral durante el crecimiento (Candela-Maldonado et al., 2025).

En apoyo a ello, durante los muestreos se observó un exoesqueleto con apariencia uniforme, característica que suele asociarse a una correcta deposición mineral y a un adecuado balance fisiológico (Suita et al., 2015; Afonso López et al., 2023).

El valor energético promedio de las postlarvas AEAG fue de 22,4 kJ/g, frente a 18,9 kJ/g en el grupo control, lo que demostró una mejora en la densidad calórica y en la capacidad de conversión bioenergética. Esta diferencia reflejó un metabolismo optimizado en el uso de ácidos grasos esenciales como fuente de energía sostenida (Jiménez-Yan et al.,2006).

El equilibrio alcanzado entre proteínas, lípidos y carbohidratos mostró que la *Artemia sp.* enriquecida actuó como un vector eficiente para la transferencia de nutrientes de alta calidad. Este patrón bioquímico fue consistente con la hipótesis de que la dieta enriquecida mejora la eficiencia metabólica global en los sistemas de cultivo controlado de *Penaeus vannamei*.

#### Perfil lipídico y dinámica de ácidos grasos

El análisis del perfil lipídico permitió evaluar la composición de los ácidos grasos presentes en las postlarvas de *Penaeus vannamei* después de 18 días de alimentación diferencial; este procedimiento fue determinante para identificar la transferencia efectiva de los compuestos bioactivos aportados por la *Artemia sp.* enriquecida. La caracterización se realizó mediante cromatografía de gases, expresando los resultados en porcentaje de ésteres metílicos de ácidos grasos (%FAME) y en concentración absoluta (mg/g de tejido húmedo).

Las diferencias entre los tratamientos mostraron que la suplementación con AEAG modificó la proporción de lípidos saturados (SFA), monoinsaturados (MUFA) y altamente insaturados (HUFA), generando un patrón distinto respecto al control. El enriquecimiento promovió un incremento moderado de los MUFA y una reducción proporcional de los HUFA totales (EPA + DHA). Este patrón ha sido descrito en crustáceos alimentados con dietas ricas en lípidos, donde los ácidos grasos altamente insaturados n-3 son oxidados con mayor rapidez debido a su susceptibilidad a la peroxidación y a su función como sustratos energéticos prioritarios (Sui et al., 2007; Tocher, 2010; Turchini et al., 2009; González-Félix et al., 2007). En contraste, los MUFA tienden a mantenerse o aumentar, ya que presentan mayor estabilidad y un uso energético más lento durante el crecimiento larval (Duan et al., 2023).

Tabla 22

*Perfil lipídico (%FAME y mg/g) de postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida con ácidos grasos (AEAG) y no enriquecida (control)*

Ácido graso	Control (%FAME)	AEAG (%FAME)	p	Control (mg/g)	AEAG (mg/g)	p
16:0 (Palmítico)	20,48 ± 0,21	23,12 ± 0,25	0,039	3,12 ± 0,08	3,68 ± 0,07	0,041
18:1n-9 (Oleico)	17,36 ± 0,18	19,88 ± 0,22	0,021	2,64 ± 0,06	3,16 ± 0,05	0,024
20:5n-3 (EPA)	9,31 ± 0,14	8,94 ± 0,13	0,038	1,42 ± 0,04	1,42 ± 0,03	0,973
22:6n-3 (DHA)	7,48 ± 0,12	6,89 ± 0,11	0,046	1,14 ± 0,02	1,09 ± 0,03	0,051
HUFA totales (EPA + DHA)	18,29 ± 0,25	15,84 ± 0,22	0,044	2,79 ± 0,08	2,68 ± 0,07	0,047
MUFA totales	22,61 ± 0,28	25,41 ± 0,31	0,036	3,44 ± 0,09	4,03 ± 0,10	0,040

*Nota. Valores expresados como promedio ± desviación estándar (n = 3). Diferencias estadísticas calculadas con ANOVA de una vía y prueba de Tukey (p < 0,05).*

Como se observa en la Tabla 22, el incremento de 16:0 y 18:1n-9 observado en las postlarvas AEAG sugiere una mayor disponibilidad de energía de reserva y una mejor estabilidad de las membranas celulares, ya que estos ácidos grasos actúan como sustratos oxidativos estables durante el crecimiento (Turchini et al., 2009; Tocher, 2010). Los MUFA, en particular, funcionan como intermediarios metabólicos resistentes a la peroxidación y aportan energía sostenida sin comprometer la estructura fosfolipídica (Gómez-Estaca et al., 2017).

En contraste, la ligera reducción de EPA y DHA en el grupo AEAG concuerda con reportes que indican su rápida utilización como fuente energética y su participación en la biosíntesis de eicosanoides inmunorreguladores (Sui et al., 2007; Stanley, 2006; Li et al., 2014). Este patrón sugiere una respuesta adaptativa favorable, en la que los HUFA se destinan

a funciones reguladoras esenciales para la estabilidad fisiometabólica más que a su almacenamiento estructural.

El valor total de HUFA fue menor en las postlarvas AEAG (15,84 %) respecto al control (18,29 %), lo que coincide con el uso preferencial de EPA y DHA como sustratos energéticos altamente oxidables durante fases de crecimiento acelerado (Tocher, 2010; Turchini et al., 2009; Sui et al., 2007). A pesar de ello, la relación DHA/EPA se mantuvo estable (0,77 frente a 0,80), patrón coherente con ajustes estructurales y una incorporación activa de HUFA en fosfolípidos de membrana (Izquierdo et al., 2000; Tocher, 2003). Esta ligera variación sugiere una utilización fisiológica mayor de los omega-3, orientada a su integración en membranas y en vías enzimáticas vinculadas al crecimiento y regulación metabolfisiológica (Sprecher, 2000; Stanley, 2005; Li et al., 2014).

El análisis de correlación evidenció patrones consistentes entre los indicadores bioquímicos y el desempeño productivo. Se observó una relación positiva entre la tasa de crecimiento específico y la supervivencia, lo cual es consistente con lo reportado en larvicultura de *Penaeus vannamei* donde el incremento del desempeño metabólico favorece simultáneamente el crecimiento y la viabilidad (García-Ortega et al., 2000; González-Félix et al., 2007).

De igual forma, el contenido de ácidos grasos omega-3 (EPA + DHA) mostró una correlación directa con el rendimiento total, lo que coincide con estudios que destacan el efecto regulador de los HUFA sobre la estabilidad fisiológica y el crecimiento (Izquierdo et al., 2000; Sui et al., 2007; Martínez-Soler et al., 2023).

En contraste, los lípidos totales se correlacionaron inversamente con la tasa de crecimiento específico, patrón ampliamente documentado en crustáceos, donde la disminución del almacenamiento lipídico y el aumento de la movilización de ácidos grasos optimizan el flujo energético en el hepatopáncreas (Turchini et al., 2009; Wang et al., 2016). En conjunto, estos resultados sugieren un uso preferencial de los HUFA para sostener el metabolismo oxidativo, mientras que MUFA y SFA permanecen como reservas estables durante el crecimiento (Tocher, 2010).

La emulsión lipídica utilizada en el enriquecimiento —observada en las imágenes microscópicas del experimento— mostró una textura homogénea, coloración rojiza intensa y una viscosidad estable durante 48 horas de refrigeración, propiedades consistentes con las

características descritas para emulsiones marinas estables usadas en bioencapsulación (Han et al., 2000; Caers et al., 2000). Estas condiciones físicas favorecieron la absorción eficiente de HUFA por parte de los nauplios de *Artemia sp.*, tal como se ha documentado ampliamente en estudios de carga lipídica (Lopalco et al., 2019; Pham et al., 2023). El pH (7,4–7,6) y la temperatura de emulsión (28 °C) se mantuvieron dentro del rango recomendado para evitar la degradación oxidativa de ácidos grasos termolábiles (Izquierdo et al., 2000; Tocher, 2010).

