



Predicting semi-intensive production of *Penaeus vannamei* using simple linear regression models: An analysis of the importance of environmental and management variables.

Predicción de la producción semi-intensiva de *Penaeus vannamei* mediante modelos de regresión lineal simple: Un análisis de la importancia de las variables ambientales y de manejo.

Estrada-Pérez, N.^{1,2}, Estrada-Perez, M.¹, Ruiz-Velazco, J. M. J.^{1,2*}, Zavala-Leal, I.^{1,2}, Valdéz-Gonzalez, F. J.^{1,2}, Cuevas-Rodríguez, B. L.^{1,2}, González-Huerta, C. A.²

¹ Programa de Maestría del Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias y Pesqueras (CBAP), Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura de la Universidad Autónoma de Nayarit. Km 9, carretera Tepic – Compostela, Xalisco, Nayarit. México. ² Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera, Universidad Autónoma de Nayarit. Bahía de Matanchén Km. 12 Carretera a Los Cocos. Municipio de San Blas, Nayarit, México.

Cite this paper/Como citar este artículo: Estrada-Pérez, N., Estrada-Perez, M., Ruiz-Velazco, J. M. J., Zavala-Leal, I., Valdéz-Gonzalez, F. J., Cuevas-Rodríguez, B. L., González-Huerta, C. A. (2022). Predicting semi-intensive production of *Penaeus vannamei* using simple linear regression models: An analysis of the importance of environmental and management variables. *Revista Bio Ciencias* 9, e1347. <https://doi.org/10.15741/revbio.09.e1347>



ABSTRACT

An analysis was conducted on semi-intensive production of a commercial farm of white shrimp (*Penaeus vannamei*) to establish recommendations for production improvement, assessing environmental influence and management variables on growth and survival. For this purpose, records of a production cycle were obtained, then a variance analysis was conducted to determine significant differences in environmental variables among ponds. The following relationships were determined: 1) environmental variables correlated with management variables and 2) environmental and management variables correlated with production parameters (final weight and final survival). Subsequently, simple linear regression models were obtained between the variables related to production

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: March 28th 2022.

Accepted/Aceptado: August 13th 2022.

Available on line/Publicado: August 25th 2022.

*Corresponding Author:

Javier M.J. Ruiz-Velazco. Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera, Universidad Autónoma de Nayarit. Bahía de Matanchén Km. 12 Carretera a Los Cocos. Municipio de San Blas, Nayarit, México. Phone: +52 311 2118816. E-mail address: marcialj@uan.edu.mx

RESUMEN

Se realizó un análisis de la producción semi-intensiva de una granja comercial de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) para establecer recomendaciones de manejo, considerando la influencia de las variables ambientales y de manejo sobre el crecimiento y la supervivencia. Para ello, se obtuvieron los registros de un ciclo de producción. Se llevó a cabo un análisis de varianza para confirmar las diferencias significativas de las variables ambientales entre los estanques. Se determinaron las siguientes relaciones 1) variables ambientales con variables de manejo y 2) variables ambientales y de manejo con los parámetros de producción (peso final y supervivencia final). Posteriormente, se estimaron modelos de regresión lineal simple entre las variables relacionadas con los parámetros de producción para realizar un análisis de sensibilidad mediante simulación. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones de temperatura y oxígeno disuelto

parameters to conduct sensibility analysis by simulation. The analysis of variance showed statistically significant differences ($p < 0.05$) in temperature and dissolved oxygen concentrations among ponds. The correlation analysis between environmental and management variables showed that the final weight was positively related to temperature and dissolved oxygen and inversely proportional to the stocking density and cultivation duration ($p < 0.05$). Survival was negatively correlated with pond size ($p < 0.05$). Sensibility analysis by simulation showed that dissolved oxygen variability affected final production more than other variables, as it increased from 1,521 kg ha⁻¹ to 2,429 kg ha⁻¹. The remainder variables in order of importance were: temperature, cultivation duration, amount of feed, stocking density, and pond size, respectively. Within the ranges tested, higher levels of dissolved oxygen, appropriate stocking densities, and small pond size could substantially improve the production in semi-intensive *Penaeus vannamei* shrimp farms.

KEY WORDS

Production commercial, *Penaeus vannamei*, Management.

Introduction

The white-legged shrimp (*Penaeus vannamei*) is the main species produced in the world by aquaculture with a proportion of 52.9 % (≈4,966.2 thousand tons) as compared to other crustacean species in 2018. Shrimp is an important source of foreign exchange income and has historically been among the most traded products; most of the production comes from Asia and Latin America, while one of the main markets is the United States of America (FAO, 2020). Several studies have been conducted on shrimp culture, addressing different topics to determine the effect of environmental and management variables on the growth and survival of shrimp (McGraw *et al.*, 2001; Moss & Moss, 2004; Islam *et al.*, 2005; Milstein *et al.*, 2005; Mena-Herrera *et al.*, 2006; Araneda *et al.*, 2008; Ponce-Palafox, *et al.*, 2019; Jaffer *et al.*, 2020; Rahmawati *et al.*, 2021). Despite several scientific contributions to enhancing shrimp farming, only a few investigations have been conducted in commercial operations under different farming conditions: a) intensive affected by diseases such as white spot virus (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010a; González-Romero *et al.*, 2014) and disease-free (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010b; Estrada-Pérez *et al.*, 2016);

entre los estanques. Los análisis de correlación entre las variables ambientales y de manejo, mostraron que el peso final se correlacionó positivamente con la temperatura y el oxígeno disuelto e inversamente proporcional con la densidad de siembra y la duración del cultivo ($p < 0.05$). La supervivencia se correlacionó negativamente con el tamaño del estanque ($p < 0.05$). El análisis de sensibilidad mediante simulación mostró que la variabilidad del oxígeno disuelto afectó a la producción final más que otras variables, ya que aumentó de 1,521 kg ha⁻¹ a 2,429 kg ha⁻¹. El resto de variables en orden de importancia fueron: temperatura, duración del cultivo, cantidad de alimento, densidad de siembra y tamaño del estanque, respectivamente. Dentro de los rangos analizados, niveles más altos de oxígeno disuelto, densidades de población adecuadas y un tamaño de estanque pequeño podrían mejorar sustancialmente la producción en las granjas de camarón *Penaeus vannamei* semi-intensivas.

PALABRAS CLAVE

Producción comercial, *Penaeus vannamei*, Manejo.

Introducción

El camarón blanco (*Penaeus vannamei*) es la principal especie producida en la acuicultura mundial con una proporción del 52.9 % (aproximadamente 4,966.2 mil toneladas) respecto a las demás especies de crustáceos en 2018. El camarón es una importante fuente de ingresos en divisas e históricamente ha estado entre los productos más comercializados; la mayor parte de la producción proviene de Asia y América Latina, mientras que uno de los principales mercados es Estados Unidos de América (FAO, 2020). Se han realizado varios estudios sobre el cultivo del camarón, abordando diferentes temas para determinar el efecto de las variables ambientales y de manejo en el crecimiento y la supervivencia del camarón (McGraw *et al.*, 2001; Moss & Moss, 2004; Islam *et al.*, 2005; Milstein *et al.*, 2005; Mena-Herrera *et al.*, 2006; Araneda *et al.*, 2008; Ponce-Palafox *et al.*, 2019; Jaffer *et al.*, 2020; Rahmawati *et al.*, 2021). A pesar de las diversas contribuciones científicas para mejorar el cultivo de camarones, sólo se han realizado escasas investigaciones en operaciones comerciales bajo diferentes condiciones de cultivo: a) intensivas afectadas por enfermedades como el virus de la mancha blanca (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010a; González-Romero *et al.*, 2014) y libres de enfermedades (Ruiz-Velazco *et al.*,

b) semi-intensive affected by the acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) (Estrada-Pérez et al., 2020) and disease-free (Estrada-Pérez et al., 2015; González-Romero et al., 2018). In these studies, researchers found several relationships between environmental and management variables that may affect or benefit intensive and semi-intensive shrimp cultivation. The present study assessed the different relationships between environmental and management variables on growth, survival, and how they affected the production in some semi-intensive commercial *Penaeus vannamei* shrimp farms. This type of technology represents about 97 % of the currently operating farms in Mexico. The present study also addressed the relationships between the different variables involved and aimed to contribute to a better understanding of shrimp farming to optimize management practices which lead to better production.

