

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i4.2625>

Modelación matemática del desempeño productivo de *Penaeus Vannamei* en función de variables ambientales durante la precría

*Mathematical modeling of *Penaeus Vannamei* productive performance as a function of environmental variables during the nursery phase*

Johnny Gerardo Barriga Arizabala

gbarriga@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0007-1088-112X>

Universidad Técnica de Machala

José Alejandro Campoverde Jara

jcampoverdel@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0000-8538-010X>

Universidad Técnica de Machala

Artículo recibido: 10 septiembre 2026- Aceptado para publicación: 16 octubre 2026

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

La modelación matemática constituye una herramienta útil para representar cuantitativamente las relaciones entre las condiciones ambientales y el desempeño productivo en sistemas acuícolas. La investigación tuvo como objetivo desarrollar y comparar modelos matemáticos empíricos para describir el crecimiento diario y el factor de conversión alimenticia de *Penaeus vannamei* en función de la temperatura y el oxígeno disuelto durante la fase de precría. Se analizaron 18 registros correspondientes a seis combinaciones originales de manejo evaluadas durante octubre, noviembre y diciembre de 2025 en estanques de tierra sin aireación mecánica. Para cada variable respuesta se ajustaron cuatro estructuras: modelo lineal simple, lineal múltiple, modelo con interacción y modelo polinomial cuadrático. La comparación consideró el coeficiente de determinación ajustado, RMSE, MAE, AIC, BIC y validación cruzada leave-one-out. Para el crecimiento diario, el modelo cuadrático presentó el mejor comportamiento global, con $R^2 = 0,743$, $R^2_{aj} = 0,635$ y RMSE de validación cruzada de 0,00657. Para el factor de conversión alimenticia, el modelo lineal simple basado en temperatura mostró el menor RMSE de validación cruzada, con 0,22843, a pesar de que estructuras más complejas alcanzaron mayor ajuste interno. Los resultados evidenciaron que la complejidad matemática requerida dependió de la variable productiva analizada y que la selección basada únicamente en R^2 podría favorecer modelos con menor capacidad de generalización. Las ecuaciones obtenidas deben interpretarse como aproximaciones empíricas exploratorias dentro del dominio ambiental observado.

Palabras clave: modelación matemática, *Penaeus vannamei*, temperatura, oxígeno disuelto, crecimiento

ABSTRACT

Mathematical modeling provides a useful quantitative framework for representing relationships between environmental conditions and productive performance in aquaculture systems. This study aimed to develop and compare empirical mathematical models describing daily growth and feed conversion ratio of *Penaeus vannamei* as functions of temperature and dissolved oxygen during the nursery phase. Eighteen records were analyzed, corresponding to six original management combinations evaluated during October, November, and December 2025 in earthen ponds without mechanical aeration. Four candidate structures were fitted for each response variable: simple linear, multiple linear, interaction, and quadratic polynomial models. Model comparison considered adjusted coefficient of determination, RMSE, MAE, AIC, BIC, and leave-one-out cross-validation. For daily growth, the quadratic model showed the best overall performance, with $R^2 = 0,743$, adjusted $R^2_{aj} = 0,635$, and cross-validated RMSE of 0.00657. For feed conversion ratio, the simple linear temperature-based model yielded the lowest cross-validated RMSE, 0.22843, despite more complex structures achieving better in-sample fit. The results showed that the mathematical complexity required depended on the productive response analyzed and that model selection based exclusively on R^2 could favor structures with poorer generalization. The resulting equations should be interpreted as exploratory empirical approximations within the observed environmental domain.

Keywords: mathematical modeling, *Penaeus vannamei*, temperature, dissolved oxygen, growth

INTRODUCCIÓN

La producción acuícola se desarrolla en sistemas donde las respuestas biológicas dependen de múltiples factores ambientales y de manejo. En el cultivo de camarón blanco, variables como la temperatura y el oxígeno disuelto pueden variar durante el ciclo productivo y coincidir con cambios en el crecimiento, la supervivencia y la eficiencia alimenticia. Por esta razón, además de describir estadísticamente estas relaciones, resulta de interés construir representaciones matemáticas que permitan expresar cuantitativamente el comportamiento de las variables productivas frente a las condiciones ambientales observadas.

La modelación matemática permite sintetizar relaciones entre variables mediante funciones cuyos parámetros pueden estimarse a partir de datos experimentales u observacionales. En un contexto acuícola, estos modelos pueden utilizarse para describir tendencias, comparar formas funcionales y generar superficies de respuesta. Sin embargo, la utilidad de una ecuación depende no solamente de su ajuste a los datos utilizados para estimarla, sino también de su parsimonia y de su comportamiento frente a observaciones no empleadas directamente en el ajuste.