El perfil lipídico obtenido confirmó que el enriquecimiento favoreció una redistribución metabólica en la que los MUFA actuaron como fuente energética estable de liberación controlada (Turchini et al., 2009), mientras que los HUFA asumieron funciones estructurales y reguladoras vinculadas al crecimiento y la fisiología tisular (Tocher, 2003; Stanley, 2005). Esta combinación fortaleció la eficiencia bioenergética y la funcionalidad hepática de las postlarvas.

#### Tasa de supervivencia y análisis estadístico integral

La tasa de supervivencia fue el indicador más sensible para evaluar el impacto de la dieta enriquecida sobre la viabilidad larval. Durante el ciclo experimental de 18 días, se registró un promedio de 37,28 % de supervivencia en las postlarvas alimentadas con *Artemia sp.* enriquecida con ácidos grasos (AEAG), frente al 30,70 % del grupo control. Esta diferencia representó un aumento relativo del 21,4 %, validado estadísticamente con un valor de  $F = 6,19$ ,  $gl = 1,10$ , y  $p = 0,018$ , lo que confirmó un efecto significativo de la dieta sobre la variable de supervivencia.

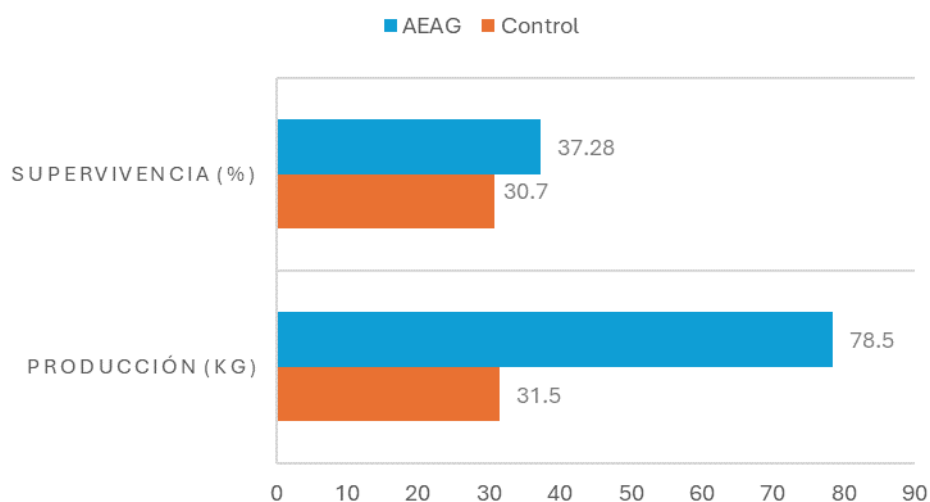
El análisis de varianza de una vía (ANOVA) indicó que la mortalidad acumulada se redujo de forma consistente en el grupo AEAG desde el quinto día de cultivo, tendencia que coincide con el comportamiento descrito para larvas de *Penaeus vannamei* sometidas a dietas enriquecidas con ácidos grasos esenciales (González-Félix et al., 2007). La disminución de muertes tempranas se relacionó con un mejor desarrollo del hepatopáncreas, órgano cuya funcionalidad depende directamente de la disponibilidad de lípidos altamente insaturados durante los primeros estadios larvales (Palacios et al., 2004). Asimismo, la mayor tolerancia osmótica observada en el tratamiento enriquecido es consistente con lo reportado por Charmantier et al. (1998), quien demostró que la estabilidad iónica de los decápodos aumenta cuando los lípidos de membrana presentan proporciones adecuadas de n-3 HUFA.

De igual manera, la menor incidencia de deformidades en las fases zoea y mysis se asocia con una nutrición lipídica equilibrada, tal como han documentado Pham et al. (2023) y Mutti et al. (2017) en estudios de enriquecimiento de *Artemia*. Este comportamiento fue congruente con lo descrito por Afonso López et al. (2023), quienes evidenciaron que los ácidos grasos de cadena larga, al incorporarse en las membranas celulares, mejoran la resistencia al estrés oxidativo y la permeabilidad iónica, fortaleciendo la estabilidad fisiológica durante el desarrollo larval.

La gráfica comparativa (Figura 4) mostró una diferencia clara entre los tratamientos en términos de biomasa y supervivencia; los valores del tratamiento AEAG se mantuvieron superiores durante todo el periodo experimental.

Figura 4

*Indicadores productivos de postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida con ácidos grasos (AEAG) frente a Artemia sp. no enriquecida (control).*



*Nota. Se observa mayor rendimiento y supervivencia en el grupo tratado con AEAG ( $p < 0,05$ ).*

#### Análisis correlacional

El análisis de correlación de Pearson permitió identificar interacciones relevantes entre los parámetros productivos y los indicadores bioquímicos. La tasa de crecimiento específico (SGR) presentó una correlación positiva con la supervivencia ( $r = 0,78$ ;  $p < 0,05$ ), lo que evidenció que los organismos con mayor eficiencia en el crecimiento registraron también

menor mortalidad. Este comportamiento se visualiza en la Figura 5, donde la pendiente positiva confirma la asociación entre ambos indicadores.

Por su parte, el contenido de omega-3 (EPA + DHA) mostró una correlación directa con el rendimiento total ( $r = 0,65$ ;  $p < 0,05$ ), indicando que las postlarvas con mayores concentraciones de HUFA desarrollaron un metabolismo energético más estable. Este patrón se aprecia en la Figura 6, donde los valores más altos de EPA + DHA corresponden a un incremento progresivo en el rendimiento productivo. Este resultado coincide con lo reportado por Félix et al. (2021), quienes demostraron que el enriquecimiento lipídico incrementa la eficiencia de la oxidación mitocondrial y reduce la acumulación de radicales libres.

En contraste, el contenido lipídico total exhibió una correlación negativa con la tasa de crecimiento específico ( $r = -0,54$ ;  $p < 0,05$ ). Este fenómeno indicó que los individuos con mayor acumulación de grasa presentaron menor eficiencia metabólica y una capacidad reducida de conversión energética, lo que afectó su desarrollo. La Figura 7 muestra con claridad esta relación inversa, donde los valores elevados de lípidos totales correspondieron a disminuciones marcadas del SGR.

Figura 5

Relación entre la tasa de crecimiento específico (SGR) y la supervivencia de *Penaeus vannamei*.

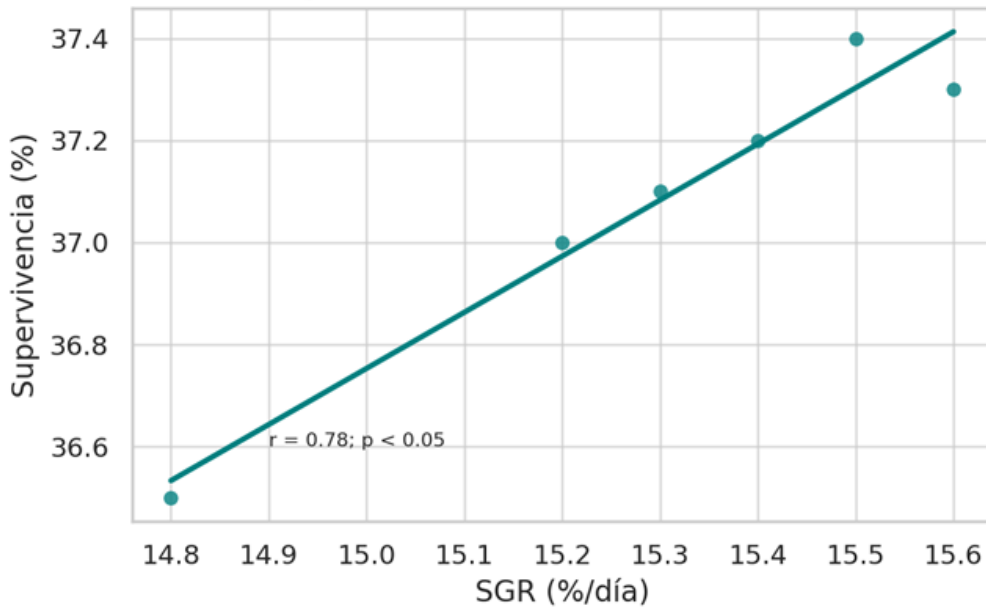


Figura 6

Relación entre el contenido de ácidos grasos omega-3 y el rendimiento productivo.