Material and Methods

Data survey

Data were collected from a semi-intensive commercial shrimp farm located in the municipality of San Blas, Nayarit State, Mexico. The study units were eleven earth ponds ranging from 0.6 to 7 ha, that were in use during spring stocking. For each pond, the following dependent variables were analyzed: shrimp growth (final weight, g), final survival (%), and final biomass yield (kg ha⁻¹). The independent variables used were: water temperature (°C), salinity (ups), dissolved oxygen (mg L⁻¹), initial stocking density (post larvae per square meter, pL m⁻²), pond size (ha), cultivation duration (days), and amount of feed used in kg ha⁻¹ (Table 1). According to the producers, the feeding strategy was with commercial feed on demand, using as an indicator the consumption baskets in the ponds. The protein percentages used were 40 % during the first month and 35 % thereafter until harvest.

Oxygen and temperature were measured twice daily (06:00 and 18:00 h) using oximeters (Model 55, YSI, Yellow Springs, OH). Salinity was measured weekly using refractometers (Aquafauna Bio-Marine, Hawthorne, CA) at a precision of 1 ups.

2010b; Estrada-Pérez et al., 2016); b) semi-intensivas afectadas por la enfermedad AHPND (Estrada-Pérez et al., 2020) y libres de enfermedades (Estrada-Pérez et al., 2015; González-Romero et al., 2018). En estos estudios, los investigadores encontraron diversas relaciones entre las variables ambientales y de manejo que pueden afectar o beneficiar al cultivo intensivo y semi-intensivo de camarón. En el presente estudio se evaluaron las diferentes relaciones entre las variables ambientales y de manejo sobre el crecimiento, la supervivencia y cómo afectaron la producción en algunas granjas comerciales semi-intensivas de camarón *Penaeus vannamei*. Este tipo de tecnología representa alrededor del 97 % de las granjas que operan actualmente en México. El presente estudio también abordó las relaciones entre las diferentes variables involucradas y tuvo como objetivo contribuir al mejor entendimiento del cultivo de camarón para optimizar las prácticas de manejo que conduzcan a una mejor producción.

Material y Métodos

Base de datos

Los datos fueron recolectados en una granja comercial de camarón semi-intensiva ubicada en el municipio de San Blas, estado de Nayarit, México. Las unidades de estudio fueron once estanques de tierra de entre 0.6 y 7 ha, que estuvieron en uso durante la siembra de primavera. Para cada estanque, se analizaron las siguientes variables dependientes: crecimiento del camarón (peso final, g), supervivencia final (%) y rendimiento final de biomasa (kg ha⁻¹). Las variables independientes utilizadas fueron: la temperatura del agua (°C), la salinidad (ups), el oxígeno disuelto (mg L⁻¹), la densidad de siembra inicial (postlarvas por metro cuadrado, pL m⁻²), el tamaño del estanque (ha), la duración del cultivo (días) y la cantidad de alimento utilizada en kg ha⁻¹ (Tabla 1). Según los productores, la estrategia de alimentación fue con alimento comercial a demanda, utilizando como indicador las canastas de consumo en los estanques. Los porcentajes de proteína utilizados fueron del 40 % durante el primer mes y posteriormente del 35 % hasta la cosecha.

El oxígeno y la temperatura se midieron dos veces al día (06:00 y 18:00 h) utilizando oxímetros (Modelo 55, YSI, Yellow Springs, OH). La salinidad se midió semanalmente utilizando refractómetros (Aquafauna Bio-Marine, Hawthorne, CA) con una precisión de 1 ups. El peso de los camarones se

Shrimp weight was measured weekly using 0.01 g and 0.1 g precision balances (Ohaus Corp., Pine Brook, NJ). Survival was estimated from shrimp population samples caught with cast nets (1.5 m radius), depending on the shrimp size monofilament line cast nets had a mesh size of 3.2 or 25.4 mm.

midió semanalmente utilizando balanzas de precisión de 0.01 g y 0.1 g (Ohaus Corp., Pine Brook, NJ). La supervivencia se estimó a partir de muestras de la población de camarones capturados con atarrayas (1.5 m de radio), dependiendo del tamaño de los camarones, las atarrayas de monofilamento tuvieron un tamaño de malla de entre 3.2 o 25.4 mm.

Table 1.
Management variables: Pond size, planting density, crop duration, amount of feed per hectare and environmental variables (temperature and dissolved oxygen in the water) used in the analysis.

Tabla 1.
Variables de manejo: Tamaño del estanque, densidad de siembra, duración del cultivo, alimento por hectárea y alimento total y variables ambientales usadas (Temperatura y oxígeno disuelto en el agua) usadas en el análisis.

Pond	Temperature (°C)	Dissolved Oxygen (mg L ⁻¹)	Salinity (Ups)	Pond size (ha)	Stocking density (pL m ⁻²)	Duration of cultivation (days)	Amount of feed (kg ha ⁻¹)
1	31.34±1.56	4.97±1.38	38.50±5.09	1.2	33	78	2,958
2	31.32±1.27	4.50±1.13	37.66±3.27	1.2	33	78	3,052
3	31.32±1.28	4.25±1.37	34.28±4.92	1.2	33	78	3,351
4	31.26±1.25	3.99±1.02	38.66±4.80	1.2	33	80	3,439
5	30.97±1.41	4.93±1.66	37.71±3.64	1.1	27	72	2,272
6	31.37±1.37	5.21±1.14	40.43±3.50	2.4	15	72	1,260
7	31.33±1.46	5.26±1.17	40.28±4.27	3	15	72	1,076
8	31.87±1.42	4.84±1.40	40.14±4.06	7	17	72	855
9	31.39±2.14	5.31±1.23	38.71±3.59	1.8	19	72	1,571
10	31.71±1.35	5.27±1.85	37.86±4.06	1.8	22	72	1,799
11	31.81±1.41	5.65±2.24	37.16±4.75	0.6	33	72	3,281

Statistical analysis

Obtained data were analyzed by Normality using Shapiro-Wilk W-tests and Levene's test in relation to the data processing to determine the relevance of the statistical analysis (*i.e.* parametric or non-parametric). A one-way ANOVA was used to detect statistically significant differences ($p < 0.05$) of environmental variables among the farm ponds, and (in case differences were detected) to demonstrate if differences may have caused different results in the production variables. Since this research was not based on experimental work, subsequent testing was not necessary to allow differentiate the ponds, but rather to find relationships

Análisis estadístico

Se probó la normalidad de la base de datos mediante las pruebas W de Shapiro-Wilk y la prueba de homocedasticidad de Levene en relación con el tratamiento de los datos para determinar la pertinencia del análisis estadístico (es decir, paramétrico o no paramétrico). Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para detectar diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) de las variables ambientales entre los estanques de la granja utilizados en el presente estudio, y (en caso de que se detectaran diferencias) para demostrar si las diferencias pudieron haber causado resultados diferentes en las variables de producción. Dado que esta

among variables after the demonstration of variability. To rule out variables that were not related to parameters or to the general variables themselves, a correlation analysis was conducted. The analyzed variables were the averages during the complete cycle of environmental variables such as temperatures (T), salinity (S), and dissolved oxygen (DO). The management variables analyzed were stocking density (D), pond size (PS), duration of culture (DC), and amount of feed used (F). The production variables analyzed were final weight (W_f) and final survival (N_f).

Simple linear regression models

Simple linear regression models were constructed according to the results of the analysis of correlation between the analyzed variables; only significant correlations were used ($p < 0.05$). These regression models were used for simulation and to find relationships between variables (environmental and management) and the production parameters that affected biomass (final weight and final survival). The simple linear regression model was the linear equation:

$$Y = ax + b \quad (1)$$

Where:

Y = the dependent variables: W_f and N_f

x = the environmental and management variables for each (T , DO , D , PS , F and DC) and "a" and "b" = parameters of the regression.

For correlation analysis and simple linear regression was used the statistical program STATISTICA 6.0 (StatSoft, Tulsa), and least-squares analysis was conducted (Zar, 2010).

Simulation

An analysis was conducted to determine the sensitivity of the variables studied with the use of simple linear regression models that were related to the production parameters. This analysis was performed to determine the sensitivity of the values

investigación no se basó en un trabajo experimental, no fue necesario realizar pruebas posteriores que permitieran diferenciar los estanques, sino encontrar relaciones entre las variables tras la demostración de la variabilidad. Para descartar las variables que no estaban relacionadas con los parámetros o con las propias variables generales, se llevó a cabo un análisis de correlación. Las variables analizadas fueron los promedios durante el ciclo completo de las variables ambientales como las temperaturas (T), la salinidad (S) y el oxígeno disuelto (DO). Las variables de manejo analizadas fueron la densidad de siembra (D), el tamaño del estanque (PS), la duración del cultivo (DC) y la cantidad de alimento utilizado (F). Las variables de producción analizadas fueron el peso final (W_f) y la supervivencia final (N_f).

