CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

MODELADO BIOECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN INTENSIVA DE LANGOSTA DE AGUA DULCE (*C. quadricarinatus*).

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Bioeconomía Pesquera y Acuícola

P r e s e n t a

LAVINIA NÚÑEZ AMAO

La Paz, Baja California Sur, Diciembre de 2017

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 12 horas del día 22 del Mes de Noviembre del 2017, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"MODELADO BIOECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN INTENSIVA DE LANGOSTA DE AGUA DULCE (*C. quadricarinatus*)"

Presentada por el alumno:

LAVINIA NÚÑEZ AMAO

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN BIOECONOMÍA PESQUERA Y ACUÍCOLA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Dr. Humberto Villarreal Colmenares
Director de Tesis

Dr. Alfredo Hernández Llamas
Director de Tesis

Dra. Laurence Stephanie Mercier
Tutor

Dr. Ángel Isidro Campa Cordova
Tutor

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez
Tutor

Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra,
Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Humberto Villarreal Colmenares (Co-Director)

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.

Dr. Alfredo Hernández Llamas (Co-Director)

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.

Dra. Laurence Stéphanie Mercier (Tutor)

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.

Dr. Ángel Isidro Campa Córdova (Tutor)

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez (Tutor)

Universidad Marista de Mérida

COMITÉ REVISOR DE TESIS

Dr. Humberto Villarreal Colmenares

Dr. Alfredo Hernández Llamas

Dra. Laurence Stéphanie Mercier

Dr. Ángel Isidro Campa Córdova

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez

JURADO DE EXAMEN

Dr. Humberto Villarreal Colmenares

Dr. Alfredo Hernández Llamas

Dra. Laurence Stéphanie Mercier

Dr. Ángel Isidro Campa Córdova

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez

SUPLENTES

Dr. Germán Ponce Díaz

Dr. Luis Felipe Beltrán Morales

Resumen

Se llevó a cabo un análisis bioeconómico de la producción comercial intensiva de machos y hembras de langosta de agua dulce (*Cherax quadricarinatus*). Para ese propósito, se desarrollaron modelos bioeconómico estocásticos que fueron calibrados usando bases de datos proporcionadas por la granja Red Claw de México, S.A. de C.V. Se estableció, como hipótesis para la investigación, que si el crecimiento de los machos es significativamente mayor que el de las hembras, entonces, independientemente de que la supervivencia y el factor de conversión alimenticia que se obtengan con ellos también sean mejores, el sólo proceso de crecimiento debe producir un mejor desempeño bioeconómico que el de las hembras. Se encontró evidencia significativa de que los machos tienen mejor crecimiento y supervivencia que las hembras ($P < 0.05$), aunque el factor de conversión alimenticia no difirió entre ambos sexos. Con el modelo bioeconómico se compararon dos estrategias de cosecha y se encontró que, la consistente en realizar cosechas independientes de cada sexo, produce ingresos netos y relación beneficio/costo más altos que la basada en realizar cosechas simultáneas de ambos sexos. Con la mejor estrategia, y a los tiempos óptimos de cosecha, con los machos se tiene 95 % de confianza de obtener ingresos netos entre $508 900 y $723 200/ha, promediando $620 505/ha y una relación beneficio/costo entre 3.6 y 5.1, con una media de 4.36. Con las hembras se esperan ingresos netos entre $395 700 y $590 600/ha, con una media de $488 337/ha, y una relación beneficio/costo entre 3.04 y 4.14, con un promedio de 3.56. Se encontró evidencia de que la hipótesis establecida para el trabajo es correcta, ya que la media de los ingresos netos de los machos fue significativamente mayor que la de las hembras ($P < 0.05$), aun asumiendo para estas últimas una supervivencia igual a la de los machos. Un análisis de sensibilidad indicó que las variables y parámetros utilizados para calcular el porcentaje de machos y hembras incluidos en la categoría comercial entre 40 y 60 g, así como el porcentaje de la población comercial de machos y hembras, fueron los que más influyeron en la variabilidad estocástica de los ingresos netos. Por otro lado, los elementos usados para el cálculo del peso medio individual de la langosta tuvieron moderada o poca relevancia. Se concluye que los objetivos de este trabajo consistentes en realizar un análisis bioeconómico del cultivo intensivo de la langosta de agua dulce (C. *quadricarinatus*), evaluar el desempeño estadístico de modelos de crecimiento individual, proyectar indicadores económicos, identificar esquemas de manejo bioeconómico óptimo y evaluar el riesgo, se cumplieron satisfactoriamente.

Palabras claves: C. *quadricarinatus*, redclaw, langosta, bioeconomía.

Vo.Bo. Directores.

Dr. Humberto Villarreal Colmenares

Dr. Alfredo Hernández Llamas

Summary

A bioeconomic analysis of the intensive commercial production of redclaw males and females (Cherax *quadricarinatus*) was carried out. Stochastic bioeconomic models were developed and calibrated using databases provided by Red Claw de Mexico, S.P.R. de R.L. It was hypothesized that, if the growth of males is significantly faster than that of females, then, regardless of survival and feed conversion ratio of males being better than in females, the growth of males should alone produce a better bioeconomic performance than females. Significant evidence was found indicating that males had better growth and survival than females ($P < 0.05$), although the feed conversion ratio did not differ between the sexes. The bioeconomic model served to compare two harvesting strategies, where the one involving independent harvests of each sex produces higher net income and benefit/cost ratio than the strategy consisting in simultaneously harvesting both sexes. With the best strategy, at the optimum harvesting times, there is 95 % confidence in obtaining from males net incomes within $ 508 900-$ 723 200/ha, averaging $ 620 505/ha, and a benefit/cost ratio within 3.6-5.1, with an average of 4.36. The net income from females is expected to vary within $ 395 700 and $ 590 600/ha, with a mean of $ 488 337/ha, and the benefit/cost ratio from 3.04-4.14, with an average of 3.56. Even assuming for females a survival as high as the one obtained with males, the mean net income of males was significantly higher than that of females ($P < 0.05$), providing evidence that the hypothesis established for this research is correct. A sensitivity analysis indicated that the variables and parameters used to calculate the percentage of males and females included in the 40-60 g commercial grade, as well as the percentage of the commercial population of males and females, mostly influenced the stochastic variability of net income. On the other hand, the elements used for the calculation of the average individual weight of the redclaw had moderate or little relevance. It is concluded that the objectives of this research regarding a bioeconomic analysis of the intensive commercial production of the redclaw, evaluating the statistical performance of individual growth models, projecting economic indicators, identifying optimum bioeconomic management and risk assessment were satisfactorily accomplished.

Key words: C. *quadricarinatus*, redclaw, bioeconomics.

VoBo. Directores.

Dr. Humberto Villarreal Colmenares

Dr. Alfredo Hernández Llamas

Dedicatoria:

De manera muy especial agradezco a mi familia por todo el apoyo incondicional que me han brindado en cada etapa de mi vida: en primer lugar a mi abuela por la crianza que me dio y por la belleza de su trato, por su inmenso amor. A mi esposo, por su amor, comprensión y paciencia. A mis padres, a mis hermanos y a mi tía Silvia Amao, por ser mi guía y principal ejemplo. A Mariel, Mariela y Silvita por todo lo compartido, por su amistad y cariño sincero.

A mis amigas, Gabriela Lucero, Ana Parra, Dilia Meza y Mayra Gutiérrez por estar conmigo en todo momento.

Este trabajo lo dedico a mis hijas:

Lavinia Romina

y

Narda Linnet.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. por las facilidades proporcionadas para el desarrollo de la presente investigación.

A la Universidad Marista de Mérida Yucatán y al Centro de Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) de B.C.S. por toda la formación académica recibida.

A CONACYT por la beca otorgada No. 267291.

A los socios y a la gerencia general de Redclaw de México S.P.R. de R.L. por el acceso a la información y apoyo para desarrollar este trabajo.

A la Dra. Elisa Serviere Zaragoza, por su apoyo y motivación constante durante todo el trayecto de mi doctorado.

A mis directores Dr. Humberto Villarreal Colmenares y Dr. Alfredo Hernández Llamas por todo el conocimiento transmitido.

A mis asesores, Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez, Dra. Laurence Mercier y Dr. Ángel Isidro Campa Córdova por su tiempo, compromiso y valiosas recomendaciones.

Al Dr. José Naranjo Paramo, por su tiempo, recomendaciones y valioso apoyo.

A los técnicos de CIBNOR, Ing. Mayra Vargas Mendieta, tec. Jesús Aguilar y Lic. Patricia Hinojosa Baltazar. Especialmente a la Sra. Cerafina Arguelles Méndez por su asesoría, recomendaciones y motivación en cada una de las actividades del doctorado.

A mis compañeros Sarahi Von Borstel, Juan Carlos Padilla y Luis Arturo Burnes.

A mis compañeros de la Universidad Marista de Mérida Yucatán, a Karla Barrera, a la Sra. Tony Aranda y al Sr. Jorge Adalla, por el apoyo brindado durante mi estadía en la ciudad.