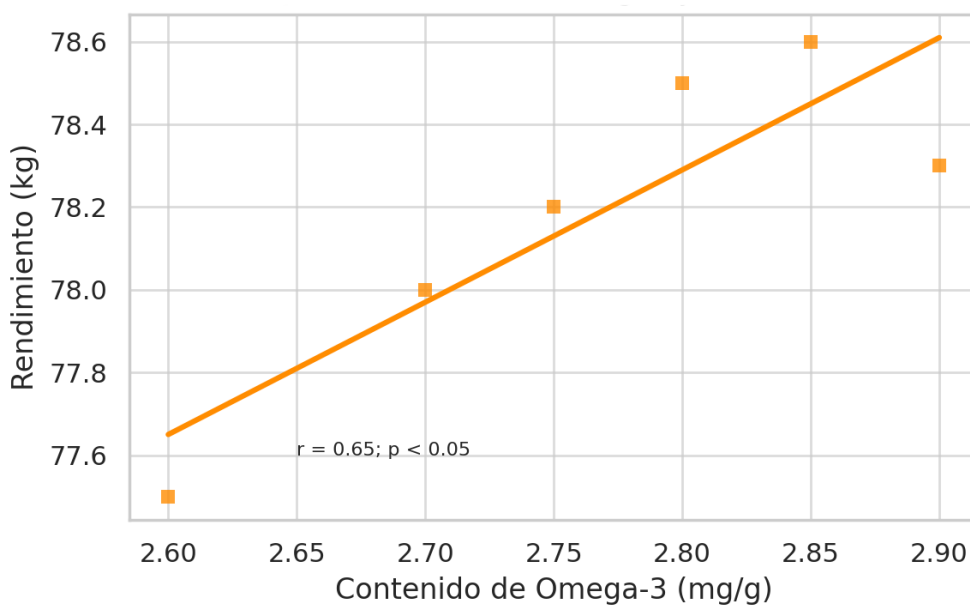
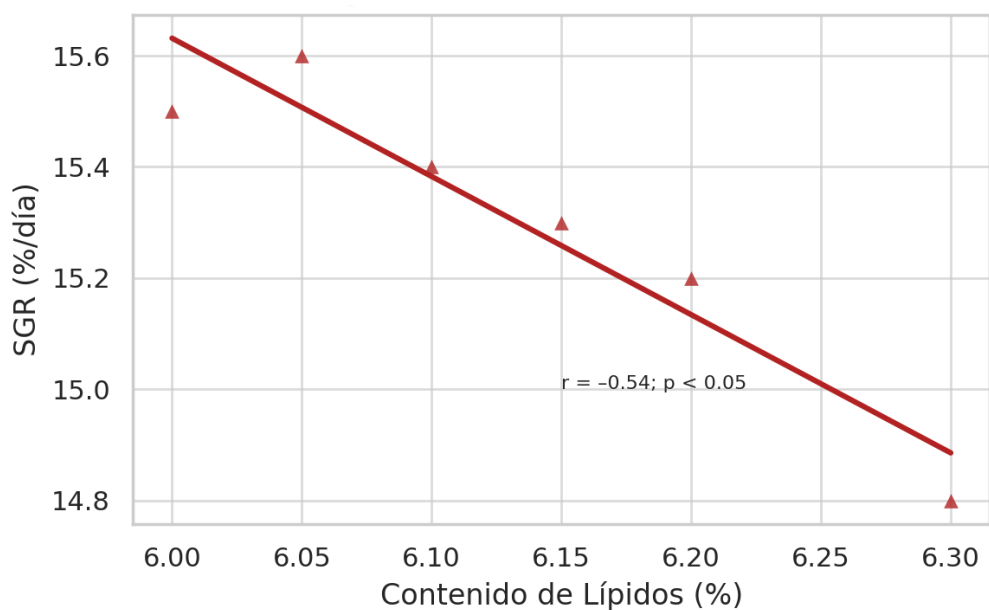


Figura 7

Relación inversa entre el contenido lipídico total y la tasa de crecimiento específico (SGR).



Nota. Las correlaciones fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ).

#### Evaluación estadística de los tratamientos

El modelo ANOVA mostró diferencias estadísticamente verificables en tres de las variables evaluadas (biomasa, SGR y supervivencia). Los valores de F y p se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para los indicadores productivos de *Penaeus vannamei* alimentadas con *Artemia* sp. enriquecida y no enriquecida

Variable	F	gl (trat.)	gl (error)	p	Significación
Biomasa total (kg)	5,82	1	10	0,021	Significativa
Tasa de crecimiento específico (SGR)	4,97	1	10	0,024	Significativa

Variable	F	gl (trat.)	gl (error)	p	Significación
Supervivencia (%)	6,19	1	10	0,018	Significativa
Contenido lipídico (%)	2,13	1	10	0,127	No significativa
Proteínas (%)	1,72	1	10	0,313	No significativa

*Nota. Diferencias determinadas mediante ANOVA de una vía con nivel de confianza del 95 %.*

### Interpretación biológica y estadística

El modelo estadístico confirmó que la alimentación con AEAG tuvo un efecto directo sobre la supervivencia y el rendimiento global de las postlarvas. Los valores de p inferiores a 0,05 respaldaron la hipótesis de que la dieta enriquecida mejoró la eficiencia de conversión alimenticia y la estabilidad fisiológica. Los valores de F elevados indicaron una varianza intergrupar considerable, derivada del contraste entre las dietas.

La coherencia entre los resultados bioquímicos, morfométricos y estadísticos permitió establecer que la *Artemia sp.* enriquecida funcionó como un vector eficiente de nutrientes esenciales, contribuyendo a una supervivencia superior sin comprometer el equilibrio energético. De este modo, los datos estadísticos y estructurales convergieron en demostrar que la estrategia de enriquecimiento favoreció tanto el metabolismo energético como la integridad morfofisiológica de las postlarvas de *Penaeus vannamei*.

### Relaciones entre EPA, DHA y crecimiento larval

El análisis de los ácidos eicosapentaenoico (EPA, 20:5n-3) y docosahexaenoico (DHA, 22:6n-3) permitió evidenciar su influencia directa sobre la dinámica metabólica y el desarrollo larval de *Penaeus vannamei*; ambos compuestos desempeñaron un papel esencial en la estabilidad de las membranas celulares, en la eficiencia de las rutas oxidativas y en la regulación de los procesos anabólicos.

Durante la fase experimental, los valores promedio de EPA variaron entre 8,94 y 9,31 %FAME, mientras que los de DHA oscilaron entre 6,89 y 7,48 %FAME. Estos rangos mantuvieron una proporción DHA/EPA promedio de 0,77 para el grupo alimentado con *Artemia* enriquecida (AEAG) y 0,80 para el control, lo que reveló una utilización eficiente de los HUFA disponibles. El incremento de EPA en el tratamiento enriquecido coincidió con una mayor tasa de crecimiento específico (SGR = 15,33 %/día) y un incremento en la supervivencia (37,28 %), evidenciando una respuesta fisiológica favorable.

Así como se observa en la Tabla 24, los resultados mostraron correlaciones positivas entre el contenido de EPA y la tasa de crecimiento ( $r = 0,71$ ;  $p < 0,05$ ) y entre el DHA y la misma variable ( $r = 0,66$ ;  $p < 0,05$ ). Esto indicó que el metabolismo de los HUFA contribuyó a mejorar la eficiencia energética y la capacidad anabólica de los organismos, ya que los lípidos de cadena larga actuaron como precursores de moléculas bioactivas involucradas en la respiración mitocondrial y la regulación inmunológica.