En *Penaeus vannamei*, diferentes investigaciones han documentado relaciones entre la calidad del agua y el desempeño productivo. Akbarurrasyid et al. (2023) analizaron asociaciones entre factores ambientales y crecimiento del camarón blanco, mientras que Nazarudin et al. (2025) integraron el monitoreo ambiental con indicadores de rendimiento en un estanque de tierra semiintensivo. Posteriormente, Akbarurrasyid et al. (2026) abordaron conjuntamente calidad del agua, crecimiento, supervivencia, eficiencia alimenticia y producción de biomasa en diferentes estanques de cultivo.

La temperatura constituye una de las variables ambientales de interés para representar el comportamiento productivo del camarón, debido a su relación con procesos metabólicos y de crecimiento. No obstante, los patrones registrados pueden depender del sistema productivo y del intervalo térmico evaluado. Ramos-Torres et al. (2024), al comparar curvas de crecimiento de *Penaeus vannamei* criado en estanques de tierra abastecidos por distintas fuentes de agua, mostraron que el comportamiento del crecimiento puede diferir según las condiciones particulares del sistema.

El oxígeno disuelto constituye otro componente relevante. Duan et al. (2022) identificaron respuestas fisiológicas y locomotoras del camarón blanco ante diferentes combinaciones de oxígeno disuelto y salinidad. Patkaew et al. (2024) evaluaron condiciones normales y sobresaturadas de oxígeno, mientras que Huynh et al. (2024) analizaron distintos dispositivos de aireación en un sistema de recirculación. Aunque estos estudios utilizaron condiciones distintas a las de los estanques de tierra sin aireación mecánica, evidencian que la respuesta productiva puede depender de las características ambientales y tecnológicas del sistema.

Otros estudios desarrollados con biofloc y recirculación también han examinado cuantitativamente la relación entre condiciones ambientales y producción. Han et al. (2025) analizaron diferentes intensidades de aireación y su influencia sobre la calidad del agua y las comunidades microbianas, mientras que Khanjani et al. (2025) evaluaron variables de calidad del agua y desempeño productivo en tecnología biofloc. Mohammadi et al. (2023) estudió específicamente la fase de precría bajo diferentes densidades de cultivo, lo que refuerza la necesidad de analizar el comportamiento productivo dentro de las condiciones particulares de cada sistema.

Desde una perspectiva matemática, las relaciones ambiente-producción pueden representarse mediante estructuras funcionales de diferente complejidad. Un modelo lineal simple supone un cambio aproximadamente constante de la respuesta frente a un predictor; un modelo lineal múltiple permite incorporar más de una variable ambiental; un término de interacción permite representar cambios en el efecto de una variable según el nivel de otra; y un modelo polinomial cuadrático permite describir curvaturas dentro del dominio de los predictores.

La selección de una ecuación no debe basarse únicamente en la maximización del coeficiente de determinación. Akaike (1974) propuso un criterio que equilibra ajuste y complejidad, mientras que Schwarz (1978) formuló un criterio alternativo con una penalización adicional por el número de parámetros. Asimismo, la validación cruzada permite evaluar el comportamiento predictivo utilizando observaciones temporalmente excluidas del ajuste (Stone, 1974). La combinación de estos criterios contribuye a disminuir el riesgo de seleccionar modelos excesivamente complejos.

Las superficies cuadráticas también constituyen una herramienta para representar geométricamente relaciones entre dos predictores y una variable respuesta. El principio general de aproximación mediante superficies de segundo orden tiene antecedentes en la metodología de superficie de respuesta desarrollada por Box y Wilson (1951). En el presente estudio, estas superficies se utilizaron únicamente como representaciones empíricas y no como herramientas de optimización experimental.

En la base de datos analizada se dispuso de 18 registros procedentes de tres períodos de precría con variación de temperatura, oxígeno disuelto y desempeño productivo. Un análisis previo evidenció asociaciones especialmente relevantes de la temperatura con el crecimiento diario y con el factor de conversión alimenticia. Sin embargo, la existencia de diferencias temporales justificó avanzar desde una evaluación correlacional hacia la comparación formal de diferentes estructuras matemáticas.

En este contexto, el objetivo de la investigación fue desarrollar y comparar modelos matemáticos empíricos para describir el crecimiento diario y el factor de conversión alimenticia de *Penaeus vannamei* en función de la temperatura y el oxígeno disuelto durante la fase de precría.

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque y diseño del estudio

Se desarrolló una investigación cuantitativa con enfoque de modelación matemática empírica. La base analizada estuvo constituida por 18 registros correspondientes a seis combinaciones originales de manejo evaluadas durante octubre, noviembre y diciembre de 2025 en estanques de tierra sin aireación mecánica.

El propósito de este análisis no fue reproducir el diseño factorial original, sino construir y comparar funciones matemáticas capaces de describir el crecimiento diario y el factor de conversión alimenticia a partir de las variables ambientales disponibles.

Variables consideradas

Las variables predictoras fueron la temperatura del agua, expresada en grados Celsius, y el oxígeno disuelto, expresado en mg/L.

Las variables respuesta fueron el crecimiento diario y el factor de conversión alimenticia.

Debido al tamaño reducido de la muestra, se evitó incorporar un número elevado de predictores adicionales.