Contenido

Resumen.....iii
Summary.....iv
Dedicatoria.....v
Agradecimientos.....vi
Lista de figuras.....ix
Lista de tablas.....xii
Abreviaturas y símbolos.....xiii
1. INTRODUCCIÓN.....1
1.1. Langosta de agua dulce (*Cherax quadricarinatus*).....3
1.1.1. Biología y características principales de la especie.....3
1.1.2. Reproducción.....4
1.1.3. Nutrición.....5
1.1.4. Antecedentes de cultivo.....5
1.1.5. Producción y mercado.....6
1.1.6. Modelado bioeconómico en acuicultura.....7
2. ANTECEDENTES.....8
3. JUSTIFICACIÓN.....10
4. HIPÓTESIS.....11
5. OBJETIVOS.....11
5.1. Objetivo general.....11
5.2. Objetivos particulares.....11
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....12
6.1. Información zootécnica.....12
6.2 Análisis bioeconómico.....16
6.2.1 Análisis bioeconómico de pre-cría.....16
6.2.1.1. Sub-modelo biológico.....16
6.2.1.2. Sub-modelo del factor de conversión alimenticia.....17
6.2.1.3. Sub-modelo económico.....17
6.2.1.4. Análisis de regresión.....18
6.2.1.5. Elementos estocásticos.....19
6.2.1.6. Simulación Monte Carlo.....20
6.2.2. Análisis bioeconómico de engorda.....20
6.2.2.1. Sub-modelo biológico.....20
6.2.2.1.1. Análisis de regresión.....22
6.2.2.1.2. Elementos estocásticos.....23
6.2.2.1.3. Simulación Monte Carlo.....23
6.2.2.2. Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA).....24
6.2.2.3. Sub-modelo económico.....25
6.2.2.4. Análisis de estrategias de cosecha.....26
6.2.2.5. Prueba de hipótesis.....27
6.2.2.5. Simulación Monte Carlo y análisis se sensibilidad.....27

7. RESULTADOS 29
7.1. Etapa de pre-cría. 29
8. DISCUSIÓN 57
9. CONCLUSIONES 68
10. LITERATURA CITADA 70
11. ANEXOS 77

Lista de figuras

Figura 1. Producción (A) y valor (B) mundial de langosta de agua dulce (2000-2015). 2
Figura 2. Ajuste de la ecuación de crecimiento individual (Ec. 1) a los valores medios de peso individual de la langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de pre-cría. La curva se ajustó por separado a los datos de las tres réplicas 29
Figura 3. Ajuste de un polinomio de segundo grado a valores del factor de conversión alimenticia (FCA) de langosta de agua (*C. quadricarinatus*), dulce en la etapa de pre-cría. Las curvas se ajustaron por separado a los datos de tres réplicas. 30
Figura 4. Ajuste de un modelo lineal al precio del alimento comercial PIASA de 35% de proteína cruda, utilizado para el cultivo de langosta de agua dulce. 30
Figura 5. Distribución de probabilidad del peso individual promedio de la de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 90 días en la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%. 32
Figura 6. Distribución de probabilidad de los organismos de de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 90 días en la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%. 32
Figura 7. Distribución de probabilidad de la producción de biomasa de pre-adultos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 90 días de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%. 33
Figura 8. Distribución de probabilidad del factor de conversión alimenticia (FCA) después de 90 días de pre-cría *de langosta de agua dulce (C. quadricarinatus)*. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.....33
Figura 9. Distribución de probabilidad del costo de producción de un pre-adulto de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), a los 90 días del cultivo en la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%. 34
Figura 10. Distribución de probabilidad del costo de producción por kilogramo de pre-adulto de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus)*, a los 90 días de cultivo, durante la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%. 34
Figura 11. Ajuste de la ecuación de crecimiento individual (Ec. 9) a los valores medios de peso individual de machos (círculos) y hembras (triángulos) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*). La curva se ajustó por separado a los datos de las tres réplicas. 35
Figura 12. Ajuste de la ecuación logística (Ec. 10) al porcentaje de población comercial de machos (a) y hembras (b) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) en función del peso individual. Ajuste de un polinomio de segundo grado (Ec. 11) al porcentaje de la población que corresponde a la categoría de 40-60 g de machos (c) y hembras (d), en función del porcentaje de población comercial. Las curvas se ajustaron por separado a los datos de las tres réplicas. 36
Figura 13. Ajustes de un modelo lineal a los pesos individuales promedio de la categoría 40-60 g para machos (A) y hembras (C), y de la categoría 61-90 g para machos (B) y hembras (D) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus)*, en función del peso promedio del total de la población. 37

Figura 14. Producción de biomasa de machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) durante la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (a), 61-90 g (b), comercial (c) y población total (d). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %, y la curva con los triángulos corresponden a valores del coeficiente de variación. 40
Figura 15. Producción de biomasa de hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) durante la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (a), 61-90 g (b), comercial (c) y población total (d). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %, y la curva con los triángulos corresponde a valores del coeficiente de variación. 41
Figura 16. Distribuciones de probabilidad de la producción de biomasa de machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) después de 120 días de la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (a), 61-90 g (b), comercial (c) y población total (d). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %. 42
Figura 17. Distribuciones de probabilidad de la producción de biomasa de hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 120 días de la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (a), 61-90 g (b), comercial (c) y población total (d). Las líneas discontinuas indican los intervalos de confianza de 95 %. ..43
Figura 18. Ajuste de un polinomio de segundo grado a valores del factor de conversión alimenticia (FCA) de machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de engorda. 44
Figura 19. Ajuste de polinomio de quinto grado a valores del factor de conversión alimenticia de hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de engorda. 44
Figura 20. Resultados del análisis bioeconómico para la estrategia de cosecha simultánea de machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo de cosecha (120 días). A = Resultados; B = Ingreso neto; C = Relación beneficio-costo. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %. 47
Figura 21. Resultados del análisis bioeconómico para machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo de cosecha bajo la estrategia de cosechar en forma independiente los sexos. A = Resultados; B = Ingreso Neto; C = Relación B/C. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%. 48
Figura 22. Resultado del análisis bioeconómico para las hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo de cosecha bajo la estrategia de cosechar en forma independiente los sexos. A = Resultados; B = Ingreso Neto; C = Relación B/C. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %. 50
Figura 23. Ingresos netos (A) y relación beneficio/costo (B) para la estrategia de cosecha en forma independiente a machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), a sus respectivos tiempos óptimos de cosecha. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %. 51

Figura 24. Resultados de la simulación de los ingresos netos promedio para langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) con 4 estanques de machos (A), 4 estanques de hembras (B) y 8 estanques agregados (C). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %.....54

Lista de tablas

Tabla I. Modelos bioeconómicos para análisis de riesgo durante el período (2004 - 2015). Fuente: Llorente y Luna (2016).....9
Tabla II. Medias (± DE) de parámetros de calidad del agua en estanques utilizados en la fase de pre-cría de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).....13
Tabla III. Medias (± DE) de parámetros de la calidad del agua obtenidos en estanques utilizados para el cultivo intensivo en la fase de engorda de langosta de agua dulce (C. *quadricarinatus*).....14
Tabla IV. Costos de operación unitarios (en pesos mexicanos) de la fase de pre-cría para la producción intensiva de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).....18
Tabla V. Supervivencia, peso final, biomasa y factor de conversión alimenticia de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*). durante la etapa de pre-cría, en estanques con recubrimiento de PVC.....29
Tabla VI. Ecuaciones y distribuciones de los coeficientes de regresión y de errores residuales utilizados para la etapa de pre-cría de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*). 31
Tabla VII. Supervivencia, peso final, biomasa y factor de conversión alimenticia de machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), durante la etapa de engorda, en estanques con recubrimiento de PVC. Los valores promedio con letras diferentes entre sexos para cada parámetro son significativamente diferentes ($p< 0.05$). 35
Tabla VIII. Ecuaciones, distribuciones de parámetros y distribuciones de errores utilizadas para el sub-modelo biológico en la etapa de engorda de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).....38
Tabla IX. Ecuaciones, coeficientes de regresión y distribución de los errores utilizados para el sub-modelo de conversión del alimento de la etapa de engorda de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*). 45
Tabla X. Costos, valor de la biomasa e ingreso neto asociados a la estrategia de cosechas independientes de machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo. Los valores son en miles de pesos por hectárea. 52
Tabla XI. Resultados del análisis de sensibilidad de los ingresos netos a la variabilidad estocástica de variables y parámetros del modelo bioeconómico. Los valores absolutos de los cambios en los ingresos netos por cada desviación estándar (DE) de las variables o parámetros se presentan en orden decreciente de importancia. 56

Abreviaturas y símbolos

a, a_0 , a_1 , a_2 a_4, a_5	Coeficientes de regresión
b	Asíntota superior
b_t/c_t	Relación beneficio-costo
c/u	Cada uno
ca_t	Costos de alimentación
ce_t	Costos de energía
cea_t	Costo de energía por aireación
cep_t	Costo de energía por bombeo
cfer	Costos de fertilizante
C. q	*Cherax quadricarinatus*
cju	Costo del juvenil
cm	Centímetro
cmo	Costos de mano de obra
coc	Otros costos
cpa	Costo de producción de pre-adulto
cpp	Costo de preparación del estanque
c_t	Costos de operación
CV	Coeficiente de variación
d	Tasa de descuento
DE	Desviación estándar
e	Error residual
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FCA	Factor de conversión alimenticio
g	Gramos
h	Hora
ha	Hectárea
Hp	Horse Power
In_t	Ingresos netos
k	Coeficiente de crecimiento
kg	Kilogramo
L	Litro
Ln	Logaritmo natural
m	Metro
m^2	Metro al cuadrado

máx	Máximo
mg	Miligramo
mín	Mínimo
mp	Más probable
n_0	Población inicial
nf	Población final
nml	Normal
n_t	Número de sobrevivientes
P	Población
p_1	Población comercial
p_2	Población comercial categoría 40-60g
p_3	Población no comercial
p_4	Población comercial categoría 61-90g
pa	Precio del alimento
Ppm	Partes por millón
t	Tonelada
tf	Tiempo final de cosecha
vb_t	Valor de la biomasa
w_f	Peso final
w_i	Peso inicial
w_t	Peso medio individual
z	Tasa instantánea de mortalidad

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la acuicultura ha cobrado vital importancia debido a que representa una fuente importante de alimento, nutrición e ingresos para cientos de millones de personas en todo el mundo. Las técnicas usadas en acuicultura incrementan la producción sobre el nivel que se produciría naturalmente. Se considera que el desarrollo de sistemas de producción acuícola puede ser una solución, no sólo para generar y suministrar alimento, sino también para contribuir a la economía en temas como generación de empleo e ingresos, así como para darle uso a tierras marginales que no son aptas para la agricultura.

En la actualidad, la acuicultura contribuye con el 50 % al suministro del pescado que se consume a nivel mundial, con un valor total a puerta de granja durante 2014 de 165 800 millones de dólares, permitiendo oportunidades de empleos bien remunerados y contribuyendo a la erradicación del hambre (FAO, 2016). La producción mundial de crustáceos ha aumentado anualmente desde la década de 1980, tanto en cantidad producida como en cantidad de especies acuícolas (Saoud *et al.,* 2013). En 2014, la producción mundial por acuicultura ascendió a 73.8 millones de toneladas, con un valor de $164 500 millones de dólares, de los cuales $6.9 millones (9.35 %) correspondieron a la producción de crustáceos, equivalentes a $36 200 millones de dólares del total de la venta (22 %) (FAO, 2016).

Las especies de crustáceos que presentan mayor potencial para la acuicultura del género *Cherax* (Jones, 1990), son: marron (*C. tenuimanus*), yabbie (*C. destructor*) y redclaw (*C. quadricarinatus*). De entre ellas, *C. quadricarinatus* (langosta de agua dulce, en lo sucesivo) ha sido la que ha generado el mayor interés (Medley *et al*., 1994).