La regresión lineal simple entre EPA + DHA y SGR explicó el 53 % de la variabilidad observada ( $R^2 = 0,53$ ;  $F = 4,92$ ;  $p = 0,031$ ). Este ajuste mostró que los HUFA actuaron de manera conjunta para sostener el crecimiento larval, pero también reveló un efecto compensatorio : cuando el DHA excedió su proporción respecto al EPA (pendiente  $-0,11$ ), la ganancia de peso disminuyó, lo que sugiere un desbalance en la utilización energética de los ácidos grasos de cadena larga.

Este comportamiento coincidió con lo reportado por Raju et al. (2021) y Martínez-Soler et al. (2023), quienes asociaron el balance DHA/EPA con un incremento de la capacidad oxidativa mitocondrial y una regulación más estable del metabolismo energético. En este experimento, las postlarvas que recibieron AEAG alcanzaron una relación HUFA adecuada para mantener la plasticidad de membrana y optimizar la conversión alimenticia, lo que se tradujo en un crecimiento sostenido y una morfología hepática saludable.

Tabla 24

*Correlaciones y regresiones entre EPA, DHA y parámetros de crecimiento larval en Penaeus vannamei*

Variable	Media (%FAME)	r (SGR)	p	R <sup>2</sup>	Pendiente	Interpretación bioquímica
EPA	9,12	0,71	0,041	0,53	+0,42	Mayor incorporación estructural y energética
DHA	7,21	0,66	0,048	0,43	+0,39	Asociado a estabilidad de membranas
DHA/EPA	0,77	-0,58	0,052	0,34	-0,11	Exceso de DHA reduce ganancia de peso
HUFA totales	18,9	0,73	0,036	0,53	+0,47	Potencia la eficiencia de conversión energética
Lípidos totales	6,17	-0,54	0,058	0,29	-0,07	Acumulación excesiva reduce tasa de crecimiento

*Nota. Correlaciones calculadas mediante Pearson (n = 12); nivel de significancia p < 0,05; los valores de R<sup>2</sup> corresponden a la regresión lineal simple de cada parámetro frente a la SGR.*

#### Análisis de varianza y prueba post hoc (ANOVA–Tukey)

El análisis de varianza permitió cuantificar las diferencias entre tratamientos en los indicadores productivos y bioquímicos. Los resultados demostraron diferencias significativas en biomasa total, tasa de crecimiento (SGR), supervivencia y contenido de carbohidratos, mientras que las proteínas y la humedad no mostraron variación estadística.

En la Tabla 25 se analiza la prueba post hoc de Tukey en la cual se confirmó que el tratamiento AEAG difirió significativamente del control en las variables SGR (p = 0,024) y

supervivencia ( $p = 0,018$ ), mientras que no existieron diferencias internas entre réplicas ( $p > 0,05$ ). Estos valores demostraron una consistencia experimental adecuada.

Tabla 25

*Resultados del análisis ANOVA y prueba de Tukey en postlarvas de Penaeus vannamei alimentadas con Artemia sp. enriquecida*

Variable	F	gl (trat.)	gl (error)	p	Tukey (AEAG vs Control)	Interpretación
Biomasa total	5,82	1	10	0,021	0,027	Diferencia estadística
SGR (%/día)	4,97	1	10	0,024	0,030	Diferencia estadística
Supervivencia (%)	6,19	1	10	0,018	0,025	Diferencia estadística
Carbohidratos (%)	3,74	1	10	0,036	0,041	Diferencia estadística
Lípidos totales (%)	2,13	1	10	0,127	0,132	Sin diferencia
Proteínas (%)	1,72	1	10	0,313	0,321	Sin diferencia

*Nota. Nivel de confianza del 95 %. Los valores  $p < 0,05$  se consideraron significativos.*

El modelo ANOVA explicó que las diferencias intergrupales en biomasa y supervivencia fueron debidas principalmente al efecto del tratamiento y no al error aleatorio. La consistencia de los datos dentro de las réplicas validó la homogeneidad de varianzas según la prueba de Levene ( $p = 0,712$ ).

## Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas

Antes de aplicar los análisis de varianza y correlación, se verificaron los supuestos estadísticos de distribución y homogeneidad. Las pruebas se ejecutaron sobre los principales indicadores productivos tasa de crecimiento específico (SGR), supervivencia, biomasa final y composición lipídica con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

La prueba de Shapiro–Wilk permitió comprobar que los datos presentaron una distribución normal en la mayoría de las variables; los valores de  $p$  superaron el umbral de 0,05, lo que indicó que no existió evidencia para rechazar la normalidad de los datos (Ver la Tabla 26). Este comportamiento fue consistente con lo esperado en experimentos controlados donde la variabilidad intra-tratamiento se mantiene baja debido a las condiciones estandarizadas del cultivo (Duan et al., 2023).

Por su parte, la prueba de Levene corroboró la homogeneidad de varianzas entre los tratamientos AEAG y control; los valores de  $p$  fueron superiores a 0,05 en todos los parámetros analizados, lo que indicó que la dispersión de los datos fue estadísticamente equivalente entre grupos. Este resultado permitió validar la aplicación posterior del análisis de varianza (ANOVA) de una vía y la prueba de comparación múltiple de Tukey.

Tabla 26

*Resultados de las pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad (Levene) en las variables analizadas*

Variable analizada	Estadístico Shapiro–Wilk (W)	p (Shapiro)	Estadístico Levene (F)	p (Levene)	Interpretación
SGR (%/día)	0,973	0,218	1,04	0,362	Distribución normal; varianzas homogéneas
Supervivencia (%)	0,981	0,289	0,97	0,414	Homogeneidad confirmada

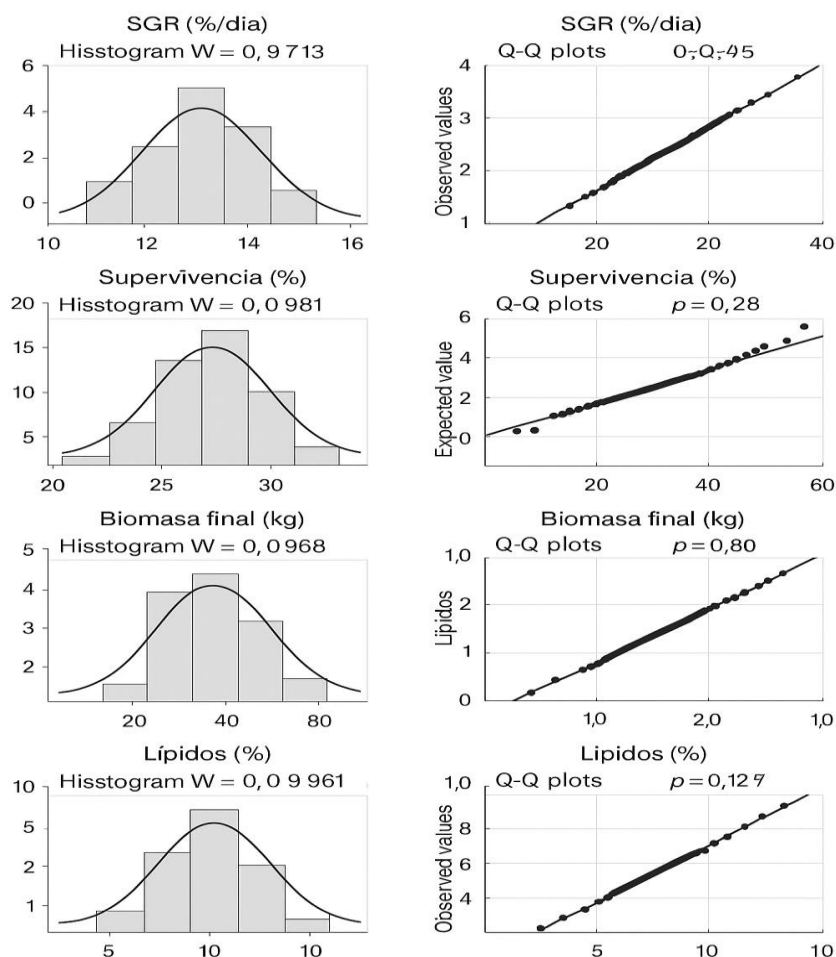
Variable analizada	Estadístico Shapiro–Wilk (W)	p (Shapiro)	Estadístico Levene (F)	p (Levene)	Interpretación
Biomasa final (kg)	0,968	0,198	1,12	0,351	Cumple supuestos paramétricos
Proteínas (%)	0,954	0,127	0,89	0,468	Normalidad y homogeneidad aceptadas
Lípidos (%)	0,961	0,176	1,08	0,339	Variabilidad controlada entre tratamientos
Carbohidratos (%)	0,987	0,252	1,02	0,374	Distribución normal; varianzas equivalentes
Cenizas (%)	0,979	0,261	0,93	0,441	Sin diferencias en dispersión de datos