Preparación de los datos

Antes del ajuste se verificaron valores faltantes, tipos de datos y consistencia de los registros. Para los modelos con interacción y términos cuadráticos, las variables ambientales fueron centradas respecto a sus respectivas medias:

$$T_c = T - \bar{T} \text{ y } O_c = O_2 - \bar{O}_2$$

donde T_c representa la temperatura centrada y O_c el oxígeno disuelto centrado.

El centrado facilitó la interpretación de los parámetros y redujo problemas numéricos asociados con la incorporación de términos cuadráticos y de interacción.

Modelos matemáticos evaluados

Para cada variable respuesta se ajustaron cuatro estructuras.

Tabla 1

Estructuras matemáticas evaluadas

Modelo	Ecuación	Descripción
M1	$Y = \beta_0 + \beta_1 T_c + \varepsilon$	Modelo lineal simple
M2	$Y = \beta_0 + \beta_1 T_c + \beta_2 O_c + \varepsilon$	Modelo lineal múltiple
M3	$Y = \beta_0 + \beta_1 T_c + \beta_2 O_c + \beta_3 T_c O_c + \varepsilon$	Modelo con interacción
M4	$Y = \beta_0 + \beta_1 T_c + \beta_2 O_c + \beta_3 T_c^2 + \beta_4 O_c^2 + \beta_5 T_c O_c + \varepsilon$	Modelo polinomial cuadrático

Nota. T_c : temperatura centrada; O_c : oxígeno disuelto centrado; Y : crecimiento diario o factor de conversión alimenticia.

Como se observa en la Tabla 1, se evaluaron cuatro estructuras matemáticas de diferente complejidad para representar las variables respuesta. El modelo M1 consideró únicamente la temperatura centrada como variable predictora, mientras que el modelo M2 incorporó adicionalmente el oxígeno disuelto centrado. Por su parte, el modelo M3 incluyó un término de interacción entre ambas variables ambientales, y el modelo M4 incorporó términos cuadráticos de temperatura y oxígeno disuelto, además de su interacción. Esta diferenciación permitió comparar estructuras lineales y no lineales para describir el comportamiento de las variables productivas analizadas.

Los coeficientes se estimaron mediante mínimos cuadrados ordinarios.

Evaluación y comparación de los modelos

La calidad del ajuste fue evaluada mediante el coeficiente de determinación, el coeficiente de determinación ajustado, el error cuadrático medio, el error absoluto medio, el criterio de información de Akaike y el criterio de información bayesiano.

El coeficiente de determinación se calculó como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

El R^2 ajustado se utilizó para penalizar la incorporación de parámetros adicionales.

El RMSE se obtuvo mediante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

y el MAE mediante:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Para la comparación de ajuste y complejidad se utilizaron AIC (Akaike, 1974) y BIC (Schwarz, 1978). Los valores menores fueron interpretados como favorables dentro de modelos ajustados sobre la misma variable respuesta.

Validación cruzada

La capacidad de generalización se examinó mediante validación cruzada leave-one-out, siguiendo el principio de evaluación cruzada descrito por Stone (1974).

En cada iteración se excluyó una observación, el modelo se ajustó con las 17 restantes y posteriormente se estimó la respuesta del registro excluido. El procedimiento se repitió hasta utilizar cada observación una vez como caso de validación.

Se calcularon RMSE y MAE de validación cruzada.

Criterio de selección

La selección final se realizó considerando conjuntamente R^2 ajustado, RMSE, MAE, AIC, BIC, error de validación cruzada y complejidad de la ecuación.

No se utilizó la maximización del R^2 como único criterio, debido al riesgo de favorecer estructuras excesivamente parametrizadas (Burnham & Anderson, 2004).

Representación gráfica

Para el modelo de crecimiento se construyeron valores observados frente a predichos, una superficie tridimensional y un mapa de contorno.

Para el FCA se generaron un gráfico observado frente a predicho y la recta correspondiente al modelo lineal seleccionado.

Las representaciones se limitaron al dominio ambiental observado.

Software

El procesamiento se realizó en Python utilizando Pandas y NumPy para manipulación de datos, Statsmodels para ajuste de modelos, Scikit-learn para validación cruzada y métricas predictivas, y Matplotlib y Seaborn para visualización.

RESULTADOS

Comparación de los modelos

Los modelos mostraron diferencias en su comportamiento según la variable respuesta.