Según la FAO (2016) durante los años 2000 al 2015, la especie *C. tenuimanus* se produjo en Australia y Sudáfrica promediando, respectivamente, 69.27 y 3.44 t/año. En el mismo período, en Australia se registraron producciones de la *C. destructor* de 104.98

t/año, mientras que en Indonesia y durante el período 2008-2012, se registró una producción de 15.37 t/año.

De acuerdo con la misma FAO (2016), en el período 2000-2015 los países que reportaron producciones de *C. quadricarinatus* fueron: Argentina, Australia, Barbados, Ecuador, Guatemala, Malasia, Mauricio, México, Nueva Caledonia, Samoa, Suazilandia y Uruguay. Las principales producciones las registraron Australia, Ecuador y México con un promedio anual de 88.11, 75, y 29.58 t/año, respectivamente (Fig.1).

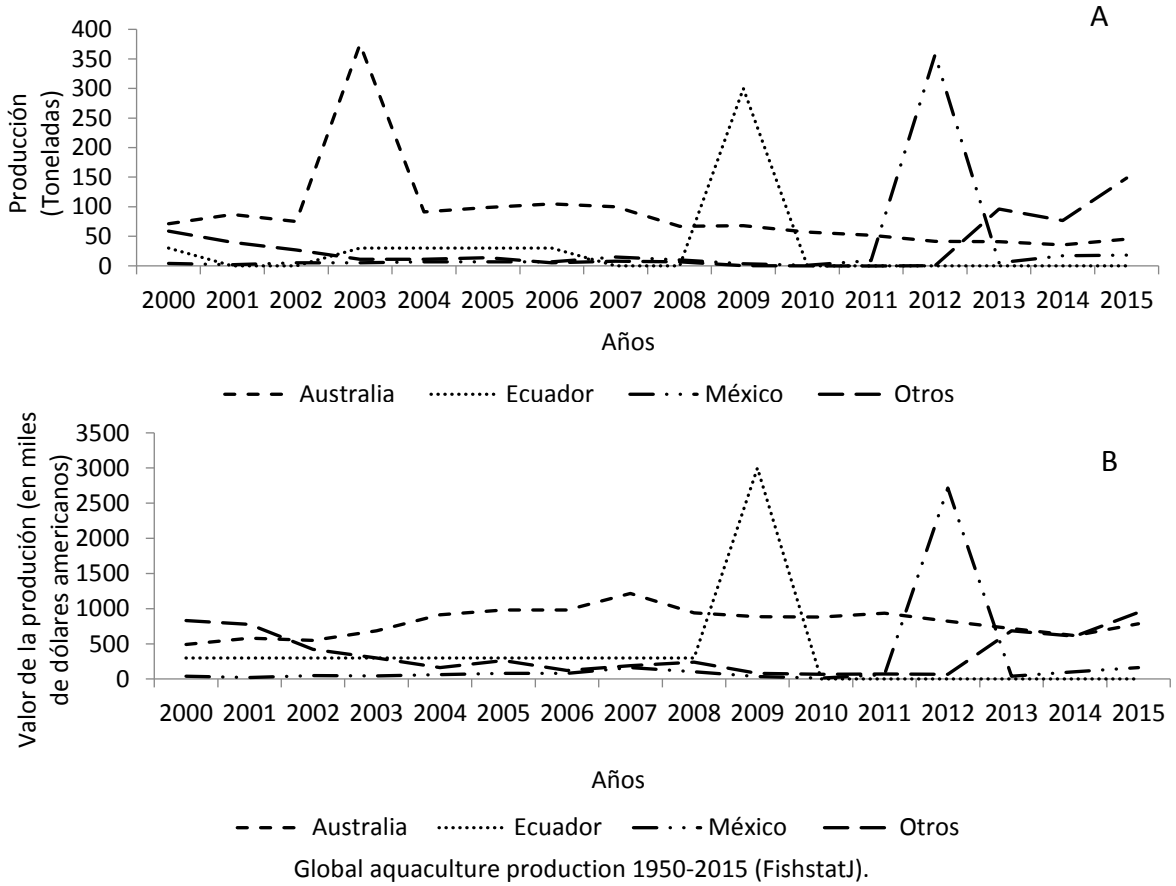

Figura 1. Producción mundial (A) y valor (B) de langosta de agua dulce durante el período 2000-2015.

1.1. Langosta de agua dulce (*Cherax quadricarinatus*)

1.1.1. Biología y características principales de la especie.

La langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), es una especie tropical nativa de los ríos del noroeste de Queensland y del Territorio del Norte en Australia (Medley *et al.,* 1994).

Su ubicación taxonómica, de acuerdo a Hobbs (1988), es:

REINO	Animal
PHYLUM	Arthrópoda
SUBPHYLUM	Crustácea
CLASE	Malascotraca
SUPERORDEN	Eucárida
ORDEN	Decápoda
INFRAORDEN	Astacidea
SUPERFAMILIA	Parastacoidea
FAMILIA	Parastacidae
GENERO	*Cherax*
ESPECIE	*quadricarinatus*

La mayor diversidad de la familia Parastacidae se encuentra en Australia, con 9 de los 14 géneros identificados (Crandall *et al*., 1999; Huner, 1994; Williams, 1980). Los Parastacidos australianos se encuentran representados por tres géneros; *Cherax* (Erichson, 1846), *Engaeus* (Erichson, 1846) y *Euastacus* (Clark, 1936; Austin, 1995). Dentro del género *Cherax*, 43 especies han sido descritas (Crandall *et al*., 1999).

Saoud *et al.* (2013), describe los principales atributos que hacen que la especie sea adecuada para la producción acuícola:

1) Crece rápidamente, alcanzando un tamaño comercial (40-200 g) en 6-9 meses en condiciones óptimas.

2) Presenta un comportamiento gregario, no agresivo y no aglutinante; también es tolerante a densidades de población relativamente altas (ejemplo, 15 Juv/m^2).
3) Es fisiológicamente robusta y tolerante a bajas concentraciones de oxígeno (> 1 mg/l), así como a una amplia variedad de condiciones de calidad del agua, incluyendo dureza y alcalinidad (20 a 300 ppm) y pH (6.5 a 9).
4) Es una especie gonocórica que exhibe patrones de crecimiento sexualmente dimórficos. Los machos y hembras alcanzan la madurez sexual después de 7 a 9 meses en condiciones óptimas de cultivo. Son reproductores múltiples con una fecundidad moderada que varía de 100 a 1000 huevos /desove, dependiendo del tamaño individual.

1.1.2. Reproducción.

El ciclo de vida de la langosta de agua dulce es simple, lo que facilita su cultivo ya que presenta estadios larvales libres. Todo el desarrollo embrionario ocurre dentro del huevo, (García-Guerrero *et al*., 2003). Para la inducción al desove de la langosta de agua dulce, no se requiere de estrategias complejas, como una dieta especial o el corte del pedúnculo ocular, lo cual la hace muy atractiva para el cultivo comercial (Rodríguez *et al.,* 2006). El macho y la hembra son fácilmente distinguibles por sus aparatos genitales y características sexuales secundarias (por ejemplo, el macho presenta una ampolla en las quelas). La reproducción puede presentarse a lo largo del año, si las condiciones del medio ambiente son adecuadas. Esencialmente, esto significa tener temperaturas del agua superiores a 20°C. En la mayoría de las regiones de Australia donde se cultiva la especie, ocurren desoves de 2 a 3 veces por año. En países con climas tropicales, los desoves pueden ser más numerosos (3-5/año). (Villarreal-Colmenares y Naranjo-Páramo, 2008).

1.1.3. Nutrición.

La langosta de agua dulce es un organismo omnívoro, muy eficiente para el aprovechamiento de alimento. Cuando se utiliza una dieta comercial de calidad, (con 32% proteína cruda y 8% de lípidos), cerca del 70 % de la energía ingerida puede usarse para crecimiento (Cortes *et al*., 2002, 2004). Esta habilidad le da a la especie una ventaja bioenergética para el cultivo sobre otras especies del género *Cherax* (Carreño *et al*., 2014) En los estanques de cultivo, los alimentos naturales para la langosta representan hasta el 70 % de los requerimientos nutricionales de la langosta, e incluyen microalgas, zooplancton, bacterias, oligoquetos, insectos y plantas acuáticas y terrestres. (Villarreal-Colmenares y Naranjo-Páramo, 2008).

1.1.4. Antecedentes de cultivo

Aunque el cultivo de algunas especies de *Cherax* ya se realizaba rústicamente en Australia a finales de los setenta, el inicio del cultivo comercial de *C. quadricarinatus* en estanques data de 1985 (Ponce-Palafox *et al*., 1999).

En México, la primera iniciativa de introducir esta especie para cultivo comercial ocurrió en 1986; sin embargo, fue hasta 1990 que la Dirección de Acuacultura de SEPESCA decidió importar un lote de reproductores de langosta de agua dulce al país. Para 1995, la granja “Acuacultivos Santo Domingo”, productora de tilapia en Tamaulipas, junto con el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), iniciaron la evaluación del potencial de cultivo de la especie. Los primeros resultados obtenidos fueron satisfactorios, por lo cual se decidió continuar con el cultivo (Villarreal, 1999). En México, se tienen reportes de cultivo comercial en los estados de Tamaulipas, Colima, Jalisco, Morelos, Distrito Federal y Yucatán. (Ponce-Palafox *et al*., 1999).

En Ecuador, la especie se introdujo en 1993, cuando se iniciaron las primeras experiencias sobre su cultivo en Sudamérica.

1.1.4.1. Producción y mercado

La producción y las ventas de langosta de agua dulce se concentran principalmente en el noreste de Australia. Aunque la producción se está desarrollando rápidamente en Asia sudoriental y en el Centro y Sur de América, sigue siendo dispersa y a pequeña escala (Campaña-Torres *et al.,* 2008; García-Guerrero *et al*., 2003; Jones y Ruscoe, 1996a, 2001; Medley *et al.,* 1994; Thompson *et al.,* 2003a, 2003b, 2005, 2006; Villarreal y Peláez, 2000). De acuerdo con Jones y Ruscoe (2001), la principal dificultad que enfrenta la industria de langosta de agua dulce, es la falta de volumen de producción y, por lo tanto, una incapacidad para explotar oportunidades lucrativas de mercado de exportación.

En el mercado internacional, esta especie se compara favorablemente con las langostas marinas en términos de sabor, proporciones cola/cuerpo y carne obtenida contra peso total ofreciendo ventajas comparativas. En cuanto al peso de la especie, se puede calcular que entre 35 y 50 % del organismo es carne, proporción que la pone en ventaja contra otras especies, como el camarón y el langostino (Masser y Rouse, 1990).