Modelos de regresión lineal simple

Se construyeron modelos de regresión lineal simple de acuerdo con los resultados del análisis de correlación entre las variables analizadas; sólo se utilizaron las correlaciones significativas ($p < 0.05$). Estos modelos de regresión se utilizaron para la simulación y para encontrar relaciones entre las variables (ambientales y de manejo) y los parámetros de producción que afectaron a la biomasa (peso final y supervivencia final). El modelo de regresión lineal simple fue la ecuación lineal:

$$Y = ax + b \quad (1)$$

Donde:

Y = las variables dependientes: W_f y N_f

x = Las variables ambientales y de manejo (T , DO , D , PS , F y DC) y "a" y "b" = parámetros de la regresión.

Para el análisis de correlación y la regresión lineal simple se utilizó el programa estadístico STATISTICA 6.0 (StatSoft, Tulsa), mediante el método de mínimos cuadrados (Zar, 2010).

Simulación

Se realizó un análisis para determinar la sensibilidad de las variables estudiadas con el uso de los modelos de regresión lineal simple que estuvieron relacionados con

of the environmental and management variables, and how they affected the variability of the final biomass estimated by the models. For this purpose, the maximum, mean, and minimum averages of the whole crop were used, where the difference between the maximum and minimum value was considered as the sensitivity value. A higher value of such difference (positive or negative in terms of percentage change) meant higher sensitivity. Mean values were used in cases where the model had no relationship with any of the variables involved. The final biomass (B_f) was calculated by means of the equation:

$$B_f = W_f N_f \quad (2)$$

Results

Statistical analysis

One-way ANOVA analysis indicated significant differences ($p < 0.05$) among ponds in temperature and dissolved oxygen. The variable salinity did not show significant differences. Correlation analysis results are presented in Tables 2 and 3. It was established a negative correlation between dissolved oxygen and the duration of cultivation. Stocking density was positively correlated to the duration of cultivation and inversely correlated to pond size. The amount of feed used was positively correlated to stocking density and the duration of culture, but inversely correlated to pond size. No correlation was found between salinity or any of the other variables involved. On the other hand, the final weight was positively correlated to temperature and dissolved oxygen. The stocking density, the duration of cultivation, and the amount of feed used were inversely correlated. Also, the final survival was inversely correlated to pond size (Table 3).

Simple linear regression models

There were presented the simple linear regression models that had significant differences ($p < 0.05$) in the correlation analysis between variables (environmental and management) and the production variables used in the simulation (Figure 1).

los parámetros de producción. Este análisis se utilizó para determinar la sensibilidad de los valores de las variables ambientales y de manejo, y cómo afectaron a la variabilidad de la biomasa final estimada por los modelos. Para ello, se utilizaron los promedios máxima, media y mínima de todo el cultivo, donde la diferencia entre el valor máximo y el mínimo se consideró como el valor de sensibilidad. Un valor más alto de esa diferencia (positivo o negativo en términos de cambio porcentual) significaba una mayor sensibilidad. Los valores medios se utilizaron en los casos en los que el modelo no tenía relación con ninguna de las variables implicadas. La biomasa final (B_f) se calculó mediante la ecuación:

$$B_f = W_f N_f \quad (2)$$

Resultados

Análisis estadístico

El ANOVA de una vía indicó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los estanques en cuanto a temperatura y oxígeno disuelto. La variable salinidad no mostró diferencias significativas. Los resultados de los análisis de correlación se presentan en la Tabla 2 y 3. Se estableció una correlación negativa entre el oxígeno disuelto y la duración del cultivo. La densidad de siembra estuvo positivamente correlacionada con la duración del cultivo e inversamente con el tamaño del estanque. La cantidad de alimento utilizado estuvo positivamente correlacionado con la densidad de siembra y la duración del cultivo, pero inversamente correlacionado con el tamaño del estanque. No se encontró correlación entre la salinidad y ninguna de las variables implicadas. En cambio, el peso final se correlacionó positivamente con la temperatura y el oxígeno disuelto. La densidad de siembra, la duración del cultivo y la cantidad de alimento utilizado se correlacionaron de manera inversa. Asimismo, la supervivencia final estuvo inversamente correlacionada con el tamaño del estanque (Tabla 3).

Modelos de regresión lineal simple

Se presentan los modelos de regresión lineal simple que tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en los análisis de correlación entre las variables (ambientales y de manejo) y las variables de producción utilizadas en la simulación (Figura 1). El peso final se relacionó positivamente

The final weight was positively related to temperature (Figure 1a) and dissolved oxygen (Figure 1b) but negatively related to stocking density (Figure 1c), amount of feed used (Figure 1e), and duration of cultivation (Figure 1f). The final survival was negatively related to pond size (Figure 1d).

con la temperatura (Figura 1a) y el oxígeno disuelto (Figura 1b), pero se relacionó negativamente con la densidad de siembra (Figura 1c), la cantidad de alimento utilizado (Figura 1e) y la duración del cultivo (Figura 1f). La supervivencia final se relacionó negativamente con el tamaño del estanque (Figura 1d).

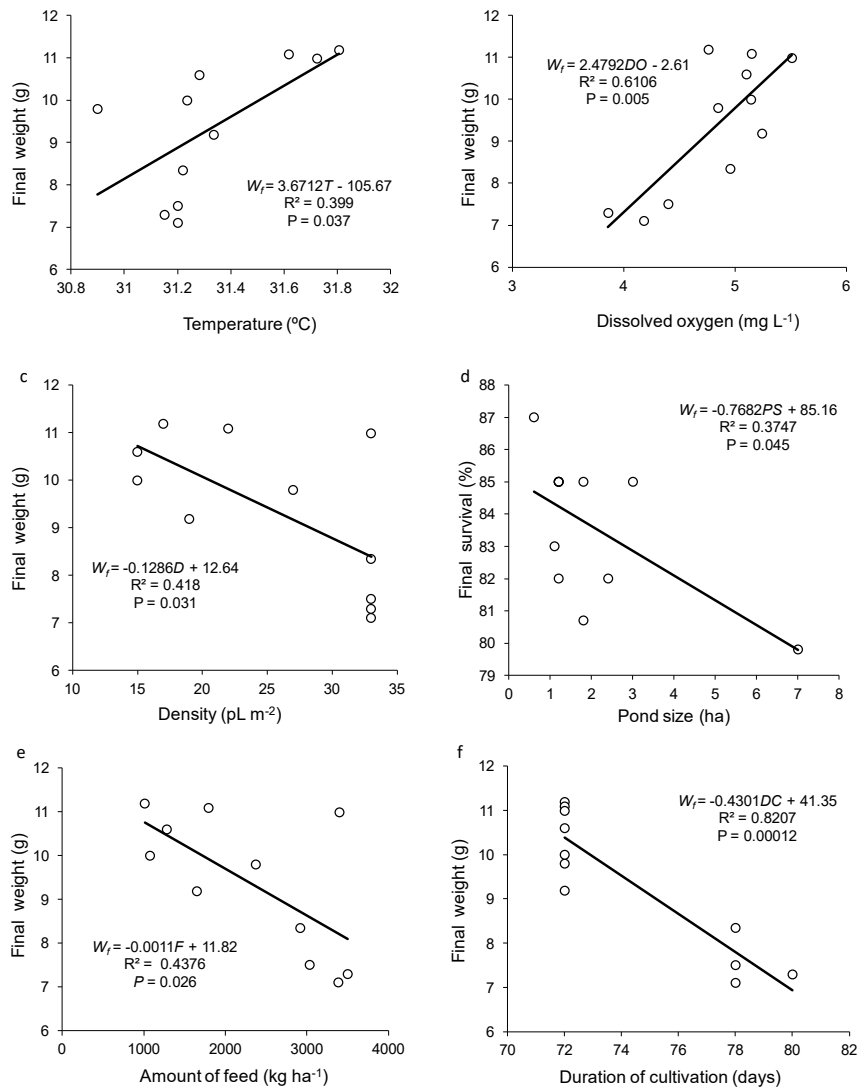


Figure 1. Simple linear regression models between environmental and management variables related to production parameters: final weight-temperature (a), dissolved oxygen (b), stocking density (c), amount of feed (e), duration of cultivation (f) and final survival-pond size (d).