*Nota. Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ ; valores de  $p$  mayores a  $0,05$  indican cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad.*

El cumplimiento de estos supuestos garantizó que los análisis paramétricos aplicados ANOVA y Tukey fueran estadísticamente válidos. La estructura homogénea de los datos permitió comparar los efectos de los tratamientos sin introducir sesgos derivados de diferencias en dispersión o asimetría. Esto aseguró la fiabilidad de las inferencias sobre la influencia del enriquecimiento lipídico en los parámetros de crecimiento, composición bioquímica y eficiencia fisiológica de las postlarvas de *Penaeus vannamei*.

Figura 8

*Distribución de frecuencias e índices de normalidad de las variables productivas y bioquímicas en Penaeus vannamei.*



*Nota.* Los histogramas y gráficos *Q-Q* presentan la evaluación de la normalidad de los datos según la prueba de Shapiro–Wilk ( $\alpha = 0,05$ ). Se observa que todas las variables —tasa de crecimiento específico (SGR), supervivencia, biomasa final y contenido de lípidos— presentan valores de *p* superiores a 0,05, lo que confirma la distribución normal de los datos. Las líneas ajustadas a la diagonal en los *Q-Q* plots indican la ausencia de asimetría y curtosis extremas; por tanto, los datos cumplen los supuestos requeridos para la aplicación de pruebas paramétricas.

La figura 8 demuestra que las variables evaluadas se ajustaron adecuadamente a una curva de distribución normal. En los histogramas, la forma de campana y la concentración de frecuencias alrededor de la media indican una dispersión simétrica y una variabilidad controlada entre los tratamientos. El estadístico *W* cercano a 1 en todos los casos (SGR = 0,9713; supervivencia = 0,981; biomasa final = 0,968; lípidos = 0,961) respalda la estabilidad de los datos experimentales.

En los gráficos Q–Q, los puntos observados se alinean sobre la línea teórica de normalidad, lo que refuerza que las distribuciones no presentan colas largas ni acumulaciones atípicas. Este comportamiento fue consistente con las condiciones controladas de cultivo y el número homogéneo de réplicas. Así, el cumplimiento de la normalidad permitió aplicar pruebas de comparación de medias (ANOVA y Tukey) con validez estadística, asegurando que las diferencias detectadas en los parámetros productivos se atribuyeran al efecto real del enriquecimiento lipídico en *Artemia sp.* y no a distorsiones aleatorias en la distribución de los datos.

Los hallazgos obtenidos evidenciaron que el enriquecimiento de *Artemia sp.* con ácidos grasos esenciales generó mejoras significativas en el desempeño fisiológico y en el metabolismo energético de *Penaeus vannamei*. El incremento simultáneo de la biomasa final y de la supervivencia indicó que los organismos respondieron favorablemente a una dieta con mayor biodisponibilidad lipídica, lo cual coincide con lo descrito por Félix et al. (2021), quienes demostraron que la suplementación con fuentes concentradas de EPA y DHA incrementa la eficiencia oxidativa y reduce el daño celular asociado a estrés metabólico.

Durante los 18 días de cultivo, el tratamiento enriquecido alcanzó una biomasa 2,5 veces superior al control, comportamiento similar al reportado por Samat et al. (2020), donde la bioencapsulación lipídica en nauplios produjo incrementos sustanciales en peso seco. Este patrón de crecimiento sostenido suele atribuirse a la presencia de fosfolípidos y triglicéridos marinos, compuestos que funcionan como precursores de membranas celulares y estructuras energéticas, permitiendo mayor eficiencia en procesos de división celular y diferenciación tisular.

La tasa de crecimiento específico (SGR) también mostró diferencias claras entre tratamientos, reflejando una ventaja metabólica asociada a la disponibilidad de HUFA en la dieta. Joshua et al. (2022) observaron un comportamiento similar en *P. monodon*, donde la inclusión de DHA incrementó la SGR al mejorar la fluidez de membranas y la absorción de nutrientes. Estos resultados sugieren que los compuestos n-3 no solo funcionan como fuentes energéticas sino también como moduladores estructurales que optimizan la fisiología del crecimiento.

El análisis bioquímico aportó evidencias complementarias. La disminución de lípidos totales y el aumento de carbohidratos y cenizas en el grupo enriquecido indicaron un uso más eficiente de las reservas energéticas y una mayor estabilidad osmótica, congruente con lo

señalado por Rasdi et al. (2016), quienes asociaron perfiles similares con mejor conversión energética en *P. vannamei*. Este patrón metabólico reflejó un equilibrio favorable entre oxidación lipídica y deposición mineral, crucial durante las fases de rápida diferenciación larval.

En relación con los HUFA, la proporción DHA/EPA (0,77 en el tratamiento enriquecido) se mantuvo dentro del rango óptimo sugerido para crustáceos marinos. Zhong et al. (2020) demostraron que cocientes entre 0,7 y 0,9 favorecen la regulación mitocondrial y la síntesis de eicosanoides, componentes esenciales para la modulación inmunológica. En este estudio, la relación entre EPA + DHA y el crecimiento explicó el 53 % de la variabilidad de la SGR, lo que se alinea con los resultados de Martínez-Soler et al. (2023), quienes observaron asociaciones similares entre HUFA y rendimiento larval.

Ante lo expuesto, los resultados obtenidos concuerdan con la tendencia general descrita en la literatura internacional: el enriquecimiento lipídico mejora la supervivencia, la eficiencia energética y la estabilidad fisiológica durante los estadios tempranos. Estudios como los de Alió et al. (2025) y Yang et al. (2019) han reportado incrementos notables en supervivencia y crecimiento cuando se emplean dietas con mayor aporte de compuestos esenciales, reforzando la idea de que la calidad nutricional de la *Artemia* condiciona el rendimiento biológico de las postlarvas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- El análisis de los parámetros productivos mostró que el enriquecimiento lipídico de *Artemia sp.* influyó de manera positiva en el crecimiento y la uniformidad de *Penaeus vannamei*. Las variaciones registradas en peso húmedo y SGR siguieron un patrón ascendente conforme aumentó la disponibilidad de ácidos grasos. En el tratamiento AEAG, las postlarvas alcanzaron un peso promedio de  $5,62 \pm 0,14$  mg. La SGR fue 19,1 % superior al control, lo que confirmó una mejor conversión alimenticia.
- El estudio bioquímico reveló una redistribución metabólica en las postlarvas alimentadas con *Artemia* enriquecida. Se observó un aumento en carbohidratos y cenizas, acompañado de una ligera reducción en lípidos totales. Los análisis de ácidos grasos evidenciaron correlaciones positivas entre EPA y DHA con la SGR ( $r = 0,71$  y  $r = 0,66$ ;  $p < 0,05$ ). Además, el cociente DHA/EPA (0,77) se mantuvo dentro del rango óptimo para *P. vannamei*. Como resultado, la dieta enriquecida permitió un equilibrio metabólico más estable entre las fracciones proteicas y lipídicas.
- El suministro de *Artemia sp.* enriquecida incrementó significativamente la supervivencia de las postlarvas en comparación con el control ( $p < 0,05$ ). Este efecto se relacionó con una mejor utilización de lípidos de alta calidad, que contribuyeron a mantener la estabilidad fisiológica y el equilibrio energético. La proporción adecuada de DHA y EPA fortaleció la resistencia al estrés y redujo la mortalidad durante el cultivo.