Se considera que la talla comercial de la langosta empieza a partir de los 40 gramos, siendo su principal clasificación las tallas entre 40 y 60 g (estándar) y entre 61 y 90 g (jumbo) y el principal mercado es para el consumo humano directo. Durante mucho tiempo se ha considerado a Estados Unidos como uno de los principales mercados para la especie, donde los crustáceos se venden, para el consumo, principalmente en tres formas: 1) vivos enteros, 2) hervidos y 3) carne de colas procesadas (de acuerdo a los resultados reportados por Kennedy y Lee (2008), la carne de la cola, a su vez, se puede vender fresca (refrigerada) o congelada). Sin embargo, hoy en día, este mercado se ve superado por China (principal mercado pesquero mundial); destacando el hecho de que el consumo per cápita de

productos del mar de China ha pasado de 10 kilogramos en 1990 a 30 kilogramos en 2009, siendo el principal consumidor de productos del mar a nivel mundial (Rabobank, 2012).

En cuanto a las tallas menores (juveniles) existen dos mercados específicos para la producción: 1) para la engorda en estanques y 2) el comercio en acuarios ornamentales.

1.1.5. Modelado bioeconómico en acuicultura

La investigación bioeconómica en acuicultura tiene su origen en el desarrollo del cultivo de especies a escala industrial. Durante los años ochenta, los aspectos técnicos y biológicos fueron el primer desafío para la acuicultura comercial, en un contexto de mercado definido por una demanda importante de especies de gran valor. Durante los años noventa, la mejora y normalización de los procesos de producción condujeron a un incremento de la oferta de los productos acuícolas y, consiguientemente, a la reducción de sus precios de mercado. En ese nuevo contexto, los aspectos económicos y administrativos comenzaron a resultar fundamentales para el desarrollo sostenible de la acuicultura. Al mismo tiempo, no obstante, estos enfoques económicos y administrativos no podían pasar por alto la importancia de los aspectos técnicos y biológicos inherentes a esta actividad. En ese contexto, el análisis bioeconómico en la acuicultura surge como respuesta a la necesidad de integrar factores económicos, biológicos, técnicos y ambientales para mejorar la eficiencia en las empresas (Allen *et al.,* 1984). El modelado bioeconómico es un enfoque metodológico útil para estudiar las complejas interacciones entre los diferentes factores que afectan la producción acuícola *(*Pomeroy *et al*., 2008). Desde el punto de vista del manejo de los recursos biológicos, el modelado bioeconómico se refiere al uso de técnicas matemáticas para modelar el desempeño de sistemas de producción biológica sujetos a restricciones económicas, biológicas y técnicas (Allen *et al*., 1984). Básicamente, los modelos bioeconómicos consisten en un submodelo biológico que está interrelacionado con un submodelo económico, que a su vez cuantifica el proceso para considerar las implicaciones económicas de cualquier cambio en los parámetros de producción y mercados (Llorente y Luna, 2016).

Para la presente investigación, se desarrolló un modelo bioeconómico estocástico sobre el cultivo intensivo comercial de la langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) con el propósito de comparar el desempeño productivo y económico de los machos y hembras de la especie cuando se cultivan por separado. De igual manera se evaluaron estrategias alternativas de cosecha para identificar la óptima. Se determinaron los principales factores de riesgo que afectan el desempeño económico del cultivo.

2. ANTECEDENTES

Existen pocos antecedentes de estudios que aborden aspectos económicos del cultivo de la langosta de agua dulce. Medley *et al.* (1994), por ejemplo, evaluaron la factibilidad y el riesgo de cultivarla en el sur de los Estados Unidos de América. Jones (1996) ha destacado los altos valores de indicadores económicos de su cultivo, tales como la tasa interna de rendimiento, señalando la conveniencia de invertir en el mismo. Robertson (2008) ha informado sobre valores de este indicador tan altos como 24.6 % para el cultivo.

En otras investigaciones se han empleado datos experimentales con fines de evaluación económica. Jones y Ruscoe (2000) emplearon un indicador de ganancia económica para evaluar diferentes estrategias de densidad de cultivo y de tallas de siembra, cuando la langosta se cultiva en cercos de malla dentro de estanques de tierra. En otro estudio, se determinó, desde el punto de vista económico, la talla de siembra óptima cuando la especie se cultiva en estanques de tierra (Webster *et al.,* 2008). En un estudio similar, se evaluó la factibilidad de cultivar la especie en climas fríos y templados (Webster *et al.,* 2008). El único trabajo que ha utilizado un enfoque bioeconómico para analizar el cultivo de la langosta es el realizado por Ponce-Marban *et al.* (2006), aunque la especie se cultivó en condiciones experimentales en conjunto con tilapia.

De acuerdo con la revisión sobre estudios bioeconómicos en acuicultura realizada por Llorente y Luna (2016), entre 2004 y 2015 se generaron al menos 57 artículos científicos sobre tres temas principales: manejo acuícola, factibilidad económica, y evaluación y

manejo del riesgo. Los mismos autores señalan que este último tema, a pesar de ser uno de los más relevantes desde el punto de vista empresarial, es el menos desarrollado y que, como línea de investigación, se ha efectuado casi por completo en México. Por otra parte, también destacan que dichos estudios ponen en evidencia la importancia del manejo de la incertidumbre en el manejo acuícola, especialmente tratándose de una actividad dedicada a la crianza animal, pudiendo contribuir a reducir la falta de conocimiento sobre los procesos de cultivo y apoyar también a las compañías financieras y de seguros en su toma de decisiones. En la tabla I se presentan los trabajos relativos al manejo de riesgo que sirven como antecedentes generales al realizado en esta investigación.

Tabla I. Modelos bioeconómicos para análisis de riesgo durante el período 2004 - 2015. Fuente: Llorente y Luna (2016).

Autor (año)	Especie	Ubicación	Principal aplicación
Seijo (2004)	Camarón	-	Riesgo de exceder los puntos de referencia bioeconómicos.
Peterson y Schilizzi (2010)	Carpas	Vietnam	Evaluación del riesgo de ingresos esperados.
Hernández-Llamas y Zarain-Herzberg (2011)	Camarón *(Litopenaeus vannamei*)	México	Análisis de riesgos de posibles impactos de huracanes.
Hernández-Llamas *et al*. (2013)	Camarón (*Litopenaeus vannamei*)	México	Evaluación de riesgos económicos.
Sanchez-Zazueta *et al.* (2013a)	Camarón	México	Análisis de gestión crediticia.
Villanueva *et al.* (2013)	Camarón (*Litopenaeus vannamei*)	México	Análisis de riesgos de oscilaciones térmicas en las diferentes estaciones climáticas anuales.
Gonzalez-Romero *et al.* (2014)	Camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*)	México	Gestión de riesgos económicos del tamaño del estanque.
Hernandez-Llamas (2015)	Camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*)	México	Análisis de riesgos de posibles impactos de huracanes.

Por otra parte, uno de los aspectos zootécnicos más conocidos del cultivo de la langosta de agua dulce es el hecho de que los machos tiene mayor tasa de crecimiento que

las hembras (Rodgers *et al.,* 2006; Thompson *et al.,* 2004), aunque es destacable que tal situación sólo se conoce para cultivos en que ambos sexos se cultivan mezclados en las mismas unidades de producción. No existen antecedentes de estudios que demuestren que el mismo fenómeno se presenta cuando la competencia potencial entre ambos sexos se elimina por criarlos en unidades separadas. Asimismo, es destacable que tampoco existen antecedentes que evalúen, en forma comparativa, el desempeño productivo y económico de ambos sexos cuando se les cultiva por separado.

3. JUSTIFICACIÓN

Considerando lo mencionado, las razones para llevar a cabo el presente trabajo de investigación se fundamentan, en primer término, en el hecho de que no se ha determinado si el desempeño productivo de los machos es superior al de las hembras cuando se les maneja como cultivos por separado; y en segundo término, en que resulta necesario investigar, en caso de que exista un desempeño superior de los machos, si ello también se traduce en un desempeño significativamente superior en términos económicos y, en qué medida dicha superioridad es atribuible tan sólo a una mayor tasa de crecimiento de los machos.

La razón de utilizar en este trabajo un enfoque bioeconómico estocástico se basa en las ventajas ya señaladas acerca del empleo de modelos matemáticos para el manejo acuícola. En particular, con el desarrollo de un modelo bioeconómico se pretende, además de dilucidar las diferencias en el desempeño productivo y económico de ambos sexos, evaluar estrategias de cosecha alternativas, identificar la mejor de ellas, cuantificar el impacto económico de factores de riesgo y establecer recomendaciones para el manejo del cultivo. No existe en la literatura ningún antecedente de un trabajo como el que se lleva a cabo en la presente investigación.

4. HIPÓTESIS

Si el crecimiento de los machos es significativamente mayor que el de las hembras, entonces, independientemente de que la supervivencia y el factor de conversión alimenticia que se obtengan con ellos también sean mejores, el sólo proceso de crecimiento debe producir un mejor desempeño bioeconómico que el de las hembras para el cultivo intensivo con bajo recambio de agua.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Realizar un análisis bioeconómico del cultivo monosexual intensivo de langosta de agua dulce *(*C. *quadricarinatus).*

5.2. Objetivos particulares

1. Determinar el modelo más adecuado para representar el crecimiento de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus).*
2. Proyectar indicadores económicos para validar la rentabilidad económica de la tecnología del sistema de cultivo monosexual desarrollado de langosta de agua dulce *(*C. *quadricarinatus).*
3. *Identificar el* tiempo óptimo de cosecha del cultivo monosexual intensivo de langosta de agua dulce *(C. quadricarinatus).*
4. Evaluar el riesgo económico implicado en las operaciones del cultivo monosexual intensivo de langosta de agua dulce *(C. quadricarinatus).*

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Información zootécnica.