Figura 1. Modelos de regresión lineal simple entre las variables ambientales y de manejo que se relacionan con los parámetros de producción: peso final-temperatura (a), oxígeno disuelto (b), densidad de población (c), cantidad de alimento (e), duración del cultivo (f), supervivencia final-tamaño del estanque (d).

Simulation

Simulation analysis with simple linear regression models used in the production parameters (survival and final weight) to estimate the final biomass, showed that biomass was more sensitive to dissolved oxygen alterations, followed by temperature, duration of cultivation, amount of feed, and stocking density. The variable that less affected the production was pond size (Table 3). These results showed that the decrease or increase (in percentage terms) in environmental variables from their values (using maximum and minimum) caused changes in average biomass production, according to the variability involvement to each variable. Hence, the variation of dissolved oxygen produced the greatest changes, as biomass increased from 1,521 kg ha⁻¹ using the minimum average value of dissolved oxygen to 2,429 kg ha⁻¹ (59.70 %) using the maximum average value (Table 3). For the duration of cultivation (maximum-minimum values) the production decreased from 2,237 kg ha⁻¹ to 1,495 kg ha⁻¹ (- 33.17 %), for temperature (maximum-minimum) the production increased from 1,674 kg ha⁻¹ to 2,387 kg ha⁻¹ (42.59 %), for the amount of feed used (maximum-minimum values) the production decreased from 2,345 kg ha⁻¹ to 1,733 kg ha⁻¹ (-26.10 %). Regarding the stocking density (maximum-minimum values) the production decreased from 2,308 kg ha⁻¹ to 1,809 kg ha⁻¹ (-21.62%). The smallest changes in biomass were observed using the pond size. The production decreased from 1,983 kg ha⁻¹ using small ponds to 1,868 kg ha⁻¹ (-5.80 %) using large ponds (Table 3).

Simulación

Los análisis de simulación con los modelos de regresión lineal simple utilizados en los parámetros de producción (supervivencia y peso final) para estimar la biomasa final, mostraron que la biomasa fue más sensible a los cambios en el oxígeno disuelto, seguido de la temperatura, la duración del cultivo, la cantidad de alimento utilizado y la densidad de siembra. La variable que menos afectó a la producción fue el tamaño del estanque (Tabla 3). Estos resultados mostraron que la disminución o el aumento (en términos porcentuales) de los valores de las variables ambientales a partir de sus valores (utilizando el máximo y el mínimo) provocaron cambios en la producción media de la biomasa, según la implicación de la variabilidad a cada variable. Así, la variación del oxígeno disuelto produjo los mayores cambios, ya que la biomasa pasó de 1,521 kg ha⁻¹ utilizando el valor medio mínimo de oxígeno disuelto a 2,429 kg ha⁻¹ (59.70 %) utilizando el valor medio máximo (Tabla 3). Para la duración del cultivo (valores máximos - mínimos) la producción disminuyó de 2,237 kg ha⁻¹ a 1,495 kg ha⁻¹ (- 33.17 %), para la temperatura (máxima - mínima) la producción aumentó de 1,674 kg ha⁻¹ a 2,387 kg ha⁻¹ (42.59 %), para la cantidad de alimento utilizado (valores máximos - mínimos) la producción disminuyó de 2,345 kg ha⁻¹ a 1,733 kg ha⁻¹ (-26.10 %). En cuanto a la densidad de siembra (valores máximos - mínimos), la producción disminuyó de 2,308 kg ha⁻¹ a 1,809 kg ha⁻¹ (-21.62%). Los menores cambios en la biomasa se observaron con el tamaño del estanque. La producción disminuyó de 1,983 kg ha⁻¹ utilizando estanques pequeños a 1,868 kg ha⁻¹ (-5.80 %) utilizando estanques grandes (Tabla 3).

Table 2.
Correlation between environmental and management variables. Only those that resulted with significant differences are shown ($\rho < 0.05$).

Tabla 2.
Correlación entre las variables ambientales y de manejo. Sólo se muestran las que resultaron con diferencias significativas ($\rho < 0.05$).

Variables	DO (mg L ⁻¹)	DC (days)	PS (ha)	F (kg ha ⁻¹)
D (pL m ⁻²)		0.7430	-0.6453	0.9774
PS				-0.7296
DC (days)	-0.8178			0.7572

DO= Dissolved Oxygen, DC= Duration of culture, PS= Pond size, F= Amount of feed, D= Stocking Density.

DO= Oxígeno disuelto, DC= Duración del cultivo, PS= Tamaño del estanque, F= Cantidad de alimento utilizado, D= Densidad de siembra.

Discussion

According to the results of variance analysis, environmental variables such as temperature and dissolved oxygen showed the greatest variability between ponds and therefore, these variables had an effect on production. The exception among the environmental variables analyzed was salinity, as there were no statistically significant differences between the ponds, since it remained relatively constant, without an effect on the production parameters.

The literature has shown that growth in *P. vannamei* increases with increasing temperature up to 32 °C. (Ponce-Palafox et al., 2019). Ruiz-Velazco et al. (2010a, b), Estrada-Pérez et al. (2015) and Estrada-Pérez et al. (2020) found that at higher temperatures, the final weights of shrimp were better in intensive and semi-intensive farming so that the results of this investigation are consistent with the findings by these authors.

Regarding dissolved oxygen, fluctuations throughout the day were evident, especially in ponds that had a high stocking density. During the early morning, due to biological oxygen demand critical oxygen levels may lead to mortalities (Hepher & Pruginin, 1981; Carranza, 2020).

In the present study it should be noted that the concentrations of dissolved oxygen in some ponds were lower than those recommended by McGraw et al. (2001) for shrimp farming, yet were above the range considered (approximately 3 ups) as stress inducing (Brock & Main, 1994). Despite this, in the present study no mass mortalities were observed in culture. However, the final weight showed that higher concentrations of dissolved oxygen lead to greater weight achieved at the end of the culture, coinciding with Rahmawati et al. (2021) in indoor raceway ponds. Therefore, it was observed that oxygen dissolved variations had a negative effect on shrimp growth which lead to a suboptimal production in low concentrations. Ruiz-Velazco et al. (2010a, b) and Estrada-Pérez et al. (2020) also found this relationship in intensive and semi-intensive commercial shrimp farming.

In this study, salinity concentrations higher than those recommended for shrimp culture were recorded

Discusión

De acuerdo a los resultados del análisis de la varianza, las variables ambientales temperatura y oxígeno disuelto fueron las que mostraron mayor variabilidad entre los estanques y, por tanto, estas variables tuvieron un efecto sobre la producción. La excepción entre las variables ambientales analizadas en cuanto a su varianza fue la salinidad, ya que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los estanques, pues se mantuvo relativamente constante, sin un efecto sobre los resultados de producción.

La literatura ha demostrado que el crecimiento de *P. vannamei* aumenta con el incremento de la temperatura hasta los 32 °C. (Ponce-Palafox et al., 2019). Ruiz-Velazco et al. (2010a, b), Estrada-Pérez et al. (2015) y Estrada-Pérez et al. (2020) encontraron que a mayores temperaturas, los pesos finales de los camarones fueron mejores en la producción intensiva y semi-intensiva, por lo que los resultados de esta investigación son consistentes con los hallazgos de estos autores.

En cuanto al oxígeno disuelto, las fluctuaciones a lo largo del día fueron evidentes, especialmente en los estanques que tenían una alta densidad de siembra. Durante las primeras horas de la mañana, debido a la demanda biológica de oxígeno, los niveles críticos de oxígeno pueden provocar mortalidades (Hepher & Pruginin, 1981; Carranza, 2020).

En el presente estudio, cabe destacar que las concentraciones de oxígeno disuelto en algunos estanques fueron inferiores a las recomendadas por McGraw et al. (2001) para el cultivo de camarones, aunque estaban por encima del rango considerado (aproximadamente 3 ups) como inductor de estrés (Brock & Main, 1994). A pesar de ello, en el presente estudio no se observaron mortalidades masivas en el cultivo. Sin embargo, el peso final mostró que a mayores concentraciones de oxígeno disuelto mayor fue el peso alcanzado al final del cultivo, coincidiendo con Rahmawati et al. (2021) en estanques raceway. Por lo tanto, se observó que las variaciones en el oxígeno disuelto tuvieron un efecto negativo en el crecimiento de los camarones, lo que llevó a una producción sub-óptima cuando las concentraciones fueron bajas. Ruiz-Velazco et al. (2010a, b) y Estrada-Pérez et al. (2020) también encontraron esta relación en la producción comercial intensiva y semi-intensiva de camarones.