Tabla 2

Comparación de modelos matemáticos para crecimiento diario y factor de conversión alimenticia

A. Crecimiento diario

Indicador	M1 lineal T	M2 lineal T + O ₂	M3 interacción	M4 cuadrático
R^2	0,4563	0,5228	0,5251	0,7426
R^2_{aj}	0,4223	0,4591	0,4233	0,6353
RMSE	0,00635	0,00595	0,00593	0,00437
MAE	0,00451	0,00451	0,00451	0,00339
AIC	-127,0573	-127,4060	-125,4937	-132,5181
BIC	-125,2765	-124,7349	-121,9322	-127,1759
RMSE LOOCV	0,00728	0,00742	0,00980	0,00657
MAE LOOCV	0,00512	0,00562	0,00680	0,00542

B. Factor de conversión alimenticia

Indicador	M1 lineal T	M2 lineal T + O ₂	M3 interacción	M4 cuadrático
R^2	0,5568	0,5809	0,6492	0,7676
R^2_{aj}	0,5291	0,5250	0,5740	0,6707
RMSE	0,2028	0,1972	0,1804	0,1468
MAE	0,1810	0,1731	0,1410	0,1173
AIC	-2,3636	-1,3696	-2,5716	-5,9837
BIC	-0,5829	1,3015	0,9899	-0,6414
RMSE LOOCV	0,2284	0,2577	0,2888	0,2620
MAE LOOCV	0,2038	0,2173	0,2134	0,2049

Nota. Valores menores de RMSE, MAE, AIC y BIC representan mejor desempeño dentro del criterio correspondiente.

LOOCV: validación cruzada leave-one-out.

Como se observa en la Tabla 2, para el crecimiento diario, el modelo cuadrático M4 presentó el mayor R^2 ajustado, los menores valores de RMSE, AIC y BIC y el menor RMSE de validación cruzada.

Asimismo, la Tabla 2 muestra que, para el factor de conversión alimenticia (FCA), el modelo cuadrático alcanzó el mayor ajuste interno; sin embargo, el modelo lineal simple M1 presentó el menor RMSE de validación cruzada.

Modelo seleccionado para crecimiento diario

La ecuación seleccionada fue:

$$\hat{G} = 0.029978 + 0.009632T_c - 0.007186O_c - 0.004829T_c^2 - 0.026754O_c^2 - 0.011948T_cO_c$$

El modelo explicó aproximadamente el 74,3 % de la variabilidad observada y presentó un R^2 ajustado de 0,635.

La prueba global del modelo resultó significativa:

$$F = 6.924 \quad p = 0.00294$$

El coeficiente lineal de temperatura fue positivo, mientras que los términos cuadráticos fueron negativos, generando una superficie de respuesta curvada dentro del dominio estudiado.

Tabla 3

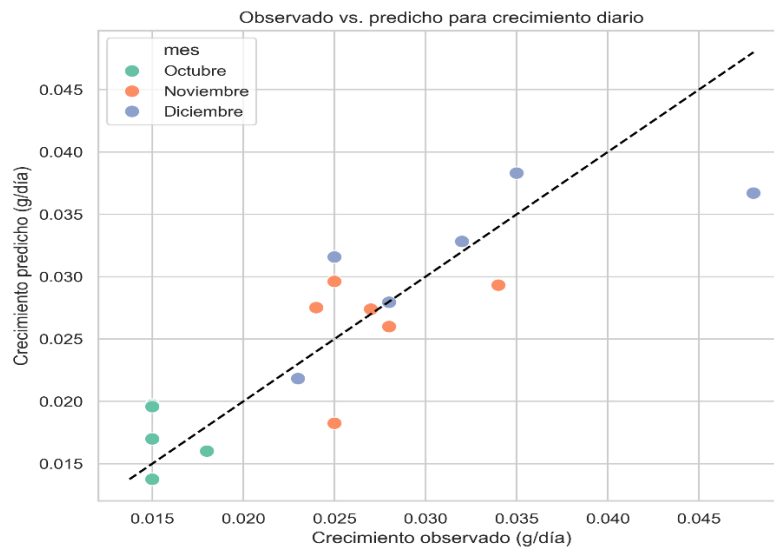
Coefficientes del modelo cuadrático seleccionado para crecimiento diario

Término	Coefficiente
Intercepto	0,029978
T_c	0,009632
O_c	-0,007186
T_c^2	-0,004829
O_c^2	-0,026754
$T_c O_c$	-0,011948

Como se observa en la Tabla 3, el modelo cuadrático seleccionado para el crecimiento diario presentó un coeficiente positivo para la temperatura centrada (0,009632) y coeficientes negativos para el oxígeno disuelto centrado (-0,007186), el término cuadrático de temperatura (-0,004829), el término cuadrático de oxígeno disuelto (-0,026754) y la interacción entre ambas variables (-0,011948). Estos coeficientes describen la estructura matemática de la superficie de respuesta estimada y evidencian la incorporación de efectos lineales, cuadráticos y de interacción en el modelo.