Para llevar a cabo la presente investigación se analizaron los datos proporcionados por la empresa Red Claw de México, S.P.R. de R.L., correspondientes al cultivo intensivo realizado en el año 2006 en la localidad El Carrizal, B.C.S. Durante dicho año se desarrolló una fase de pre-cría de 90 días, después de la cual se obtuvieron organismos pre-adultos con talla adecuada para la separación de machos y hembras y la continuación a la fase de engorda de 120 días, cultivando ambos sexos por separado. La información analizada corresponde a tres estanques (réplicas, en lo sucesivo) de la fase de pre-cría, y tres estanques (réplicas, en lo sucesivo) de la fase de engorda para cada sexo. Las características del cultivo fueron las siguientes para ambas fases:

a) Se usaron estanques de tierra de 2500 m^2 (25 x 100 m), revestidos con membranas de PVC de 0.5 mm de grosor. Como medida de protección para los organismos, en cada estanque se colocaron, de manera homogénea, escondrijos consistentes en 4200 bloques de cemento con 4 agujeros de 6 cm de diámetro, así como 300 moños de 8 láminas de malla de nylon de 0.8 X 0.8 m c/u.

b) Se utilizó agua de pozo, realizando un recambio diario de agua de 2 a 3 %. Para promover la productividad primaria, antes de la siembra el agua se fertilizó con Nutrilake ® (una fuente inorgánica de nitrógeno) y superfosfato de sodio triple Na_2 (PO_3) con una relación de 3:1 equivalente a 6 y 2 kg/ha respectivamente (Villarreal y Peláez, 1999). Asimismo, se realizaron fertilizaciones subsecuentes, cuando el disco de Secchi mostró una transparencia de 45 cm o más. La temperatura del agua y la concentración de oxígeno disuelto se midieron diariamente a las 7:30 h con un oxímetro (YSI #55, YSI, Yellow Springs, OH, USA). El pH se midió diariamente a las 16:00 h con un potenciómetro (Beckman 34 pH meter, Beckman Coulter, Brea, CA,

USA). La dureza, alcalinidad, hierro, cobre y fosfatos en el agua de pozo, se midieron cada 2 semanas con un espectrofotómetro Hach DR/2000 (Hach, Loveland, CO, USA); al igual que el amoniaco, nitritos y nitratos. En general, de acuerdo con Villarreal y Peláez (1999), la calidad del agua fue aceptable para el cultivo de langosta de agua dulce (Tablas II y III).

Tabla II. Medias (± DE) de parámetros de calidad del agua en estanques utilizados en la fase de pre-cría de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).

Parámetro	Estanque 1	Estanque 2	Estanque 3	Aceptable*
Temperatura (°C)	25.71 1.64	25.60 ± 1.45	25.69 ± 1.51	23-31
Oxígeno (mg/L)	8.16 ± 0.84	9.99 ± 0.76	8.85 ± 0.78	> 5
pH	8.19 ± 0.48	8.57 ± 0.14	7.81 ± 0.12	6.5-9
Transparencia (cm)	38.34 ± 22.71	40.59 ± 8.07	35.34 ± 12.48	25-40
Dureza total (mg/L)	320.4 ± 11	325.23 ± 55	322.10 ± 55	> 100
Alcalinidad (mg/L)	169.5 ± 6.44	171.1 ± 10.09	170.2 ± 12.43	> 50
Amoníaco (mg/L)	0.10 ± 0.05	0.07 ± 0.40	0.09 ± 0.53	< 1
Nitrito (mg/L)	0.26 ± 0.02	0.14 ± 0.16	0.17 ± 0.25	< 1
Nitrato (mg/L)	2.38 ± 1.26	2.14 ± 0.63	2.92 ± 1.50	< 10

* Tomado de Villarreal y Peláez (1999).

Tabla III. Medias (± DE) de parámetros de la calidad del agua obtenidos en estanques utilizados para el cultivo intensivo en la fase de engorda de langosta de agua dulce (C. *quadricarinatus*).

Parámetros	Machos			Hembras			Aceptable*
	Estanque 1	Estanque 2	Estanque 3	Estanque 1	Estanque 2	Estanque 3	
Temperatura (°C)	26.01 ± 1.57	25.91 ± 1.59	26.86 ± 1.45	25.51 ± 1.37	26.41 ± 1.29	26.56 ± 1.25	23–31
Oxígeno (mg/L)	9.01± 0.81	9.23 ± 0.81	8.95 ± 0.78	8.31± 0.61	9.13 ± 0.51	8.75 ± 0.68	>5
pH	7.53 ± 0.14	8.67 ± 0.13	8.96 ± 0.13	7.93 ± 0.10	8.97 ± 0.23	8.16 ± 0.23	6.5–9
Transparencia (cm)	40.93 ± 19.0	29.89 ± 20.07	38.55 ± 15.46	41.23 ± 11	29.19 ± 10.07	36.55 ± 10.16	25–40
Dureza (mg/L)	354.10 ± 39.0	360.21 ± 36	329.31 ± 38	351.20 ± 31	345.31 ± 25	356.11 ± 46	>100
Alcalinidad (mg/L)	185.9 ± 1.79	190.1 ± 6.34	180.0 ± 4.09	191.2 ± 1.05	187.1 ± 5.14	194.0 ± 5.08	>50
Amoniaco (mg/L)	0.17 ± 0.54	0.21 ± 0.29	0.19 ± 0.04	0.16 ± 0.44	0.27 ± 0.19	0.29 ± 0.03	<1
Nitritos (mg/L)	0.31 ± 0.03	0.29 ± 1.23	0.23 ± 0.01	0.21 ± 0.02	0.27 ± 0.23	0.33 ± 0.02	<1
Nitratos (mg/L)	3.09 ± 0.70	4.05 ± 0.27	3.13 ± 1.09	4.05 ± 0.60	5.04 ± 0.17	3.30 ± 1.01	<10

*Villarreal y Peláez (1999).

c) Para suministrar la aireación y mantener la circulación constante en los estanques, se utilizó un aireador de 2 hp (Aire-O2; Aeration Industries International Inc., Chaska, MN, USA) por estanque.

d) La alimentación se llevó a cabo a las 6:00 y 17:00 h diariamente utilizando un alimento comercial con 35 % de proteína cruda (PIASA®; Productora Industrial Acuasistemas, La Paz, BCS, México), elaborado específicamente para langosta de agua dulce. La alimentación fue realizada manualmente de acuerdo a la tabla de alimentación de Villarreal y Peláez (1999). Quincenalmente se realizaron biometrías en todos los estanques para registrar el peso individual de una muestra de 60 organismos en cada ocasión, utilizando una balanza de precisión digital (0.01 g, Ohaus, Parsippany, NJ, USA).

e) Al final de cada fase del cultivo se determinó la supervivencia.

Para la fase de pre-cría se utilizaron organismos con un peso inicial de 2-3 g, provenientes de la granja comercial. Los juveniles se sembraron a una densidad de 15 organismos/m^2.

Para la fase de engorda se utilizaron pre-adultos de un peso de aproximadamente 21.4 g, los cuales fueron obtenidos de la fase de pre-cría, sembrándose a razón de 6 organismos/m^2. Se llevó a cabo un análisis de varianza de una vía al final de la fase, con el fin de detectar posibles diferencias entre machos y hembras para supervivencia, peso promedio, biomasa producida y el factor de conversión alimenticia. Dicho análisis se efectuó con Statistica 6.0, con un nivel de significación de $P < 0.05$.

6.2 Análisis bioeconómico

Se desarrollaron modelos bioeconómicos para las fases de pre-cría y engorda analizando, en esta última, machos y hembras por separado. Ambos modelos se integran por tres sub-modelos: biológico, del factor de conversión alimenticia y económico.

6.2.1 Análisis bioeconómico de pre-cría.

6.2.1.1 Sub-modelo biológico

Se utilizó una ecuación lineal para predecir el crecimiento de la langosta en función del tiempo (*t*), mediante:

$$w_t = a\,t + b + e \qquad (1)$$

donde w_t es el peso medio individual, *a* y *b* son coeficientes de regresión y *e* es el error residual. Los coeficientes de regresión se estimaron para cada réplica.

El número de juveniles sobrevivientes se calculó como una función del tiempo, usando la ecuación exponencial:

$$n_t = n_0\, e^{-z} \qquad (2)$$

donde n_t es el número de sobrevivientes, n_0 es la población inicial y *z* es la tasa instantánea de mortalidad, la cual se estimó como:

$$z = -Ln\,(nf / n_0) / tf \qquad (3)$$

donde n_f es la población final que sobrevive en el momento de la cosecha (t_f). La tasa de mortalidad fue estimada para cada réplica.

6.2.1.2 Sub-modelo del factor de conversión alimenticia

El factor de conversión alimenticia (*FCA*) es la razón entre el peso del alimento balanceado proporcionado y el peso del producto obtenido y, para la fase de pre-cría, se predijo usando un polinomio de segundo grado:

$$FCA = a_0 + a_1 t - a_2 t^2 + e \quad (4)$$

donde a_0, a_1, a_2 son coeficientes de regresión estimados para las tres réplicas, *t* es tiempo y *e* es el error residual.

6.2.1.3 Sub-modelo económico

El costo de producción de pre-adulto (*cpa*) se calculó como:

$$cpa = cpp + cju + cfer + cmo + coc + ca_t + ce_t \quad (5)$$

donde los costos son: *cpp,* preparación por estanque*; cju*, juvenil; *cfer,* fertilizante; *cmo*, mano de obra; *coc*, otros costos; ca_t, alimentación; ce_t, energía. Todos los cálculos se estimaron para una hectárea de cultivo (Tabla IV).

Tabla IV. Costos de operación unitarios (en pesos mexicanos) de la fase de pre-cría para la producción intensiva de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).

Costos de operación	Valor (en pesos mexicanos)
Preparación de estanque ($/ha)	3,024.00
Juveniles ($/individuo)	0.56
Fertilizante ($/kg)	18.00
Mano de obra ($/ha/día)	158.33
Energía ($/kW/h)	0.58
Alimento ($/kg)	18.09
Otros costos ($/ha/día)	140.61

Para el cálculo del precio del alimento, se ajustó una recta a los precios del alimento proporcionados por el fabricante del mismo, correspondientes a los años de 2012 a 2017 de acuerdo a:

$$pa = a_0 + a_1 t + e \quad (6)$$

donde *pa* es el precio del alimento, a_0, a_1, son coeficientes de regresión, *t* es el tiempo y *e* es el error residual.

6.2.1.4 Análisis de regresión

Para estimar el valor de los coeficientes de regresión, calcular los valores de los errores residuales y realizar las pruebas de normalidad de estos últimos en las ecuaciones (1), (4) y (6), se usaron los procedimientos de regresión lineal simple y múltiple y la prueba de Kolmogorov-Smirnov disponibles en Statistica 6.0 (Dell Software, Round Rock, Texas.) y Stata 13.0 (StataCorp, College Station, TX). El orden adecuado de los polinomios se determinó de acuerdo a lo señalado por Zar (2010). El nivel de significación se estableció en $P < 0.05$.

6.2.1.5 Elementos estocásticos

Se usaron dos tipos de variabilidad estocástica. La primera de ellas se incorporó a través de los parámetros *a* y *b* en la ecuación (1) y *z* en la ecuación (2), mientras que para la segunda se hizo a través de las variables dependientes w_t, *FCA,* y *pa* de las ecuaciones (1), (4) y (6).