En este estudio se registraron concentraciones de salinidad superiores a las recomendadas para el cultivo

(Bray *et al.*, 1994). However, salinities lower than seawater (15-30 ups) have been associated with better growth in *P. vannamei* culture by several studies (Hernandez-Llamas & Villareal-Colmenares, 1999; Ruiz-Velazco *et al.*, 2010a, b; Estrada-Pérez, 2020). High salinity concentrations in the present study made it impossible to determine whether they actually had an effect on the growth or survival of the shrimp. Although the literature is not conclusive with respect to optimum salinity for *P. vannamei* since the white shrimp is a euryhaline species and, therefore, is resistant to wide salt concentration fluctuations (0.5 to 50 ups) (Bray *et al.*, 1994; Saoud *et al.*, 2003).

It has been reported a negative effect of the use of high stocking densities on the development of shrimps *P. vannamei* (Otoshi *et al.*, 2007; Araneda *et al.*, 2008; Schweitzer *et al.*, 2013;). The results of the present study also showed a negative effect on final weight when high stocking densities were used, which led to poor production. Contrarily, Casillas & Ibarra (1996) found that the highest production in their study was obtained at high stocking densities. However, in this study, over 45 % of the ponds used had stocking densities considered high for semi-intensive culture (stocking densities higher than normal for semi-intensive culture), but there were no aeration systems. This limitation probably affected shrimp performance, according to Musa (2013) and Boyd (2017), as dissolved oxygen played an important role in improving water quality. Also, Mena-Herrera *et al.* (2006) mention that the high oxygen consumption in high biomass shrimp ponds

de camarones (Bray *et al.*, 1994). Sin embargo, las salinidades inferiores al agua de mar (15-30 ups) han sido asociadas a un mejor crecimiento en el cultivo de *P. vannamei* por varios estudios (Hernández-Llamas & Villareal-Colmenares, 1999; Ruiz-Velazco *et al.*, 2010a, b; Estrada-Pérez *et al.*, 2020). Las altas concentraciones de salinidad en el presente estudio impidieron determinar si realmente tenían un efecto sobre el crecimiento o la supervivencia de los camarones. Aunque la literatura no es concluyente con los óptimos de salinidad para *P. vannamei* ya que el camarón blanco es una especie eurihalina y, por lo tanto, es resistente a amplias fluctuaciones de este factor (0.5 a 50 ups) (Bray *et al.*, 1994; Saoud *et al.*, 2003).

Se ha reportado un efecto negativo del uso de altas densidades de siembra en el desarrollo del camarón *P. vannamei* (Otoshi *et al.*, 2007; Araneda *et al.*, 2008; Schweitzer *et al.*, 2013). Los resultados del presente estudio, también mostraron un efecto negativo en el peso final cuando se utilizaron altas densidades de siembra, lo que condujo a una producción pobre. Por el contrario, Casillas & Ibarra (1996) encontraron que la mayor producción en su estudio se obtuvo con altas densidades de siembra. Sin embargo, en este estudio, más del 45 % de los estanques utilizados tenían densidades de población consideradas altas para el cultivo semi-intensivo (densidades de población superiores a las normales para el cultivo semi-intensivo), pero no hubo sistemas de aireación. Esta limitación probablemente afectó al rendimiento de los camarones, según Musa (2013) y Boyd (2017), ya que el oxígeno disuelto desempeñó un papel importante en la mejora de la calidad del agua. Asimismo, Mena-Herrera *et al.* (2006) mencionan que el elevado

Table 3.
Correlation of the production parameters with the environmental and management variables. Only those that resulted with significant differences are shown ($p < 0.05$).

Tabla 3.
Correlación de los parámetros de producción con las variables ambientales y de manejo. Sólo se muestran los que resultaron con diferencias significativas ($p < 0.05$)

Parameters	T (°C)	DO (mg L ⁻¹)	D (pL m ⁻²)	DC (days)	F (kg ha ⁻¹)	PS (ha)
W _f (g)	0.6316	0.7814	-0.6472	-0.9059	-0.6805	
N _f (%)						-0.6121

W_f = Final weight, N_f = Final survival, T = Temperature, OD = Dissolved Oxygen, D = Stocking Density, DC = Duration of culture, F = Amount of feed, PS = Pond size.

W_f = Peso final, N_f = Supervivencia final, T = Temperatura, OD = Oxígeno disuelto, D = Densidad de siembra, DC = Duración del cultivo, F = Cantidad de alimento, PS = Tamaño del estanque.

suggests that the pond's load capacity depends on water quality, in particular on dissolved oxygen fluctuations. In addition, Martínez (1993) suggested that the optimum stocking density for a semi-intensive production system of *P. vannamei* is 22 shrimp m⁻² for the spring-summer cycle. Therefore, one of the most important challenges to overcome when working with high densities is the limitation represented by oxygen availability (Krummenauer et al., 2011), and the significant impacts that different aeration devices can have on shrimp growth in different culture systems (Lara et al., 2017).

In intensive shrimp farming, density-dependent growth and survival is a typical response mainly due to a combination of factors, including reduced availability of natural food sources and space, increased cannibalism, decreased water quality, and accumulation of undesirable sediments (Arnold et al., 2006). Arambul-Muñoz et al. (2019) mention that total ammonia nitrogen (TAN), nitrate, and total phosphorus water quality were significantly higher at a higher density, furthermore they observed that growth rates and survival decreased as density increased after 300 org m⁻³ of an intensive photoheterotrophic white shrimp (*Penaeus vannamei*) system. Krummenauer et al. (2011) observed in a super-intensive culture of *Penaeus vannamei* in a Biofloc technology (BFT) system that, stocking density was pivotal to shrimp survival, verifying along with other studies that *P. vannamei* productivity is limited by reduced growth as stocking density increases (Moss & Moss, 2004; Coman et al., 2004). An efficient aeration system led to increasing stocking density (Samocha et al., 2004) agreeing with Da Silveira et al., (2020) who consider stocking densities of 500 shrimp m⁻² viable for BFT production systems; however, the author mentions that, this implies careful planning in terms of Dissolved Oxygen consumption, and that the application of new technologies may potentially lead to even higher densities in the future.

According to the analysis of correlation and simple linear regression, shrimp growth was affected by high stocking densities and low dissolved oxygen concentrations (Table 3), which suggested that the load capacity was exceeded. It is encouraged the use of aerators for this type of culture as

consumo de oxígeno en los estanques de camarones de alta biomasa, sugiere que la capacidad de carga del estanque depende de la calidad del agua, en particular de las fluctuaciones del oxígeno disuelto. Además, Martínez (1993) sugirió que la densidad de siembra óptima para un sistema de producción semi-intensivo de *P. vannamei* es de 22 camarones m⁻² para el ciclo primavera-verano. Por lo tanto, uno de los retos más importantes a superar cuando se trabaja con altas densidades, es la limitación que representa la disponibilidad de oxígeno (Krummenauer et al., 2011), y los impactos significativos que los diferentes dispositivos de aireación pueden tener en el crecimiento del camarón en diferentes sistemas de cultivo (Lara et al., 2017).

En el cultivo intensivo de camarones, el crecimiento y la supervivencia dependientes de la densidad es una respuesta típica debida principalmente a una combinación de factores, entre los que se incluyen: la reducción de la disponibilidad de fuentes de alimento natural y del espacio, el aumento del canibalismo, la disminución de la calidad del agua y la acumulación de sedimentos indeseables (Arnold et al., 2006). Arambul-Muñoz et al. (2019) mencionan que el nitrógeno amoniacal total (TAN), el nitrato y el fósforo total de la calidad del agua, fueron significativamente más altos en la densidad más alta, además observaron que las tasas de crecimiento y la supervivencia disminuyeron a medida que la densidad aumentó después de 300 org m⁻³ de un sistema intensivo de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) fotoheterotrófico. Krummenauer et al. (2011) observaron en un cultivo superintensivo de *Penaeus vannamei* en un sistema de tecnología Biofloc (BFT) que, la densidad de siembra era probablemente la principal influencia en la supervivencia del camarón, verificando junto con otros estudios que la productividad de *P. vannamei* está limitada por un crecimiento reducido a medida que aumenta la densidad de siembra (Moss & Moss, 2004; Coman et al., 2004). Un sistema de aireación eficiente puede probablemente facilitar el aumento de la densidad de siembra (Samocha et al., 2004), coincidiendo con Da Silveira et al., (2020) que considera viables densidades de población de 500 camarones m⁻² para los sistemas de producción de BFT; sin embargo, menciona que, esto implica una planificación cuidadosa en términos de consumo de oxígeno disuelto, y que la aplicación de nuevas tecnologías puede potencialmente conducir a densidades aún mayores en el futuro.