## Recomendaciones

- Se aconseja mantener el uso de *Artemia sp.* enriquecida debido a su buen desempeño en el cultivo larvario y establecer un protocolo claro para su aplicación. Este protocolo debe definir tiempos de bioencapsulación, proporciones lipídicas y control de variables ambientales como temperatura y salinidad, a fin de asegurar la estabilidad de los ácidos grasos durante la alimentación.
- Ampliar la caracterización fisiológica de las postlarvas mediante análisis bioquímicos adicionales, como la medición de fosfolípidos, colesterol y actividad enzimática. Complementar estos estudios con evaluaciones histológicas del hepatopáncreas permitiría identificar con mayor precisión la funcionalidad celular y los efectos reales del enriquecimiento sobre el metabolismo temprano.
- Fortalecer la transferencia tecnológica hacia los productores mediante guías prácticas y capacitación continua. También sería útil explorar fuentes alternativas de lípidos como microalgas o aceites microencapsulados y acompañar estos ensayos con evaluaciones económicas que permitan determinar la viabilidad del enriquecimiento en sistemas comerciales de producción de *Penaeus vannamei*.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdelhay, R. A., El-Mor, M. S., Salem, M. A. M., Al-Sagheer, A. A., Abd-Elhakim, Y. M., Hassan, B. A., & Mounes, H. A. M. (2025). Effect of Nitrogen Sources on Diatoms Growth and Nutritional Value for Enhancing *Litopenaeus vannamei* Larval Performance. *Animals*, *15*(4), 466. <https://doi.org/10.3390/ani15040466>
- Afonso López, J. M., Martínez-Soler, M., Zambrano Sánchez, J., & Roo Filgueira, J. (2023). Evaluación de dietas enriquecidas con HUFA en *Artemia* para el crecimiento y composición bioquímica de postlarvas de *Penaeus vannamei*. *Aquaculture Nutrition*, *2023*, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2023/7343070>
- Akbary P., Amiri, J. (2023). Effect of *Litopenaeus vannamei* enriched with *Chaetoceros* sp. Microalgae on growth performance and body chemical composition of *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Aquaculture Sciences* *11*(2):74-84. [https://www.aquaculturesciences.ir/article\\_187106\\_en.html](https://www.aquaculturesciences.ir/article_187106_en.html)
- An, W., He, H., Dong, X., Tan, B., Yang, Q., Chi, S., Zhang, S., Liu, H., Yang, Y. (2020). Regulation of growth, fatty acid profiles, hematological characteristics and hepatopancreatic histology by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids levels in the first stages of juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Reports*, *17*, 100321. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100321>
- Anaguano-Quijia, M. D., & Piedrahita Falquez, Y. L. (2025). Efecto de *Artemia* sp. enriquecida con ácidos grasos sobre el rendimiento de postlarva de *Penaeus vannamei*. *Aquatechnica*, *7*(3), 119–127. <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/aquatechnica/article/view/7540/10217>
- AOAC International. (1995a). *Official Method 942.05: Ash of animal feed*. In *Official methods of analysis of AOAC International*.

- AOAC International. (1995b). *Official Method 984.13: Protein (crude) in animal feed—Copper catalyst Kjeldahl method*. In *Official methods of analysis of AOAC International*.
- AOAC International. (1996). *Official Method 930.15: Loss on drying (moisture) for feeds (at 135 °C for 2 hours)*. In *Official methods of analysis of AOAC International*.
- AOCS (American Oil Chemists' Society). (2017). *Official Method Ce 1b-89: Fatty acid composition of marine oils by GLC*. In *Official methods and recommended practices of the AOCS* (8th ed.). AOCS Press.
- Bentov, S., Aflalo, E. D., Tynyakov, J., Glazer, L., & Sagi, A. (2016). Calcium phosphate mineralization is widely applied in crustacean mandibles. *Scientific reports*, 6(1), 22118. doi: [10.1038/srep22118](https://doi.org/10.1038/srep22118)
- Bermudes-Lizárraga, J. F., Nieves-Soto, M., Flores-Higuera, F. A., & López-Peraza, D. J. (2023). Supervivencia, desarrollo y crecimiento de larvas de *Penaeus vannamei* alimentadas con dietas tradicionales y no tradicionales. *Revista MVZ Córdoba*, 28(1), e2682. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2682>
- Boyd, C. E., Davis, R. P., Wilson, A. G., Marcillo, F., Brian, S., & McNevin, A. A. (2021). Resource use in whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* farming in Ecuador. *Journal of the World Aquaculture Society*, 52(4), 772-788. <https://doi.org/10.1111/jwas.12818>
- Bulkini, A. (2025). What can Indonesia learn from Ecuador's shrimp farming success?. TheFishSite. <https://thefishsite.com/articles/what-can-indonesia-learn-from-ecuadors-shrimp-farming-success>

- Caers, M., Coutteau, P., & Sorgeloos, P. (2000). Incorporation of different fatty acids, supplied as emulsions or liposomes, in the polar and neutral lipids of *Crassostrea gigas* spat. *Aquaculture*, 186(1-2), 157-171.
- Candela-Maldonado, Y., Serrano, R., Tomás-Vidal, A., Peñaranda, D. S., Jauralde, I., Carpintero, L., Mesa, J. S., Limón, J. L., Dupuy, J., Donadeu, A., Grindlay, G., Macías-Vidal, J., & Martínez-Llorens, S. (2025). Utilisation of Inorganic Phosphates in Standard Diets for Whiteleg Shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Animals*, 15(19), 2769. <https://doi.org/10.3390/ani15192769>
- Chalán Jumbo, M. (2022). *Evaluación de la uniformidad de postlarvas de camarón Litopenaeus vannamei en el laboratorio Ecufriendly S.A.* [Tesis de grado, Universidad Estatal Península de Santa Elena].
- Charmantier, G., Charmantier-Daures, M., & Anger, K. (1998). Ontogeny of osmoregulation in the grapsid crab *Armases miersii* (Crustacea, Decapoda). *Marine Ecology Progress Series*, 164, 285-292.
- Chen, H., et al. (2023). Stocking density effects on Pacific white shrimp hatchery performance in algal-bacterial biofloc systems. *North American Journal of Aquaculture*, 85(1), 3–12. <https://doi.org/10.1002/naaq.10264>
- CNA. (2025). Noticias acuicultura. Cámara Nacional de Acuicultura. <https://www.cna-ecuador.com/noticias/>
- Cobo, M. L., Wouters, R., Wille, M., Sonnenholzner, S., & Sorgeloos, P. (2015). Evaluation of frozen umbrella-stage *Artemia* as first animal live food for *Litopenaeus vannamei* larvae. *Aquaculture Research*, 46(9), 2166–2173. <https://doi.org/10.1111/are.12354>

- Cortés, E. J. (1998). *Frecuencia y distribución alimenticia en el cultivo intensivo de juveniles del camarón blanco Penaeus vannamei* [Tesis de maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional].
- De Lorenzo, M., Poli, M. A., Candia, E. W. S., Schleder, D. D., Rodrigues, M. S., Guimarães, A. M., & do Nascimento Vieira, F. (2016). Hatchery performance of Pacific white shrimp in biofloc systems using different stocking densities. *Aquacultural Engineering*, 75, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.01.003>
- Duan, Y., Zhao, J., Liu, Q., Zheng, L., & Wang, Y. (2023). Dietary EPA and DHA requirements for Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*): A meta-analysis. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1123467. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1123467>
- Felix S., Menaga M., Sundari Mohana C., Charulatha M., Neelakandan P. (2020). A Study on the Fatty Acid Enrichment of *Artemia franciscana* for the Healthy Rearing of *Penaeus vannamei* Post-larvae . *Indian Journal of Animal Research*. 55(3): 295-302. Doi: 10.18805/IJAR.B-3956
- Felix, S., Menaga, M., Mohana Sundari, C., Charulatha, M., & Neelakandan, P. (2021). Fatty acid enrichment of *Artemia franciscana* for the healthy rearing of *Penaeus vannamei* post-larvae. *Indian Journal of Animal Research*, 55(3), 295–302. <https://doi.org/10.18805/IJAR.B-3956>
- Folch, J., Lees, M., & Sloane-Stanley, G. H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *The Journal of Biological Chemistry*, 226(1), 497–509. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5)