La variabilidad de cada uno de los parámetros se simuló usando una distribución Pert (Vose, 2001), cuyos valores mínimos (mín) y máximos (máx) se estimaron como los correspondientes a los mínimos y máximos de *a*, *b* y *z*, mientras que el valor más probable de la distribución (mp) se calculó como:

$$mp = (6\ media - mín - máx) / 4 \qquad (7)$$

donde las medias de *a*, *b* y *z* se calcularon como los promedios de las tres estimaciones de cada parámetro provenientes de las tres réplicas. La ecuación (7) se estableció a partir de la ecuación para calcular la media de la distribución Pert (Vose, 2001):

$$media = (mín + 4\ mp + máx) / 6 \qquad (8)$$

Para incorporar la variabilidad aleatoria en las variables dependientes se usó el método de "envoltura" (Vose, 2001). Para ese fin, se ajustaron distribuciones normales a los valores de los errores residuales de las ecuaciones (1), (4) y (6).

6.2.1.6 Simulación Monte Carlo

Se realizó una simulación Monte Carlo con el fin de analizar la variabilidad estocástica de las tallas finales de los pre-adultos, su número de sobrevivientes, la biomasa producida y los costos de producción por individuo y por kilogramo de biomasa producida. Para tal propósito, se utilizó @Risk 6.0 (Palisade, Ithaca, N.Y) y las distribuciones Pert y normales descritas anteriormente. Para la simulación, se consideraron las correlaciones entre las estimaciones de los parámetros de las ecuaciones (1), (4) y (6), así como las de los valores de la media y la desviación estándar de las distribuciones normales de los residuales.

6.2.2 Análisis bioeconómico de engorda

6.2.2.1 Sub-modelo biológico

La biomasa de langosta producida en esta fase se calculó en función del tiempo, como el producto del peso individual promedio y la población sobreviviente. Para calcular el peso individual se usó la ecuación propuesta por Ruiz-Velasco *et al.* (2010), a saber:

$$w_t = w_i + (w_f - w_i)\,[(1 - k^t) / (1 - k^h)]^{\,3} + e \qquad (9)$$

donde, w_t es el peso promedio individual predicho después de t unidades de tiempo (por ejemplo 45, si w_t se predice para 45 días de cultivo), w_i es el peso inicial, w_f es el peso final, k es un coeficiente de crecimiento, h es el número de unidades de tiempo transcurrido al momento de la cosecha y e es el error residual. Los parámetros de la ecuación (9) se estimaron usando procedimientos de regresión no-lineal disponibles en Statistica 6.0 y GraphPad Prism 5.0 (GraphPad Software, Inc.). La ecuación se ajustó a los datos de crecimiento de cada réplica para machos y hembras. La supervivencia se calculó, para cada réplica de ambos sexos, usando las ecuaciones (2) y (3).

Mediante procedimientos de regresión no-lineal y pruebas de invariancia (Ratkowsky, 1983) disponibles en GraphPad Prism 5.0 se detectó una diferencia significativa en los valores de los parámetros de crecimiento de la ecuación (9) entre machos y hembras ($p = 0.0001$). Por otra parte, una prueba de t-Student realizada con Statistica 6.0, reveló que había una diferencia significativa en las estimaciones de la tasa de mortalidad de la ecuación (10) entre machos y hembras ($p = 0.026$). Teniendo en cuenta estos resultados, el sub-modelo biológico se calibró por separado para cada sexo.

Como parte del sub-modelo biológico, se desarrolló un modelo para el cálculo de la biomasa comercial de la langosta, y se ajustó por separado para machos y hembras. Las muestras de peso individual de las tres réplicas de cada sexo se utilizaron para estimar, conforme avanzó el tiempo de cultivo, los porcentajes de las poblaciones comerciales que pertenecen a dos categorías de pesos: 40-60 g y 61-90 g, mismas que corresponden a diferentes precios de venta de la langosta.

El porcentaje de la población total correspondiente a la población comercial (p_1), definida como la fracción de la población total que se vende, se calculó sumando los porcentajes de ambas categorías y se predijo, en función del peso individual calculado con la ecuación (9), utilizando la ecuación logística (Ratkowsky, 1990):

$$p_1 = b / (1 + e^{-c(wt-d)}) + e \qquad (10)$$

donde b es una asíntota superior (el porcentaje máximo de la población comercial), c describe la velocidad de la transición de la curva sigmoidea de la asíntota inferior a la superior, d es el peso individual medio al que la mitad de la población comercial máxima ya se encuentra reclutada y e es el error residual. Se utilizó el procedimiento de regresión no lineal en Statistica 6.0 para ajustar la curva a los datos correspondientes a cada réplica, fijando $b = 100$ para evitar que el cálculo de p_1 esté por arriba de 100%.

El porcentaje de población comercial correspondiente a la categoría de 40 a 60 g (p_2) se calculó, como una función de p_1, utilizando un polinomio de segundo grado:

$$p_2 = a_0 + a_1 p_1 + a_2 p_1^{\,2} + e \qquad (11)$$

donde a_0, a_1 y a_2 son coeficientes de regresión y e es el error residual. Para estimar los coeficientes de regresión y determinar el grado adecuado del polinomio, se usaron los procedimientos de regresión lineal múltiple en Statistica 6.0 y Stata 13.0 y lo establecido por Zar (2010).

El porcentaje de la población no comercial (p_3) se calculó como la diferencia:

$$p_3 = 100 - p_1 \quad (12)$$

y el porcentaje correspondiente a la categoría 61-90 g (p_4) como:

$$p_4 = 100 - p_3 - p_1 (p_2/100) \quad (13)$$

Los pesos medios individuales de los organismos de la categoría 40-60 g ($w_{40\text{-}60}$) y 61-90 g ($w_{61\text{-}90}$), se calcularon en función del peso medio individual de toda la población de la ecuación (9) (w_t), como:

$$w_{40\text{-}60} = a_0 + a_1 w_t + e \quad (14)$$

$$w_{61\text{-}90} = a_0 + a_1 w_t + e \quad (15)$$

donde a_0 y a_1 son coeficientes de regresión y e es el error.

6.2.2.1.1 Análisis de regresión

Para estimar el valor de los coeficientes de regresión, calcular los valores de los errores residuales y realizar las pruebas de normalidad de estos últimos en las ecuaciones (9), (10), (11), (14) y (15), se llevaron a cabo los métodos descritos en la subsección 6.2.1.4.

6.2.2.1.2 Elementos estocásticos

Se siguió un procedimiento similar al descrito para la incorporación de elementos estocásticos en la fase de pre-cría (subsección 6.2.1.4). A efecto de estimar la variabilidad en la producción de un estanque, se incorporaron dos fuentes principales de variabilidad estocástica. Una de ellas correspondió a los parámetros w_f, k, z, c, d, a_0, a_1, y a_2 de las ecuaciones (9), (2), (10), (11), 14) y (15), mientras que la otra correspondió a las variables dependientes w_t, p_1, p_2, $w_{40\text{-}60}$ y $w_{61\text{-}90}$ en las ecuaciones (9), (10), (11), (14) y (15).

La variabilidad de cada uno de los parámetros se simuló utilizando una distribución Pert (Vose, 2001) en la que los valores mínimo y máximo de las distribuciones correspondieron a los valores más bajos y más altos de los parámetros estimados de las tres réplicas de cada sexo, mientras que la entrada más probable se calculó mediante las ecuaciones (7) y (8).

La variabilidad aleatoria en las variables dependientes se incorporó usando el método de "envoltura" previamente descrito para la fase de pre-cría (subsección 6.2.1.4). Es decir, se ajustaron distribuciones normales a los valores residuales resultantes de ajustar las ecuaciones (9), (10), (11), (14) y (15) a los datos correspondientes a cada réplica. Previamente al ajuste de las distribuciones, se empleó la prueba de Shapiro-Wilk's para examinar la normalidad de los datos. Para todos estos procesos se empleó el software referido en la subsección 6.2.1.4.

6.2.2.1.3 Simulación Monte Carlo

El sub-modelo biológico se programó en Excel 10.0 y se llevaron a cabo simulaciones Monte Carlo con @Risk 6.0, con el fin de generar variabilidad estocástica en las poblaciones de machos y hembras (cada dos semanas, hasta 120 días), utilizando las distribuciones Pert y normal descritas anteriormente. Para la simulación, se consideraron las correlaciones entre las estimaciones de los parámetros de las ecuaciones (9), (12) y (13), así como las de

los valores de la media y la desviación estándar de las distribuciones normales de los residuales.

Se generaron distribuciones de salida para la biomasa correspondiente a las categorías de 40-60 g y 61-90 g, así como para la biomasa comercial y total. El coeficiente de variación (es decir, desviación estándar/media) se utilizó como un índice de incertidumbre (Ayyub, 2014; Mun, 2006), donde un alto valor del coeficiente indica una alta incertidumbre.

6.2.2.2 Sub-modelo del factor de conversión alimenticia (FCA).

Este modelo se preparó separadamente para machos y hembras. El *FCA* se predijo, en función del tiempo, ajustando una ecuación polinómica a las tres réplicas correspondientes a cada sexo. La variabilidad estocástica se incorporó ajustando distribuciones normales a los valores residuales del análisis de regresión (método de "envoltura" ya descrito).

La ecuación correspondiente a los machos fue:

$$FCA = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + e \quad (16)$$

mientras que para las hembras se usó:

$$FCA = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 \cdot t^5 + e \quad (17)$$

donde *FCA* es el factor de conversión alimenticio, a_0, $a1$, a_2, a_3, a_4, a_5 son coeficientes de regresión, *t* es el tiempo, y *e* es el error residual. Se usó Stata 13.0 para estimar los coeficientes y el grado de las ecuaciones polinómicas se estableció de acuerdo con Zar (2010). Los valores de *FCA* y de la biomasa total de langosta se usaron para calcular el alimento suministrado.

6.2.2.3 Sub-modelo económico

Los ingresos netos (In_t) y la relación beneficio-costo (b_t/c_t) se usaron como indicadores de desempeño económico, calculándose en función del tiempo, de acuerdo con:

$$In_t = vb_t - c_t \quad (18)$$

$$b_t/c_t = vb_t / c_t \quad (19)$$

donde el valor de la biomasa (vb_t) es la suma de los valores de las biomasas de las categorías 40-60 g y 61-90 g, y c_t son los costos de operación considerados para el análisis. Los valores de biomasa de cada categoría se calcularon, en función del tiempo, como el producto de sus biomasas (calculadas con el sub-modelo biológico) por el de sus respectivos precios de venta en el mercado local y regional ($260/kg para la 40-60 g y $300/kg para la 61-90 g).