De acuerdo con los análisis de correlación y regresión lineal simple, el crecimiento del camarón se vio afectado por las altas densidades de siembra y las bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Tabla 3), lo que sugirió que se superó la capacidad de carga. Se recomienda el uso de aireadores

reported in previous reports (McGraw *et al.*, 2001; Da Silveira *et al.*, 2020).

Reported attempts to increase production have concentrated to increase harvest size, for which two options are available according to Casillas & Villarreal (1995): 1) An increased culture period and 2) a reduction of the stocking density. In the present study, the weight gain of the shrimp was close to 1 g per week, similar to what is considered appropriate for commercial farms. However, shrimp held for a longer period of time in ponds stocked at high densities were affected in final weight and therefore their growth was suboptimal (Otoshi *et al.*, 2007; Araneda *et al.*, 2008; Schweitzer *et al.*, 2013). Another factor in consideration was the apparent negative effect on final weight related to the amount of feed used, this could have been a consequence of inadequate feed management leading to suboptimal production and also problems related to water quality (Tacón *et al.*, 2013). However, this could be also linked to high stocking densities in small-sized ponds according to the correlation analysis.

On the other hand, there are several indications related to the negative correlation between dissolved oxygen and the duration of culture. The most convincing was the high dissolved oxygen demand by the shrimp during growth. Rahmawati *et al.* (2021) found a decrease in dissolved oxygen levels as days of culture increased, this was due to increased biomass of *P. vannamei*, indicating an increase in oxygen consumption rates (Kureshy & Davis, 2000). Another indication was the accumulation of organic matter (uneaten food and feces) as the culture progressed. Uneaten feed absorbs water and eventually settles at the pond bottom, decomposing later, adding excess nutrients to the water, and causing oxygen depletion (Iber & Kasan, 2021). Therefore, the biological oxygen demand tended to increase, making necessary supplemental oxygen through aeration.

In the present study, it was found a negative correlation between the size of the pond and survival. This may be explained by the use of a small pond size, which made its management more convenient for survival. The water flow produced by water exchanges resulted in more efficient and faster control if any complications arose. In small ponds, it is easier to monitor water quality, shrimp populations, and feeding than in large ponds. The action of wind in small ponds is more effective in

para este tipo de cultivo, tal como se ha informado en estudios anteriores sobre el cultivo de camarones (McGraw *et al.*, 2001; Da Silveira *et al.*, 2020).

Los intentos de aumentar la producción se han concentrado en el incremento del tamaño en la cosecha, para lo cual existen dos opciones, según Casillas y Villarreal (1995): 1) Un aumento del período de cultivo y 2) una reducción de la densidad de siembra. En el presente estudio, el aumento de peso de los camarones fue en promedio cercano a 1 g por semana, similar a lo que se considera apropiado para las granjas comerciales. Sin embargo, los camarones mantenidos durante más tiempo en estanques con altas densidades se vieron afectados en su peso final y, por lo tanto, su crecimiento fue subóptimo (Otoshi *et al.*, 2007; Araneda *et al.*, 2008; Schweitzer *et al.*, 2013). Otro factor en consideración fue el aparente efecto negativo en el peso final relacionado con la cantidad de alimento utilizado, esto podría haber sido consecuencia de un manejo inadecuado del alimento que llevó a una producción sub-óptima y también a problemas relacionados con la calidad del agua (Tacón *et al.*, 2013). Sin embargo, esto también podría estar relacionado con el uso de altas densidades de siembra en estanques de pequeño tamaño, ya que, según el análisis de correlación, estaban relacionados con períodos de cultivo más largos y mayores densidades de siembra.

Por otra parte, hay varios indicios relacionados con la correlación negativa entre el oxígeno disuelto y la duración del cultivo. El más convincente fue la alta demanda de oxígeno disuelto por parte de los camarones durante el crecimiento. Rahmawati *et al.* (2021) encontraron una disminución de los niveles de oxígeno disuelto a medida que aumentaban los días de cultivo, esto debido al aumento de la biomasa de *P. vannamei*, lo que indica un incremento en la tasa de consumo de oxígeno (Kureshy & Davis, 2000). Otro indicio fue la acumulación de materia orgánica (alimento no consumido y heces) a medida que avanzaba el cultivo. El alimento no consumido absorbe el agua y acaba depositándose en el fondo del estanque, descomponiéndose posteriormente, añadiendo un exceso de nutrientes al agua y provocando el agotamiento del oxígeno (Iber & Kasan, 2021). Por lo tanto, la demanda biológica de oxígeno tiende a aumentar, haciendo necesario el oxígeno suplementario a través de la aireación.

En el presente estudio, se encontró una correlación negativa entre el tamaño del estanque y la supervivencia. Esto puede explicarse por el uso de un tamaño de estanque pequeño, que hizo que su manejo fuera más conveniente para la supervivencia. El flujo de agua producido por

mixing, or solids from the bottom of the water (Brune & Drapcho, 1991).

In the same sense, it has been emphasized the use of production units with small pond sizes for best management practices (Hernandez-Llamas & Villareal-Colmenares, 1999; Milstein *et al.*, 2005;

los intercambios de agua, resultó más eficiente y más rápido de controlar si surgía alguna complicación. En los estanques pequeños es más fácil controlar la calidad del agua, las poblaciones de camarones y la alimentación que en los estanques grandes. La acción del viento en los estanques pequeños es más eficaz para mezclar los sólidos del fondo del agua (Brune & Drapcho, 1991).

Table 4.
Simple regression model simulation using the maximum, medium and minimum mean values of the variables related to production parameters [final weight (W_f) and final survival (N_f)].

Tabla 4.
Simulación del modelo de regresión simple utilizando los valores máximos, medios y mínimos medios de las variables relacionadas con los parámetros de producción [peso final (W_f) y supervivencia final (N_f)].

Mean values of the variables	W_f (g)	N_f (shrimps ha ⁻¹)	Biomass (Kg ha ⁻¹)	Increase or decrease in biomass (kg ha ⁻¹)	Percentage (%)
Dissolved Oxygen (mg L⁻¹)					
Medium	4.9	9.53	215,528	2,055	
Maximum	5.6	11.27	215,528	2,429	908
Minimum	3.9	7.05	215,538	1,521	59.70
Temperature (°C)					
Medium	31.4	9.60	215,528	2,070	
Maximum	31.8	11.07	215,528	2,387	713
Minimum	30.9	7.77	215,528	1,674	42.59
Stocking density (postlarvae m⁻²)					
Medium	25	9.42	215,528	2,031	
Maximum	33	8.39	215,528	1,809	-499
Minimum	15	10.71	215,528	2,308	-21.62
Pond size (ha)					
Medium	2	9.36	209,064	1,958	
Maximum	7	9.36	199,461	1,868	-115
Minimum	0.6	9.36	211,753	1,983	-5.80
Amount of feed (kg ha⁻¹)					
Medium	2,265	9.33	215,528	2,011	
Maximum	3,439	8.04	215,528	1,733	-612
Minimum	855	10.88	215,528	2,345	-26.10
Duration of cultivation (days)					
Medium	74	9.36	215,528	2,018	
Maximum	80	6.93	215,528	1,495	-742
Minimum	72	10.38	215,528	2,237	-33.17

Magallón, 2006). Several studies using multiple linear regression models support that in small-sized units lower mortality rates are obtained (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010b; Estrada-Pérez *et al.*, 2020). Similarly, a negative correlation between large-sized ponds and survival was observed. The smaller ponds stocked with the highest stocking density presented better survival (Table 2) which indicated the benefit of small ponds monitoring. It is expected, that until a certain limit in which a culture lasts, the final weight of the shrimp increases, this situation turned out as expected, the longer the culture duration, the greater the final weight is obtained (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010b; Ruiz-Velazco *et al.*, 2013; Estrada-Pérez *et al.*, 2015; Estrada-Pérez *et al.*, 2020). This is apparently contrary to what was found in this research; however, it is more likely that this is due to an effect of stocking density and dissolved oxygen in the water, since the ponds that lasted longer were the ponds stocked at higher densities, and these same ponds that lasted longer had lower dissolved oxygen values in the water (Table 2). In other words, the final shrimp weights reached better sizes in shorter cultures, because they were stocked at lower stocking densities and had higher dissolved oxygen values, which resulted in faster harvesting.