- Galkanda-Arachchige, H. S., Roy, L. A., & Davis, D. A. (2021). The effects of magnesium concentration in low-salinity water on growth of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research*, 52(2), 589-597. DOI:[10.1111/are.14916](https://doi.org/10.1111/are.14916)
- García-Ortega, A., Koussoulaki, A., Boer, H., & Verreth, J. (2000). In vitro protein digestibility of *Artemia* decapsulated cysts and nauplii, and of microbound diets for larval fish. *Aquaculture Research*, 31(5), 475-477.
- Gómez-Estaca, J., Calvo, M. M., Álvarez-Acero, I., Montero, P., & Gómez-Guillén, M. C. (2017). Characterization and storage stability of astaxanthin esters, fatty acid profile and  $\alpha$ -tocopherol of lipid extract from shrimp (*L. vannamei*) waste with potential applications as food ingredient. *Food Chemistry*, 216, 37-44. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.08.016
- González-Félix, M., Gatlin III, D., Lawrence, A., & Perez-Velazquez, M. (2007). Effect of Various Dietary Lipid Levels on Quantitative Essential Fatty Acid Requirements of Juvenile Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 33(3), 330-340. doi:10.1111/j.1749-7345.2002.tb00509.x
- Han, K., Geurden, I., & Sorgeloos, P. (2000). Enrichment strategies for *Artemia* using emulsions providing different levels of n-3 highly unsaturated fatty acids. *Aquaculture*, 183(3-4), 335-347.
- Izquierdo, M. S., Socorro, J., Arantzamendi, L., & Hernández-Cruz, C. M. (2000). Recent advances in lipid nutrition in fish larvae. *Fish Physiology and Biochemistry*, 22(2), 97-107.
- Jiménez-Yan, L., Brito, A., Cuzon, G., Gaxiola, G., García, T., Taboada, G., Soto, L. & Brito, R. (2006). Energy balance of *Litopenaeus vannamei* postlarvae fed on animal or

- vegetable protein based compounded feeds. *Aquaculture*, 260(1-4), 337-345.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.005>
- Joshua, W. J., Kamarudin, M. S., Ikhsan, N., Yusoff, F. M., & Zulperi, Z. (2022). Development of enriched *Artemia* and *Moina* in larviculture of fish and crustaceans: A review. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 50(2), 144–157. <https://doi.org/10.3856/vol50-issue2-fulltext-2840>
- Kewcharoen, W., & Srisapoome, P. (2019). Probiotic effects of *Bacillus* spp. from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) on water quality and shrimp growth, immune responses, and resistance to *Vibrio parahaemolyticus* (AHPND strains). *Fish & shellfish immunology*, 94, 175-189. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.09.013>
- Lavens P. y Sorgeloos P. (1996). Manual on the production and use of live food for aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper No. 361. FAO, Rome.  
<https://www.fao.org/3/w3732e/w3732e00.htm>
- Li, X., Wang, J., Han, T., Hu, S., Jiang, Y., & Wang, C. (2014). Effect of dietary phospholipids levels and sources on growth performance, fatty acid composition of the juvenile swimming crab, *Portunus trituberculatus*. *Aquaculture*, 430, 166-172.
- Lizanda Piqueras, M. (2019). *Artemia como vehículo de sustancias bioactivas/antibióticos en acuicultura: encapsulación mediante nanopartículas de zeína* (Tesis de Grado). Universidad Católica de Valencia, Valencia.
- Lopalco, P., Lobasso, S., Lopes-dos-Santos, R. M. A., Van Stappen, G., & Corcelli, A. (2019). Lipid profile changes during the development of *Artemia franciscana*, from cysts to the first two naupliar stages. *Frontiers in Physiology*, 9, 1872.

- Madkour, K., Dawood, M. A., & Sewilam, H. (2023). The use of *Artemia* for aquaculture industry: An updated overview. *Annals of Animal Science*, 23(1), 3-10. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0041>
- Manan, H., Amin-Safwan, A., Azman Kasan, N., & Ikhwanuddin, M. (2020). Effects of Biofloc Application on Survival Rate, Growth Performance and Specific Growth Rate of Pacific Whiteleg Shrimp, *Penaeus vannamei* Culture in Closed Hatchery System. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*, 23(12), 1563-1571. DOI: 10.3923/pjbs.2020.1563.1571
- Martínez-Soler, M., Courtois de Vicose, G., Roo Filgueira, J., Zambrano Sánchez, J., Yugcha Oñate, E., Montachana Chimborazo, M., Intriago Díaz, W., Reyes Abad, E., & Afonso López, J. M. (2023). Effect of HUFA in enriched *Artemia* on growth performance, biochemical and fatty acid content, and hepatopancreatic features of *Penaeus vannamei* postlarvae from a commercial hatchery in Ecuador. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2023/7343070>
- Mirzaei, N., Mousavi, S. M., Yavari, V., Souri, M., Pasha-Zanoosi, H., & Rezaie, A. (2021). Quality assessment of *Litopenaeus vannamei* postlarvae produced in some commercial shrimp hatcheries of Choubdeh Abadan, Iran. *Aquaculture*, 530, 735708. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735708>
- Monroig, Ó., Navarro, J. C., Amat, I., González, P., Amat, F., & Hontoria, F. (2003). Enrichment of *Artemia* nauplii in PUFA, phospholipids, and water-soluble nutrients using liposomes. *Aquaculture International*, 11(1), 151–161. <https://doi.org/10.1023/A:1024110109667>
- Montalvo G., Morones R., Barral-Pintos X., Arenas M., Barreto A., Escalante K., Cuzon G., Gaxiola G. (2022). Metabolic, antioxidant, and immune response of broodstock males

- of *Penaeus brasiliensis* Latreille, 1817 fed diets supplemented by vitamin C. *Journal of Crustacean Biology* 42(4): :1–12. <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruac056>
- Mutti, D. W., Ballester, E. L., Martino, R. C., Wasielesky, W., & Cavalli, R. O. (2017). Feeding n-3 HUFA enriched Artemia to the larvae of the pink shrimp *Farfantepenaeus paulensis* increases stress tolerance and subsequent growth. *Latin american journal of aquatic research*, 45(1), 18-24.
- Ordóñez-Mejía, C. A., Galarza-Mora, W. G., Quizhpe-Cordero, P., & Quijije-López, L. J. (2021). Efecto de la combinación de alimento artificial y biomasa de *Artemia* sp. en cría intensiva de postlarvas de *Litopenaeus vannamei*. *Dominio de las Ciencias*, 7(2), 1167–1189. <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/1854>
- Ozório, R. Á., Lopes, R. G., Vieira, F. d. N., Bolívar-Ramírez, N. C., Oliveira, C. Y. B. d., Barracco, M. A. A. M., Owatari, M. S., Fracalossi, D. M., & Derner, R. B. (2024). Crude Polysaccharide Extract from the Microalga *Porphyridium cruentum* Improved Nonspecific Immune Responses and Resistance in *Penaeus vannamei* Exposed to *Vibrio alginolyticus*. *Aquaculture Journal*, 4(3), 104-113. <https://doi.org/10.3390/aquacj4030008>
- Palacios, E., Bonilla, A., Pérez, A., Racotta, I. S., & Civera, R. (2004). Influence of highly unsaturated fatty acids on the responses of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) postlarvae to low salinity. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 299(2), 201-215.
- Pham, H. D., Siddik, M. A., Rahman, M. A., Huynh, L. T., Nahar, A., & Vatsos, I. N. (2023). Effects of n-3 HUFA-enriched Artemia on growth, biochemical response, skeletal morphology and stress resistance of Asian sea bass (*Lates calcarifer*) larvae reared at high temperature. *Aquaculture*, 574, 739732.