Los costos de operación, por otro lado, se calcularon como:

$$c_t = cpp + cpa + cfer + cl_t + cea_t + cep_t + ca_t + cm_t \quad (20)$$

donde los costos son: *cpp*, preparación de estanque; *cpa,* pre-adultos*; cfer*, fertilizante; cl_t, mano de obra; cea_t, energía para aireación; cep_t, energía para bombeo; ca_t, alimento, y cm_t, otros costos. Los valores unitarios de los costos fueron los mismos que los de la fase de pre-cría (Tabla IV), con excepción del uso de pre-adultos con un costo de $1.35 pesos por organismo, en lugar de juveniles, así como de la mano de obra y otros costos de operación, pues en la fase de engorda son, respectivamente, $316.66 y $210.92/ha/día.

A efecto de determinar el tiempo óptimo de cosecha, se calculó el valor presente del ingreso neto (*VPN*) mediante las ecuaciones:

$$VPN = \Sigma (vb_t - c_t) / (1+ (d/365))^{t} \quad (21)$$

$$VPN = \Sigma (vb_t - c_t)/ (1+d))^{t/365} \quad (22)$$

donde vb_t es el valor total de la biomasa al día t, c_t son los costos de producción acumulados hasta ese día y *d* es la tasa de descuento. Se considera, como tiempo óptimo de cosecha, aquél en el que se maximiza el valor del *VPN*. Para efecto del análisis se usaron tasas de descuento de 2.5%, 5.0%, 7.5% y 10.0 %.

Se incorporaron elementos estocásticos para representar la variabilidad anual en el precio del alimento utilizando la ecuación (6) y lo explicado en la subsección 2.2.1.5 relativo a dicha ecuación. Los precios de langosta de agua dulce son bastante estables y no se consideró variabilidad durante el periodo de cultivo. Por otro lado, en el mercado local y regional no existe información confiable y disponible sobre la variabilidad anual de los precios de la langosta de agua dulce por lo que se decidió mantenerlos constantes.

6.2.2.4 Análisis de estrategias de cosecha

Se analizaron dos estrategias. La primera corresponde a la práctica tradicional de cosechar simultáneamente los machos y las hembras a un tiempo determinado, y la segunda, que analiza lo que pudiera obtenerse mediante la alternativa de cosechar ambos sexos por separado, en tiempos diferentes. Con el fin de comparar las estrategias se calcularon los ingresos netos que pueden obtenerse con cada una de ellas en función del tiempo. Para la estrategia tradicional se sumaron los ingresos netos que pudieran obtenerse mediante la cosecha simultánea de ambos sexos para cada tiempo del cultivo, y el tiempo óptimo de cosecha de dicha estrategia se definió como aquél para el que se calcula que la suma de dichos ingresos es máxima. Para la estrategia alternativa, primero se definió el tiempo óptimo en el que se maximizan los ingresos netos para cada sexo por separado y, posteriormente, dichos ingresos netos máximos se sumaron para calcular los ingresos netos totales.

Considerando la libertad que se tiene de manejar y cosechar a los sexos por separado con el fin de maximizar los beneficios, lo esperable es que con la segunda estrategia dichos beneficios siempre sean mayores que los que se obtienen con la estrategia

convencional, a menos que, en esta última, los tiempos óptimos de cosecha sean idénticos para ambos sexos, lo que implicaría que, bajo esa circunstancia particular, ambas estrategias son equivalentes y producen el mismo resultado. El análisis de las estrategias de cosecha también se llevó acabo, en términos de la relación beneficio/costo, siguiendo el procedimiento antes descrito.

Con excepción del caso particular en el que el tiempo óptimo de cosecha sea el mismo para ambos sexos, la estrategia convencional es siempre sub-óptima comparada con la alternativa, razón por la cual se calculó el costo de oportunidad diario (en términos absolutos y por peso invertido) en que se incurre por hacer un manejo sub-óptimo del tiempo de cosecha.

6.2.2.5 Prueba de hipótesis

Para probar la hipótesis establecida para este trabajo de investigación, se utilizaron los valores de ingresos netos correspondientes a ambos sexos obtenidos con la estrategia de cosecha óptima, y se analizaron con una prueba t-Student con el fin de determinar si existen diferencias significativas en el valor medio de los ingresos netos entre los sexos. Para la prueba se empleó Statistica 6.0, estableciendo $P < 0.05$ como nivel de significación.

6.2.2.5. Simulación Monte Carlo y análisis de sensibilidad.

El modelo bioeconómico se programó en Excel 10.0 usando hojas de cálculo por separado para cada sexo. Se llevaron a cabo simulaciones Monte Carlo con @Risk 6.0 (Palisade, Ithaca, N.Y), a fin de generar variabilidad estocástica en los valores de ingreso neto y de la relación beneficio/costo para machos y hembras utilizando las distribuciones Pert y normal descritas anteriormente. Para efectos de la simulación y cuando fue procedente, se consideraron las correlaciones entre las estimaciones de los parámetros de las ecuaciones, así como las de los valores de la media y la desviación estándar de las

distribuciones normales de los residuales de los tres sub-modelos. Mediante la simulación, se generaron distribuciones de probabilidad de los indicadores económicos correspondientes a las diferentes estrategias de cosecha.

La granja comercial de "Redclaw de México S.P.R. de R.L. " contiene ocho estanques de engorda del mismo tamaño, de los cuales, para cada sexo, se destinan cuatro de ellos. Para simular lo que podría ocurrir para toda la granja, en vez de un solo estanque para cada sexo, se utilizaron las distribuciones teóricas disponibles en @Risk 6.0 que mejor se ajustaron a las distribuciones de salida de ingresos netos de machos y hembras. Enseguida, para cada sexo, se utilizaron cuatro réplicas independientes de la distribución que ofreció el mejor ajuste, a fin de tomar cuatro muestras de lo que puede ocurrir, a nivel de un estanque, en la variabilidad de los ingresos netos. El proceso de muestreo se hizo repetidamente promediando, en cada ocasión, los cuatro valores de las muestras y generando así valores de lo que puede ocurrir en un estanque “promedio” para cada sexo, representativos para la granja. El coeficiente de variación (CV = desviación estándar/media) se usó como un índice de incertidumbre del desempeño económico (Ayyub, 2014).

Para analizar la sensibilidad de los ingresos netos a factores de riesgo, se utilizaron valores “mapeados” de los coeficientes de regresión múltiple los cuales relacionan los ingresos netos con los respectivos parámetros zootécnicos y económicos. De acuerdo con esto, un valor absoluto alto del coeficiente, indica un alto impacto (sensibilidad) de la variable o parámetro correspondiente en los ingresos netos. Para el análisis de sensibilidad se utilizaron los procedimientos disponibles en @Risk 6.0.

7. RESULTADOS

7.1. Etapa de pre-cría.

Los valores de los parámetros zootécnicos obtenidos en la etapa de pre-cría se presentan en la tabla V.

Tabla V. Supervivencia, peso final, biomasa y factor de conversión alimenticia de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) durante la etapa de pre-cría, en estanques con recubrimiento de PVC.

Estanque	Supervivencia (%)	Peso final* (g)	Biomasa (t/ha)	FCA
1	85	21.4 ± 6.71[a]	2.72	1
2	82.7	20.0 ± 2.13[a]	2.48	1.1
3	85	21.4 ± 5.30[a]	2.72	1.1
Promedio	84.23 ± 1.32	20.93 ± 0.80	2.64 ± 0.13	1.06 ± 0.05

* Valores con la misma letra no son significativamente diferentes (P > 0.05).

Las ecuaciones (1), (4) y (6) que se usaron para calcular w_t, *FCA* y *pa* produjeron ajustes adecuados y significativos, en términos de análisis de varianza de la regresión ($P < 0.05$) (Figs. 2, 3 y 4). En la tabla VI se señalan las distribuciones de los valores de los coeficientes de regresión y de los correspondientes errores residuales resultantes de dichos ajustes.

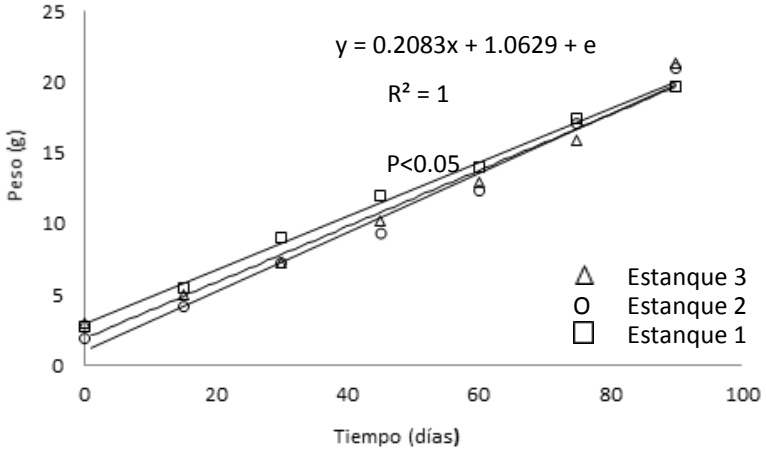

Figura 2. Ajuste de la ecuación de crecimiento individual (Ec. 1) a los valores medios de peso individual de la langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de pre-cría. La curva se ajustó por separado a los datos de las tres réplicas

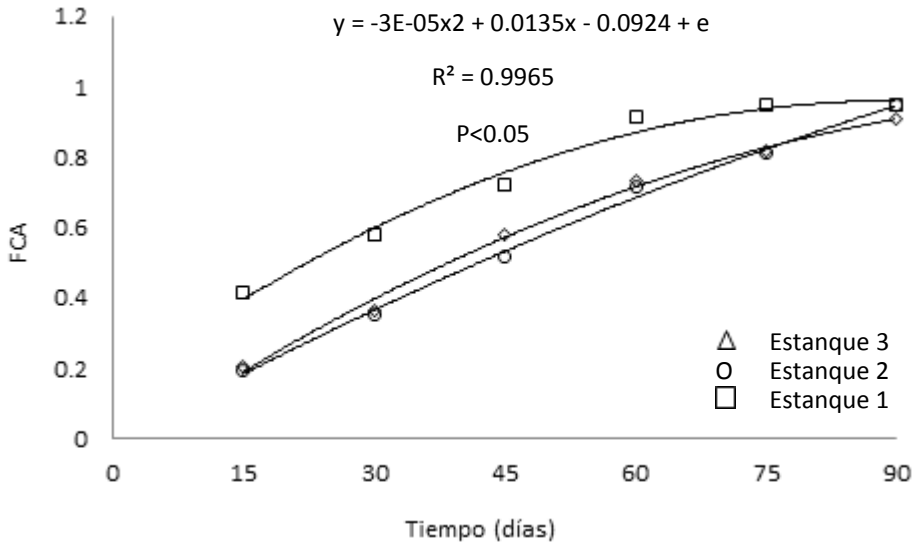

Figura 3. Ajuste de un polinomio de segundo grado a valores del factor de conversión alimenticia (FCA) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de pre-cría. Las curvas se ajustaron por separado a los datos de tres réplicas.