Simulation analysis with simple linear regression models showed that the variation in dissolved oxygen was the most influential variable as shown by the production results (biomass), followed by temperature, stocking density, and finally pond size (Table 4).

The present study confirmed that the fluctuations of dissolved oxygen affected the production. Additionally, as mentioned above, stocking densities higher than those recommended for semi-intensive shrimp culture could have an effect on the dissolved oxygen concentration. The stocking density combined with other variables such as temperature, could affect the growth of organisms and hence yield production.

Further studies are needed to determine if an increase in the concentration of dissolved oxygen, particularly for this kind of farming (small pond size

En el mismo sentido, se ha enfatizado el uso de unidades de producción con tamaño de estanque pequeño para las mejores prácticas de manejo (Hernández-Llamas & Villareal-Colmenares, 1999; Milstein *et al.*, 2005; Magallón, 2006). Varios estudios que utilizan modelos de regresión lineal múltiple apoyan lo anterior, ya que establecen que en unidades pequeñas se obtienen menores tasas de mortalidad (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010b; Estrada-Pérez *et al.*, 2020). Del mismo modo, el presente estudio también encontró una correlación negativa entre los estanques de gran tamaño y la supervivencia. Los estanques más pequeños, con la mayor densidad de población, presentaron una mejor supervivencia (Tabla 2), lo que indica el beneficio del seguimiento de los estanques pequeños. Es de esperar, que hasta un cierto límite en el que dure un cultivo, el peso final del camarón aumente, esta situación resultó como se esperaba, que a mayor duración del cultivo, mayor es el peso final que se obtiene (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010b; Ruiz-Velazco *et al.*, 2013; Estrada-Pérez *et al.*, 2015; Estrada-Pérez *et al.*, 2020). Esto es aparentemente contrario a lo que se encontró en esta investigación; sin embargo, es más probable que esto se deba a un efecto de la densidad de siembra y del oxígeno disuelto en el agua, ya que los estanques que duraron más tiempo fueron los estanques sembrados con densidades más altas y estos mismos estanques que duraron más tiempo tuvieron valores más bajos de oxígeno disuelto en el agua (Tabla 2). En otras palabras, los pesos finales de los camarones alcanzaron mejores tallas en los cultivos más cortos, ya que se sembraron a menores densidades de siembra y tuvieron valores más altos de oxígeno disuelto, lo que resultó en una cosecha más rápida.

El análisis de simulación con los modelos de regresión lineal simple mostró que la variación del oxígeno disuelto fue la variable más influyente según los resultados de producción (biomasa), seguida de la temperatura, la densidad de siembra y, por último, el tamaño del estanque (Tabla 4).

El presente estudio confirmó que las fluctuaciones del oxígeno disuelto afectaron a la producción. Además, como se ha mencionado anteriormente, las densidades de siembra superiores a las recomendadas para el cultivo semi-intensivo de camarón, podrían tener un efecto sobre la concentración de oxígeno disuelto. La densidad de siembra, combinada con otras variables como la temperatura, podría afectar al crecimiento de los organismos y, por tanto, a la producción.

Se necesitan más estudios para determinar si un aumento de la concentración de oxígeno disuelto, en particular para este tipo de cultivo (tamaño de estanque pequeño y densidades

and appropriate stocking densities) could enhance the growth and survival of cultured shrimp and therefore improve farmed shrimp.

Conclusions

Given that dissolved oxygen was the most sensitive variable, supplemental aeration is essential at these stocking densities. A combination of high oxygen values (controlled with supplemental aeration), lower stocking densities, and short culture durations in small ponds, could increase production in this type of system.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to shrimp farmers in Nayarit for their cooperation in this study, especially to Biol. Encarnación Torres García. Thanks to the anonymous reviewers for their valuable comments. Nallely Estrada-Pérez and Margarita Estrada-Pérez were a recipient of master fellowships from CONACyT.

References

- Arambul-Muñoz, E., Ponce-Palafox, J. T., Claro De Los Santos, R., Aragón-Noriega, E.A., Rodríguez-Domínguez, G., & Castillo-Vargasmachuca, S.G. (2019). Influence of stocking density on production and water quality of a photoheterotrophic intensive system of white shrimp (*Penaeus vannamei*) in circular lined grow-out ponds, with minimal water replacement. *Latin american journal of aquatic research*, 47(3), 449-455. <https://doi.org/10.3856/vol47-issue3-fulltext-7>
- Araneda M., Pérez, E. P., & Gasca-Leyva, E. (2008). White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: Condition state based on length and weight. *Aquaculture*, 283 (1-4), 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.030>
- Arnold, S. J., Sellars, M. J., Crocos, P. J., & Coman, G. J. (2006). Intensive production of juvenile tiger shrimp *Penaeus monodon*: an evaluation of stocking density and artificial substrates. *Aquaculture*, 261(3), 890-896. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.07.036>
- Bray, W. A., Lawrence, A. L., & Leung-Trujillo, J. R. (1994). The effect of salinity on growth and survival of *Penaeus vannamei*, with observations on the interaction of IHNV and salinity. *Aquaculture*, 122(2-3), 133-146. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)90505-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)90505-3)
- Boyd, C. E. (2017). General relationship between water quality and aquaculture performance in ponds. *Fish Diseases*, 147-166. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804564-0.00006-5>.
- Brock, J. A., & Main, K. L. (1994). A Guide to the Common Problems and Diseases of Cultured *Penaeus vannamei*. *World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana*.
- Brune, D. E., & Drapcho, C. M. (1991). Fed pond aquaculture. Aquaculture systems engineering: Proceedings of the World Aquaculture Society and the American Society of Agricultural Engineers Jointly Sponsored Session. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA.
- Carranza, É. O. (2020). Evaluación de la tasa de consumo de oxígeno del *Penaeus vannamei* con relación a la salinidad, temperatura y peso corporal. *Revista Ciencia y Tecnología*, 25, 55-65. <https://doi.org/10.5377/rct.v13i25.10412>

de siembra adecuadas) podría mejorar el crecimiento y la supervivencia de los camarones cultivados y, por tanto, mejorar las granjas de camarón.

Conclusiones

Se concluye que, dado que el oxígeno disuelto fue la variable más sensible, es necesaria una aireación suplementaria con estas densidades de de siembra. Una combinación de valores altos de oxígeno (controlados con aireación suplementaria), densidades de siembra más bajas y duraciones de cultivo cortas en estanques pequeños, podría aumentar la producción en este tipo de sistemas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los granjeros de camarón de Nayarit por su cooperación para este estudio, especialmente a la Biol. Encarnación Torres García. Gracias a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios. Nallely Estrada-Pérez y Margarita Estrada-Pérez fueron beneficiarias de becas de maestría del CONACyT.