Figura 1

Valores observados y predichos del crecimiento diario de Penaeus vannamei mediante el modelo cuadrático

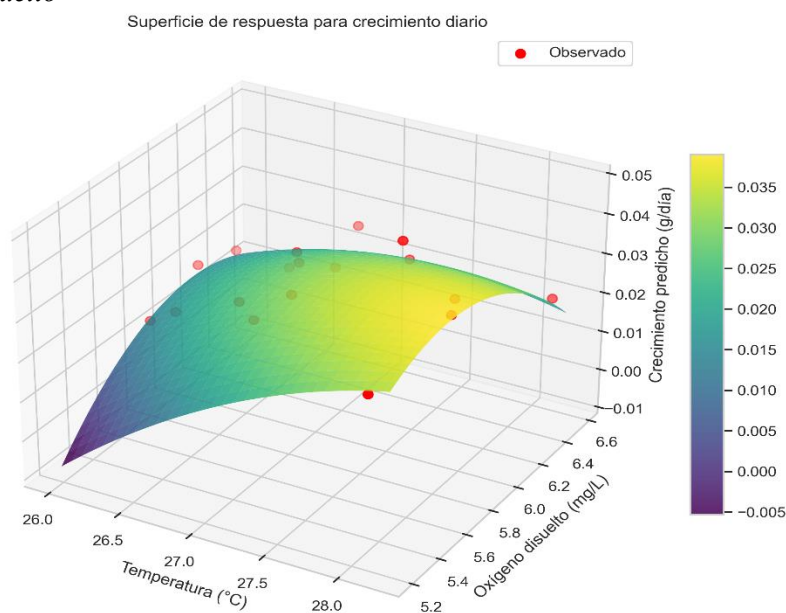


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 1, los valores predichos por el modelo cuadrático presentan una correspondencia con los valores observados del crecimiento diario de *Penaeus vannamei*, aunque se identifican diferencias entre ambas magnitudes. Este comportamiento es coherente con el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,7426$) y el error cuadrático medio ($RMSE = 0,00437$) obtenidos durante el ajuste, lo que evidencia que el modelo representa una proporción importante de la variabilidad observada, sin reproducir exactamente todos los registros.

Figura 2

Superficie cuadrática empírica del crecimiento diario en función de la temperatura y el oxígeno disuelto

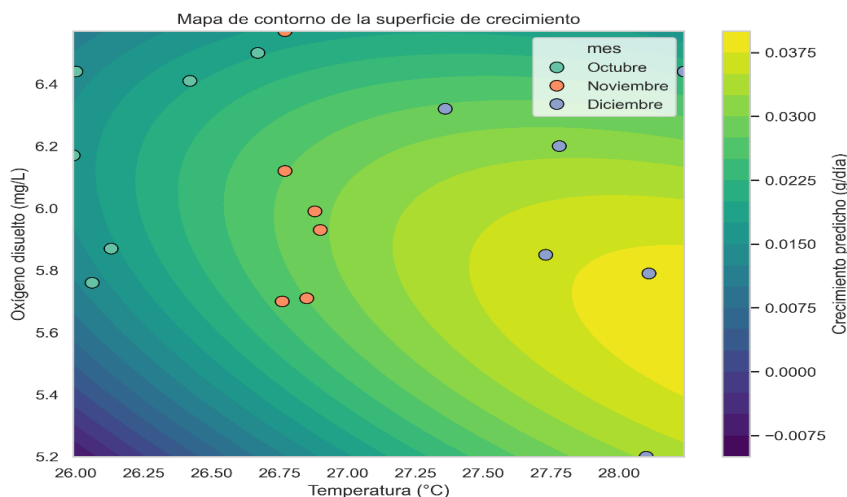


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 2, la superficie cuadrática empírica muestra que la respuesta estimada del crecimiento diario de *Penaeus vannamei* no presentó un comportamiento estrictamente lineal en función de la temperatura y el oxígeno disuelto a lo largo del dominio ambiental estudiado.

Figura 3

Mapa de contorno del crecimiento diario estimado en función de la temperatura y el oxígeno disuelto



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 3, el mapa de contorno permite visualizar las variaciones del crecimiento diario estimado de *Penaeus vannamei* según las diferentes combinaciones de temperatura y oxígeno disuelto dentro del dominio ambiental estudiado. Esta representación gráfica permite identificar cómo cambia la respuesta estimada en función de ambas variables ambientales.

Modelo seleccionado para factor de conversión alimenticia

La ecuación lineal seleccionada fue:

$$\widehat{FCA} = 1.203889 - 0.311925T_c$$

El modelo presentó:

$$R^2 = 0.5568$$

y:

$$R_{aj}^2 = 0.5291$$

El coeficiente asociado con la temperatura fue negativo, lo que indicó una disminución estimada del FCA conforme aumentó la temperatura dentro del rango observado.