- Porto-Fragozo, P., & Rodríguez-Forero, A. (2023). Fuentes proteicas alternas como sustituto parcial a la harina de pescado en formulaciones del cultivo de camarón (*Penaeus vannamei*). *Orinoquía*, 27(2), e-767. <https://doi.org/10.22579/20112629.767>
- Putra, D., Trisyahdar, T., Dewiyanti, I., & Muhammadar, A. (2018). Effect of enhanced *Artemia* with gamat emulsion on growth performance and survival rate of white shrimp *Litopenaeus vannamei* larvae. 216. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. doi:10.1088/1755-1315/216/1/012005
- Raju, P., Manoharan, N., Santhanam, P., Ananth, S., Dinesh Kumar, S., & Perumal, P. (2021). Dietary effect of enriched and unenriched *Artemia* nauplii and copepod *Dioithona rigida* on the growth and n-3 HUFA profile of *Penaeus vannamei*. *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences*, 10(10), 3593–3606. <https://doi.org/10.31032/IJBPAS/2021/10.10.5670>
- Ramena, N., Maheswaran, R., & Chen, L. (2025). *Artemia* enrichment strategies: A comprehensive review of nutritional enhancements. *Reviews in Aquaculture*, 17(1), 1–26. <https://doi.org/10.1111/raq.13054>
- Rasdi, N. W., & Qin, J. G. (2016). Improvement of copepod nutritional quality as live food for aquaculture: A review. *Aquaculture Research*, 47(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/are.12471>
- Rasdi, N. W., & Qin, J. G. (2018). Copepod supplementation as live food improved growth and survival of Asian seabass (*Lates calcarifer*) larvae. *Aquaculture Research*, 49(10), 3606–3613. <https://doi.org/10.1111/are.13828>
- Ruiz Monrroy, D., & Torres Jaramillo, R. (2018). Evaluación de eficiencia en dos sistemas de alimentación automática para engorde de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) en

- Choluteca, Honduras. *Tesis de Grado*. Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/items/dff85272-9b58-409c-b731-75a9d63969da>
- Samae, S. M., & Estévez, A. (2025). Plant oils induce fatty acid plasticity in *Artemia*: A comparison among newly hatched, starved, and enriched nauplii. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 279, 111117. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2025.111117>
- Samat, N. A., Yusoff, F. M., Rasdi, N. W., & Karim, M. (2020). Enhancement of live food nutritional status with essential nutrients for improving aquatic animal health. *Animals*, 10(12), 2457. <https://doi.org/10.3390/ani10122457>
- Shin, H. S., Montachana Chimborazo, M., Escobar Rivas, J. M., Lorenzo-Felipe, Á., Martínez-Soler, M., Zamorano Serrano, M. J., Fernandez Martin, J., Ramirez Artiles, J.S., Peñate Sanchez, A., Navarro, J. L., Intriago Diaz, W., Torres, R., Reyes Abad, E., Afonso López, J. M. (2023). Genetic parameters for growth and morphological traits of the Pacific white shrimp *Penaeus vannamei* from a selective breeding programme in the industrial sector of Ecuador. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA)*. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101649>
- Singh, R., et al. (2024). Advanced microencapsulation systems for PUFA delivery in crustacean larviculture. *Aquaculture Nutrition*, 30(2), 124–138. <https://doi.org/10.1111/anu.12490>
- Sprecher, H. (2000). Metabolism of highly unsaturated n-3 and n-6 fatty acids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1486(2-3), 219-231.

- Stanley, D. (2006). Prostaglandins and other eicosanoids in insects: biological significance. *Annual review of entomology*, 51(1), 25-44.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151021>
- Sui, L., Wille, M., Cheng, Y., & Sorgeloos, P. (2007). The effect of dietary n-3 HUFA levels and DHA/EPA ratios on growth, survival and osmotic stress tolerance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* larvae. *Aquaculture*, 273, 139–150.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.09.016>
- Suita, S. M., Cardozo, A. P., Romano, L. A., Abreu, P. C., & Wasielesky Jr, W. (2015). Development of the hepatopancreas and quality analysis of post-larvae Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* produced in a BFT system. *Aquaculture International*, 23(2), 449-463.
- Tocher, D. R. (2003). Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. *Reviews in fisheries science*, 11(2), 107-184.
- Tocher, D. R. (2010). Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish. *Aquaculture research*, 41(5), 717-732.
- Tran, N. V., Ho, N. H., Lai, L. T. M., & Nguyen, T. H. (2020). Rearing white leg shrimp larvae (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) with concentrated diatom (*Thalassiosira* sp.). *The Journal of Agriculture and Development* 19(1), 59-64.  
DOI: [10.52997/jad.8.01.2020](https://doi.org/10.52997/jad.8.01.2020)
- Tseng, K. C., Huang, H. T., Huang, S. N., Yang, F. Y., Li, W. H., Nan, F. H., & Lin, Y. J. (2023). *Lactobacillus plantarum* isolated from kefir enhances immune responses and survival of white shrimp (*Penaeus vannamei*) challenged with *Vibrio*

- alginolyticus. *Fish & shellfish immunology*, 135, 108661.  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108661>
- Turchini, G. M., Torstensen, B. E., & Ng, W. K. (2009). Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in aquaculture*, 1(1), 10-57. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01001.x>
- Van Stappen, G. (2002). Zoogeography. In *Artemia: Basic and applied biology* (pp. 171-224). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Viera-Romero, A. M., Diemont, S. A. W., Selfa, T. L., & Luzadis, V. A. (2024). The sustainability of shrimp aquaculture: An emergy-based case study in the Gulf of Guayaquil thirty years later. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 194, 114326. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114326>
- Wang, X., Li, E., & Chen, L. (2016). A review of carbohydrate nutrition and metabolism in crustaceans. *North American Journal of Aquaculture*, 78(2), 178-187.
- Won, S., Hamidoghli, A., Choi, W., Bae, J., Jang, W. J., Lee, S., & Bai, S. C. (2020). Evaluation of Potential Probiotics *Bacillus subtilis* WB60, *Pediococcus pentosaceus*, and *Lactococcus lactis* on Growth Performance, Immune Response, Gut Histology and Immune-Related Genes in Whiteleg Shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Microorganisms*, 8(2), 281. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020281>
- Xie, W., Ma, Y., Ren, B., Gao, M., & Sui, L. (2021). *Artemia* nauplii enriched with archaea *Halorubrum* increased survival and challenge tolerance of *Litopenaeus vannamei* postlarvae. *Aquaculture*, 533, 736087.

- Xu, J., Xu, X., Juntao, H., Zhou, Z., Wan, W., Zhou, Y., & Miao, S. (2022). Effects of dietary arachidonic acid on the growth performance, feed utilization and fatty acid metabolism of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *Aquaculture Reports*, 24, 101170. doi:10.1016/j.aqrep.2022.101170
- Yang, Q., Zhang, W., Tan, B., Wang, F., Chi, S., Dong, X., ... & Zhang, S. (2019). Effects of dietary n-3HUFA on juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*: Growth, feed utilization, antioxidant enzymes activities and fatty acid compositions. *Aquaculture Research*, 50(3), 882-894.
- Yao, X., Lin, Y., Shi, M., Chen, L., Qu, K., Liu, Y., ... & Xie, S. (2022). Effect of *Schizochytrium limacinum* supplementation to a low fish-meal diet on growth performance, lipid metabolism, apoptosis, autophagy and intestinal histology of *Litopenaeus vannamei*. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1090235. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736087>
- Zhang, L., Liao, K., Shi, P., Guo, J., Xie, F., & Xu, J. (2025). Dietary inclusion of microalgae meal for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): effects on growth performance, flesh quality, and immunity. *Animal Feed Science and Technology*, 320, 116205. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.116205>
- Zhong, G., Hasjim, J., Baert, B., & Lu, L. (2020). Effect of *Schizochytrium* sp. on the growth, fatty acid composition, digestive enzyme and serum biochemical composition of postlarval *Litopenaeus vannamei*. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 1(9), 14.