- Casillas, H. R., & Ibarra, G. J. C. (1996). Efecto de la densidad de cultivo de camarón blanco *P. vannamei* en estanques comerciales (Costa Sur, Sonora, México). Dirección de educación en ciencia y tecnología del mar. *Oceanología*, 2(10), 153-165.
- Casillas, H. R., & Villarreal, H. C. (1995). Semi-intensive culture of the white shrimp *Penaeus vannamei* in the northwest of Mexico: South coast of Sonora. *Aquaculture*, 95.
- Coman, G. J., Crocos, P. J., Preston, N. P., & Fielder, D. (2004). The effects of density on the growth and survival of different families of juvenile *Marsupenaeus japonicus* Bate. *Aquaculture* 229 (1-4), 215–223. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00402-2)
- Da Silveira, L. G. P., Krummenauer, D., Poersch, L. H., Rosas, V. T., & Wasielesky, W. (2020). Hyperintensive stocking densities for *Litopenaeus vannamei* grow-out in biofloc technology culture system. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51, 1290-1300. <https://doi.org/10.1111/jwas.12718>
- Estrada-Pérez, M., Ruiz-Velazco, J. M. J., Hernández-Llamas, A., & Zavala-Leal, I. (2015). A bio-economic approach to analyze the role of alternative seeding-harvesting schedules, water quality, stocking density and duration of cultivation in semi-intensive production of shrimp in Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 43(3), 466-472. <https://doi.org/10.3856/vol43-issue3-fulltext-8>
- Estrada-Pérez, A., Ruiz-Velazco, J. M. J., Hernández-Llamas, A., Zavala-Leal, I., & Martínez-Cárdenas, L. (2016). Deterministic and stochastic models for analysis of partial harvesting strategies and improvement of intensive commercial production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquacultural Engineering*, 70, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.11.003>
- Estrada-Pérez, N., Ruiz-Velazco, J. M. J., Magallon-Barajas, F.J., Campa-Cordova, A. I., & Hernández-Llamas, A. (2020). Dynamic stock model for analysing semi-intensive production of whiteleg shrimp *Litopenaeus (Penaeus) vannamei* affected by the acute hepatopancreatic necrosis disease: Assessment of disease severity indicators and relationships with pond water quality parameters. *Aquaculture Research*, 51(1), 242-254. <https://doi.org/10.1111/are.14370>
- FAO (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Gonzalez-Romero, M. A., Hernandez-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J. M. J., Plascencia-Cuevas, T. N., & Nieto-Navarro, J. T. (2014). Stochastic bio-economic optimization of pond size for intensive commercial production of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 433, 496-503. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.07.010>
- González-Romero, M. A., Ruiz-Velazco, J. M. J., Margarita Estrada-Pérez, M., Nieto-Navarro, J.T., Zavala-Leal, I., & Hernandez-Llamas, A. (2018). Assessing uncertainty of semi-intensive production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using partial harvesting programs. *Aquaculture Research*, 49(2), 953–962. <https://doi.org/10.1111/are.13542>
- Hepher, B., & Prucinin, Y. (1981). Commercial Fish Farming. *Interscience Publishing*. New York.
- Hernandez-Llamas, A., & Villarreal-Colmenares, H. (1999). A software reference to shrimp *Litopenaeus vannamei* farming practices. *Aquaculture Economics & Management*, 3 (3), 267-280. <https://doi.org/10.1080/13657309909380253>
- Iber, B. T., & Kasan, N. A. (2021) Recent advances in Shrimp aquaculture wastewater management. *Heliyon*, 7 (11), e08283 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08283>
- Islam, M. S., Milstein, A., Wahab, M. A., Kamal, A. H. M., & Dewan, S. (2005). Production and economic return of shrimp aquaculture in coastal ponds of different sizes and with different management regimes. *Aquaculture International*, 13, 489-500. <https://doi.org/10.1007/s10499-005-9000-7>
- Jaffer, Y. D., Saraswathy, R., Ishfaq, M., Antony, J., Bundela, D. S., & Sharma, P. C. (2020). Effect of low salinity on the growth and survival of juvenile pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*: A revival. *Aquaculture*, 515, 734561. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734561>
- Krummenauer, D., Peixoto, S., Cavalli, R. O., Poersch, L. H., & Wasielesky, W. (2011). Superintensive Culture of White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in a Biofloc Technology System in Southern Brazil at Different Stocking Densities. *Journal of the World Aquaculture Society*, 42(5), 726–733. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2011.00507.x>
- Kureshy, N., & Davis, D. A. (2020). Metabolic requirement for protein by pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Avances en Nutrición Acuicola. Memorias del V Simposium Internacional de Nutrición

- Acuícola. <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/271>
- Lara, G., Krummenauer, D., Abreu, P. C., Poersch, L. H., & Wasielesky, W. J. (2017). The use of different aerators on *Litopenaeus vannamei* biofloc culture system: Effects on water quality, shrimp growth and biofloc composition. *Aquaculture International*, 25, 147–162. <https://doi.org/10.1007/s10499-016-0019-8>
- Magallón, F.J. (2006). Desarrollo y aplicación de una metodología, para evaluar la variabilidad de la capacidad de carga de la acuicultura de camarón, en la región del Golfo de California. *Tesis doctoral. Universidad de La Habana, Cuba.*
- Martínez C. L. R. (1993). Camaronicultura: Bases técnicas y científicas para el cultivo de camarones peneidos. Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. *AGT Editor.*
- McGraw, W., Teichert-Coddington, D.R., Rouse, D. B., & Boyd, C. E. (2001). Higher minimum dissolved oxygen concentrations increase penaeid shrimp yield in earthen ponds. *Aquaculture*, 199(1-3), 311-321. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00530-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00530-0)
- Mena-Herrera, A., Gutiérrez-Corona, C., Linan-Cabello, M., & Sumano-Lopez, H. (2006). Effects of stocking densities on growth of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in earthen ponds. *The Israeli journal of aquaculture-Bamidgeh*, 50(3), 205-213. <http://hdl.handle.net/10524/19178>
- Milstein, A., Islam, M. S., Wahab, M. A., Kamal, A. H. M., & Dewan, S. (2005). Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. *Aquaculture International*, 13, 501-518. <https://doi.org/10.1007/s10499-005-9001-6>
- Moss, K. R. K., & Moss, S. (2004). Effects of Artificial Substrate and Stocking Density on the Nursery Production of Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of World Aquaculture Society*, 35 (4), 536-542. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2004.tb00121.x>
- Musa, S., Kisii, K., & Thorarensen, H. (2013). The effects of oxygen saturation and carbon dioxide concentration on the growth and feed conversion of aquaculture fish. *United Nations University-Fisheries Training Programme*, 1-47. <http://www.unuftp.is/static/fellows/document/safina13prf.pdf>
- Otoshi, C. A., Naguwa, S. S., Falesch, F. C., & Moss, S. M. (2007, March 01). Shrimp behavior may affect culture performance at superintensive stocking densities. *Global Aquaculture Advocate*. <https://www.globalseafood.org/advocate/shrimp-behavior-may-affect-culture-performance-at-super-intensive-stocking-densities/>
- Ponce-Palafox, J. T., Pavia, Á. A., López, D. G. M., Arredondo-Figueroa, J. L., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. R., Esparza-Leal, H., Ruiz-Luna, A., Páez-Osuna F., Castillo-Vargasmachuca S. G., & Peraza-Gómez, V. (2019). Response surface analysis of temperature-salinity interaction effects on water quality, growth and survival of shrimp *Penaeus vannamei* postlarvae raised in biofloc intensive nursery production. *Aquaculture*, 503, 312-321. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.020>
- Rahmawati, A.I., Saputra, R. N., Hidayatullah, A., Dwiarto, A., Junaedi, H., Cahyadi, D., ... & Rochman, N.T. (2021). Enhancement of *Penaeus vannamei* shrimp growth using nanobubble in indoor raceway pond. *Aquaculture and Fisheries*, 6 (3), 277-282. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.03.005>
- Ruiz-Velazco, J. M. J., Hernández-Llamas, A., Gomez-Muñoz, V. M., & Magallon, F. J. (2010a). Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease. *Aquaculture*, 300 (1-4), 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.12.027>
- Ruiz-Velazco, J. M. J., Hernández-Llamas, A., & Gomez-Muñoz, V. M. (2010b). Management of stocking density; pond size; starting time of aeration; and duration of cultivation for intensive commercial production of shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural Engineering*, 43 (3), 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.08.002>
- Ruiz-Velazco, J. M. J., Estrada-Pérez, M., Alfredo Hernández-Llamas, A., Nieto-Navarro, J. T., Peña-Messina, E. (2013). Stock model and multivariate analysis for prediction of semi-intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variables: A stochastic approach. *Aquacultural Engineering*, 56, 34– 41. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.003c>
- Samocha, T. M., Lawrence, A. L., Collins, C. A., Castille, F. L., Bray, W. A., Davies, C. J., & Wood, G. F. (2004). Production of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in high-density greenhouse-enclosed raceways using low salinity groundwater. *Journal of Applied Aquaculture*, 15(3-4), 1–19. https://doi.org/10.1300/J028v15n03_01
- Saoud, I. P., Davis, D. A., & Rouse, D. B. (2003). Suitability studies of inland well waters for *Litopenaeus vannamei*

- culture. *Aquaculture*, 217 (1-4), 373-383. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00418-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00418-0)
- Schweitzer, R., Arantes, R., Baloi, M. F., Costódio, P. F. S., Arana, L. V., Seiffert, W. Q., & Andreatta, E. R. (2013). Use of artificial substrates in the culture of *Litopenaeus vannamei* (biofloc system) at different stocking densities: Effects on microbial activity, water quality and production rates. *Aquacultural Engineering*, 54, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.12.003>
- Tacon, A. G. J., Jory, D. & Nunes, A. (2013). Shrimp feed management: issues and perspectives. In M.R. Hasan and M.B. New, eds. On-farm feeding and feed management in aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 583*. Rome, FAO. <https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/T583/root/18.pdf>
- Zar, J. H. (2010). Biostatistical Analysis. 5th ed. *Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey*.