Tabla 4

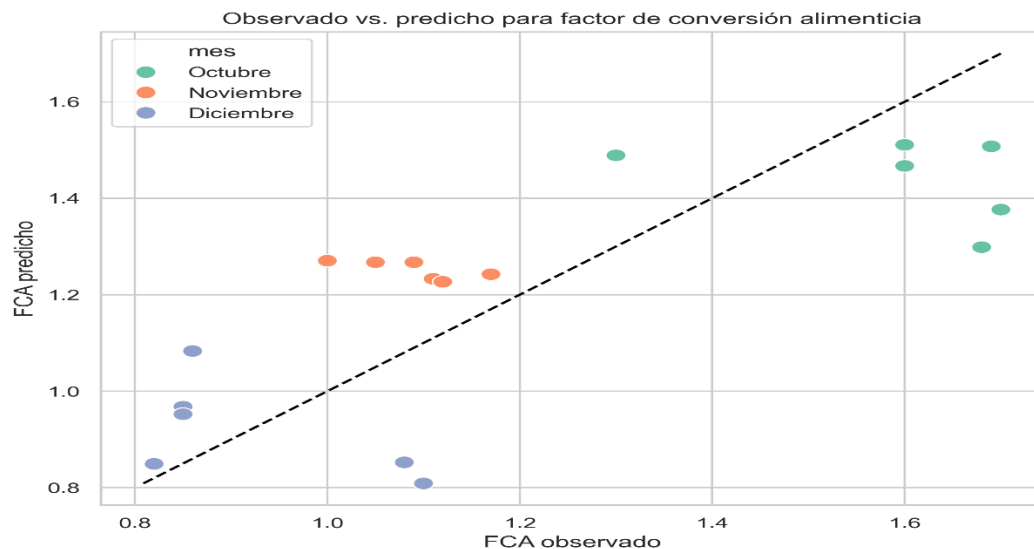
Coeficientes del modelo lineal seleccionado para FCA

Término	Coeficiente
Intercepto	1,203889
T_c	-0,311925

Como se observa en la Tabla 4, el modelo lineal seleccionado para el factor de conversión alimenticia (FCA) presentó un intercepto de 1,203889 y un coeficiente negativo para la temperatura centrada ($-0,311925$). Este último indica que, dentro del intervalo térmico estudiado, el modelo estima una disminución de 0,311925 unidades en el FCA por cada incremento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura del agua.

Figura 4

Valores observados y predichos del factor de conversión alimenticia mediante el modelo lineal seleccionado

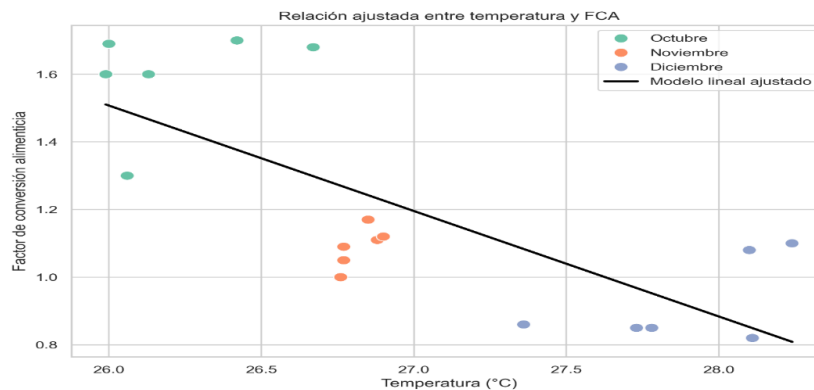


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4, los valores predichos por el modelo lineal presentan diferencias respecto a los valores observados del factor de conversión alimenticia (FCA) de *Penaeus vannamei*. Aunque el modelo representa parte de la variabilidad de los datos, se identifican desviaciones respecto a la línea de correspondencia entre valores observados y predichos. Este comportamiento es coherente con el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,5568$) y el error cuadrático medio ($RMSE = 0,2028$) obtenidos durante el ajuste, lo que evidencia que el modelo no reproduce exactamente todos los registros analizados.

Figura 5

*Relación matemática ajustada entre la temperatura y el factor de conversión alimenticia de *Penaeus vannamei**



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 5, la relación matemática ajustada entre la temperatura y el factor de conversión alimenticia (FCA) de *Penaeus vannamei* presenta una tendencia lineal negativa dentro del intervalo térmico estudiado. Este comportamiento es coherente con el coeficiente de temperatura estimado en el modelo ($-0,311925$), que indica una disminución del FCA conforme aumenta la temperatura del agua. La representación gráfica permite visualizar esta relación empírica, cuya interpretación se limita a las condiciones ambientales observadas durante la fase de precría.

DISCUSIÓN

La comparación de las cuatro estructuras matemáticas mostró que la complejidad requerida dependió de la variable productiva considerada. Para el crecimiento diario, el modelo cuadrático presentó el mejor comportamiento global, mientras que para el factor de conversión alimenticia el modelo lineal simple mostró el menor error de validación cruzada.

En el caso del crecimiento, el modelo cuadrático explicó el 74,3 % de la variabilidad observada y alcanzó un (R^2) ajustado de 0,635. Asimismo, presentó el menor RMSE de validación cruzada entre las estructuras evaluadas. Este resultado indica que, dentro del conjunto de datos analizado, una función con componentes lineales, cuadráticos y de interacción representó mejor el comportamiento del crecimiento que las estructuras lineales simples.

Akbarurasyid et al. (2023) también documentaron asociaciones entre factores ambientales y crecimiento del camarón blanco, lo que respalda la pertinencia de representar cuantitativamente dichas relaciones. Sin embargo, la modelación desarrollada en el presente estudio no debe interpretarse como una demostración causal, debido a que las variables ambientales no fueron manipuladas independientemente.

El coeficiente lineal positivo de temperatura en el modelo de crecimiento indicó una tendencia ascendente dentro de parte del dominio observado. No obstante, la presencia del término cuadrático negativo de temperatura evidenció que esta relación no fue estrictamente lineal.

El término cuadrático asociado con el oxígeno disuelto también fue negativo, generando curvatura en la superficie. Duan et al. (2022) y Patkaew et al. (2024) han mostrado que las respuestas de *P. vannamei* ante condiciones de oxígeno pueden ser complejas y depender del contexto fisiológico y ambiental. Sin embargo, las condiciones experimentales de estos estudios difieren de las de los estanques sin aireación analizados en la presente investigación.

La interacción entre temperatura y oxígeno disuelto también contribuyó a modificar la geometría de la superficie. Esto indica que la respuesta estimada de crecimiento frente a una variable puede depender parcialmente del nivel de la otra. Tal comportamiento justifica la utilización de una superficie completa en lugar de interpretar aisladamente cada coeficiente.

Ramos-Torres et al. (2024) demostraron que el crecimiento del camarón blanco puede representarse mediante diferentes curvas matemáticas y que la selección de modelos permite identificar estructuras que describen mejor el patrón de crecimiento bajo condiciones particulares. Aunque su enfoque y variables difieren del presente estudio, ambos trabajos coinciden en la utilidad de comparar matemáticamente estructuras alternativas.

Para el FCA se observó una situación distinta. El modelo cuadrático alcanzó el mayor R^2 y los valores más favorables de AIC y BIC, pero no presentó el menor error de validación cruzada. El modelo lineal simple basado únicamente en temperatura mostró un RMSE LOOCV menor.

Este resultado evidencia la diferencia entre ajuste interno y capacidad de generalización. La incorporación de términos adicionales permitió que el modelo cuadrático se adaptara mejor a los registros utilizados para estimarlo, pero no mejoró su desempeño cuando las observaciones fueron excluidas individualmente durante la validación cruzada.

La selección del modelo lineal para FCA es coherente con el principio de parsimonia propuesto en la comparación multimodelo. Burnham y Anderson (2004) señalaron la importancia de equilibrar ajuste y complejidad, mientras que los criterios de Akaike (1974) y Schwarz (1978) proporcionan penalizaciones explícitas frente a estructuras con un mayor número de parámetros.

Aunque AIC y BIC favorecieron el modelo cuadrático para FCA, LOOCV favoreció la estructura lineal. Esta divergencia constituye un resultado metodológicamente importante, ya que demuestra que distintos criterios pueden priorizar propiedades diferentes del modelo.

La ecuación lineal estimó una disminución aproximada de 0,312 unidades de FCA por cada incremento de 1 °C respecto a la temperatura media. Esta interpretación es válida únicamente dentro del intervalo térmico representado por la base de datos y no debe extrapolarse a temperaturas externas.

Desde una perspectiva productiva, la relación negativa entre temperatura y FCA también es consistente con la asociación previamente observada entre ambas variables. No obstante, factores de manejo, duración del período, densidad y composición alimenticia podrían contribuir al comportamiento registrado.

Han et al. (2025), Huynh et al. (2024) y Khanjani et al. (2025) han mostrado que modificaciones tecnológicas y ambientales pueden afectar diferentes componentes del sistema acuícola. Estos antecedentes refuerzan la necesidad de interpretar las ecuaciones matemáticas dentro del sistema productivo específico donde fueron obtenidas.

Una limitación central de la investigación fue el tamaño de la muestra. Los 18 registros procedieron de tres períodos de precría y de seis combinaciones originales de manejo. Esta estructura restringe la estabilidad potencial de modelos con un número elevado de parámetros.

La utilización de LOOCV permitió examinar el comportamiento de los modelos bajo exclusión sucesiva de observaciones, pero no sustituye una validación externa con nuevos datos.

Stone (1974) planteó la validación cruzada como una herramienta para evaluar predicciones estadísticas; sin embargo, la validación independiente continúa siendo necesaria cuando se pretende utilizar una ecuación con fines operativos.

Asimismo, la superficie cuadrática construida para crecimiento debe interpretarse como una aproximación empírica. Aunque las funciones de segundo orden son ampliamente utilizadas para representar superficies de respuesta (Box & Wilson, 1951), los datos del presente estudio no procedieron de un diseño específico de optimización de superficies.

En consecuencia, no se establecieron temperaturas u oxígenos “óptimos”. La superficie se utilizó únicamente para describir la forma de la respuesta dentro del dominio observado.

Los resultados muestran que la modelación matemática aporta información adicional respecto a un análisis exclusivamente correlacional, debido a que permite comparar estructuras funcionales, estimar respuestas y evaluar el equilibrio entre complejidad y generalización.

CONCLUSIONES

La modelación matemática permitió representar de manera diferenciada el crecimiento diario y el factor de conversión alimenticia de *Penaeus vannamei* frente a las condiciones ambientales observadas durante la precría.

Para el crecimiento diario, el modelo polinomial cuadrático presentó el mejor desempeño entre las estructuras evaluadas. La ecuación explicó aproximadamente el 74,3 % de la variabilidad y mostró el menor RMSE de validación cruzada dentro de los modelos comparados para esta respuesta.

Para el factor de conversión alimenticia, el modelo lineal simple basado en temperatura presentó el menor error de validación cruzada, a pesar de que modelos más complejos alcanzaron mayor ajuste interno.

La comparación entre ambas respuestas mostró que una mayor complejidad matemática no necesariamente implica mejor capacidad de generalización.

El empleo conjunto de (R^2) ajustado, RMSE, MAE, AIC, BIC y validación cruzada permitió realizar una selección multimétrica de los modelos.

Las ecuaciones obtenidas deben interpretarse como modelos matemáticos empíricos exploratorios, válidos dentro del dominio ambiental observado. Su aplicación fuera de ese intervalo requiere validación con nuevos ciclos y unidades experimentales independientes.

REFERENCIAS

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Akbarurrasyid, M., Prama, E. A., Sembiring, K., Anjarsari, M., Sofian, A., & Astiyani, W. P. (2023). Monitoring of aquatic environmental factors on the growth of whiteleg shrimp (*Litopenaues vannamei* Boone, 1931). *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 23(2), 181–188. <https://doi.org/10.22146/jfs.83813>
- Akbarurrasyid, M., Prama, E. A., Fadilah, H., Sudinno, D., Astiyani, W. P., & Arifin, I. F. S. Z. (2026). Productivity of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) cultivation based on water quality, growth, feed efficiency, and business analysis factors. *Fisheries Journal*, 16(1), 430–444.
- Box, G. E. P., & Wilson, K. B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 13(1), 1–45. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x>
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research*, 33(2), 261–304. <https://doi.org/10.1177/0049124104268644>
- Duan, Y., Li, M., Sun, M., Wang, A., Chai, Y., Dong, J., Chen, F., Yu, Z., & Zhang, X. (2022). Effects of salinity and dissolved oxygen concentration on the tail-flip speed and physiologic response of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Sustainability*, 14(22), Article 15413. <https://doi.org/10.3390/su142215413>
- Han, T., Zhang, M., Feng, W., Li, T., Liu, X., & Wang, J. (2025). Effects of aeration intensity on water quality, nutrient cycling, and microbial community structure in the biofloc system of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* culture. *Water*, 17(1), Article 41. <https://doi.org/10.3390/w17010041>
- Huynh, T. G., Phan, T. C. T., Vu, H. H., & Vu, N. U. (2024). The use of different air diffusers on whiteleg shrimp, *Penaeus vannamei* in recirculating aquaculture system: Effects on water quality and shrimp growth. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 52(1), 163–173. <https://doi.org/10.3856/vol52-issue1-fulltext-2951>
- Khanjani, M. H., Eslami, J., & Emerenciano, M. G. C. (2025). Wheat flour as carbon source on water quality, growth performance, hemolymph biochemical and immune parameters of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) juveniles in biofloc technology (BFT). *Aquaculture Reports*, 40, Article 102623. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102623>
- Mohammadi, G., Mortazavi, M. S., & Hafezieh, M. (2023). Evaluation of high stocking densities on the water quality and growth performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus*

- vannamei* reared in a mixotrophic biofloc nursery system. *Aquaculture Research*, 2023, Article 1765366. <https://doi.org/10.1155/2023/1765366>
- Nazarudin, M. F., Zulkipli, M. A. F., Samsuri, M. H., Khairil Anwar, N. A. S., Jamal, N. S. A., Alipiah, N. M., Ahmad, M. I., Nor, N. M., Yasin, I. S. M., Ikhsan, N., Azmai, M. N. A., & Rosli, M. H. (2025). Optimizing shrimp culture through environmental monitoring: Effects of water quality and metal ion profile on whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) performance in a semi-intensive culture pond. *Water*, 17(19), Article 2818. <https://doi.org/10.3390/w17192818>
- Patkaew, S., Direkbusarakom, S., Hirono, I., Wuthisuthimethavee, S., Powtongsook, S., & Pooljun, C. (2024). Effect of supersaturated dissolved oxygen on growth-, survival-, and immune-related gene expression of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Veterinary World*, 17(1), 50–58. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.50-58>
- Ramos-Torres, B., Félix-Ortiz, J. A., Urías-Sotomayor, R., Rodríguez-Domínguez, G., Payán-Alejo, J., & Aragón-Noriega, E. A. (2024). Comparison of growth curves of the Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* Boone, 1931 (Decapoda, Penaeidae) reared in earthen ponds with three different water sources. *Crustaceana*, 97(10–11), 1357–1371. <https://doi.org/10.1163/15685403-bja10413>
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461–464. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>
- Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 36(2), 111–147. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x>