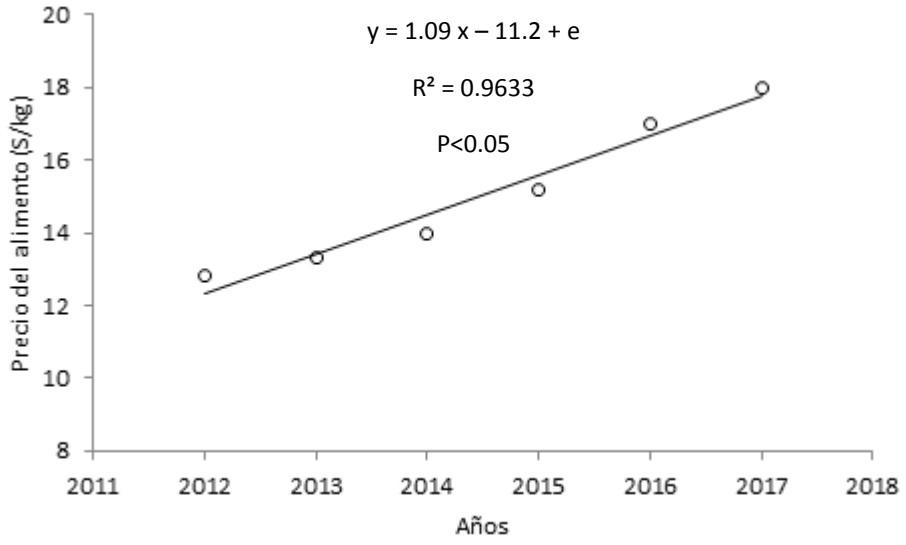

Figura 4. Ajuste de un modelo lineal al precio del alimento comercial PIASA de 35% de proteína cruda, utilizado para el cultivo de langosta de agua dulce.

Tabla VI. Ecuaciones y distribuciones de los coeficientes de regresión y de errores residuales utilizados para la etapa de pre-cría de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).

	Ecuación	Descripción	Distribuciones de parámetros y del error
1	$w_t = a\,t + b + e$	w_t = peso medio individual a y b = coeficientes de regresión t = tiempo e =error residual	a = pert (mín = 0.189369, mp= 0.197729, máx = 0.208354); b = pert (mín = 1.06, mp = 1.98, máx = 2.96); e = nml(μ = 0, σ = 0.75)
4	$FCA = a_0 + a_1\,t - a_2\,t^2 + e$	FCA = factor de conversión alimenticia a_0, a_1, a_2 =coeficiente de regresión t = tiempo e = error residual	a_0 = pert (mín = 0.094, mp = 0.103, máx = 0.1197564); a_1 = pert (mín = .012, mp = 0.014, máx = 0.014); a_2 = pert (mín = -0.0000602, mp = -0.00004965, máx = -0.0000278); e = nml(μ = 0, σ = 0.047)
6	$pa = a_0 + a_1\,t + e$	pa = precio de alimento a_0 y a_1 = coeficientes de regresión t = tiempo e = error residual	a_0 = 11.2 a_1= 1.09 e = nml(μ = 0, σ = 0.39)

* Mín, mínimo; máx, máximo; mp, más probable; nml, normal.

Los resultados de la simulación Monte Carlo indican que, al final de la etapa de pre-cría, existe un 95 por ciento de confianza de que:

1) Los pre-adultos tengan un peso individual que puede variar, alrededor de la media de 19.98 g, entre 19.06 g y 20.93 g (Fig. 5).
2) Puedan producirse 125 810 pre-adultos por hectárea, pudiendo variar entre 124 592 y 127 029 pre-adultos por hectárea (Fig. 6).
3) La producción se encuentre entre 2.38 t/ha y 2.62 t/ha, con un promedio de 2.5 t/ha (Fig. 7).
4) El requerimiento de alimento para producir un kilogramo de pre-adultos sea de 0.97, pudiendo variar entre 0.88 y 1.06 kg (Fig. 8).
5) El costo de producción por cada pre-adulto sea de $1.35, con una variabilidad que va desde $1.31 hasta $1.38 (Fig. 9).
6) La producción de un kilogramo de pre-adultos puede variar entre $66.30 y $71.03, con una media de $ 68.13 (Fig. 10).

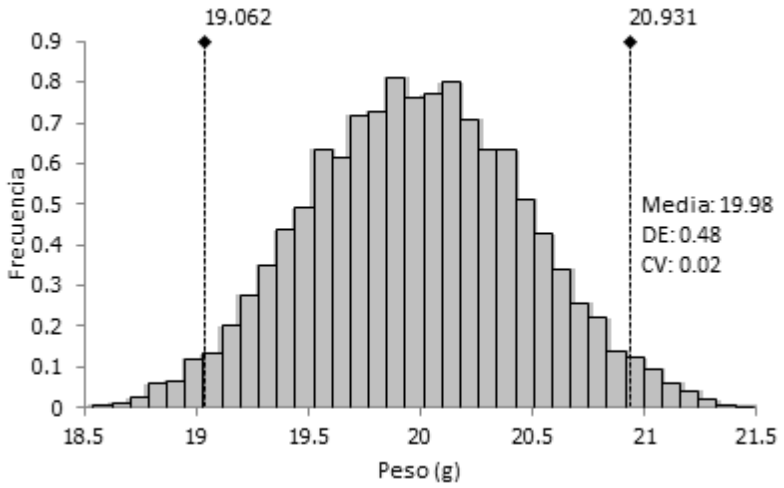

Figura 5. Distribución de probabilidad del peso individual promedio de la de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 90 días en la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

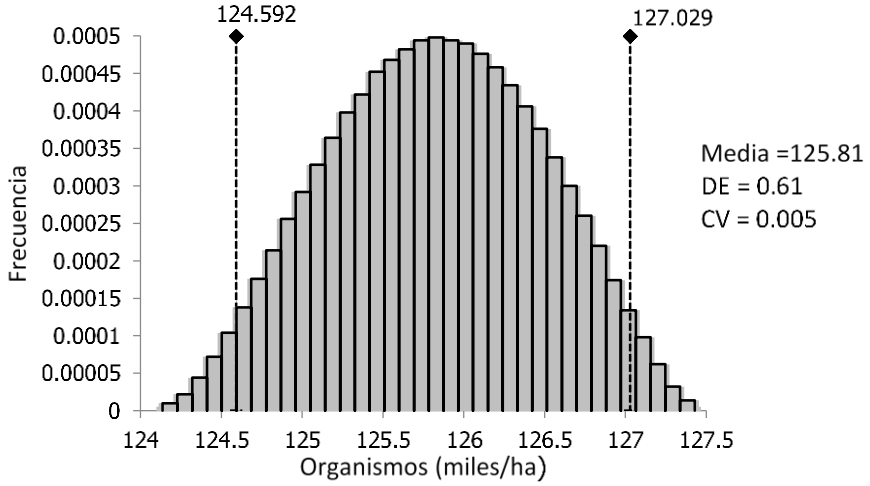

Figura 6. Distribución de probabilidad del número de organismos por hectárea de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 90 días en la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

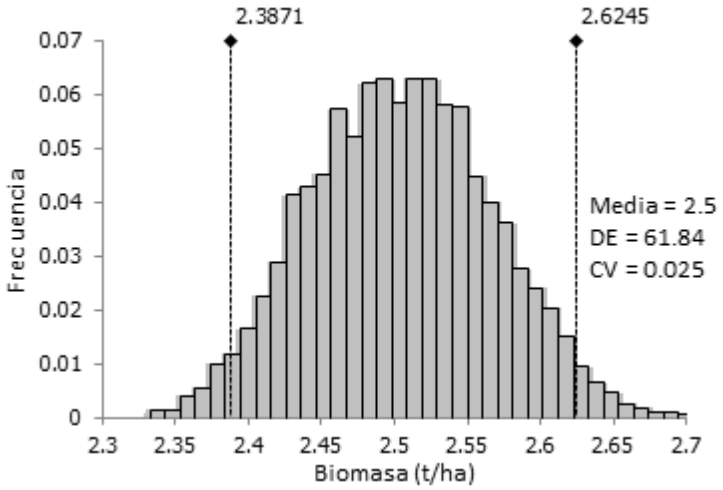

Figura 7. Distribución de probabilidad de la producción de biomasa de pre-adultos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 90 días de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

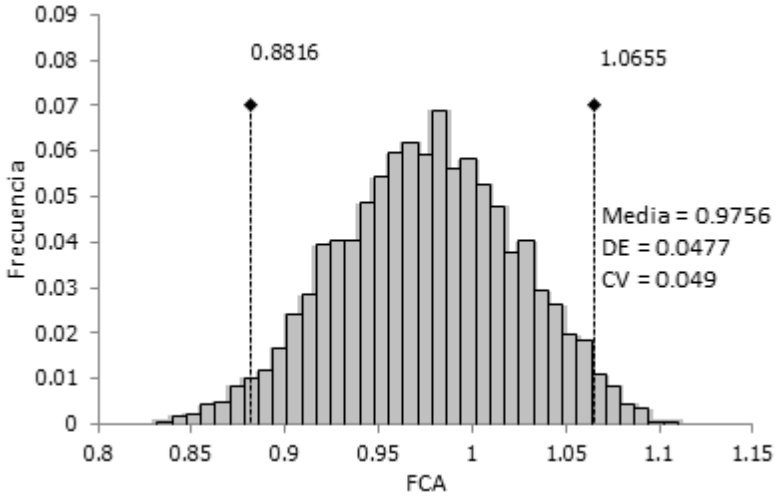

Figura 8. Distribución de probabilidad del factor de conversión alimenticia (FCA) después de 90 días de pre-cría de langosta de agua dulce *(*C. quadricarinatus*)*. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

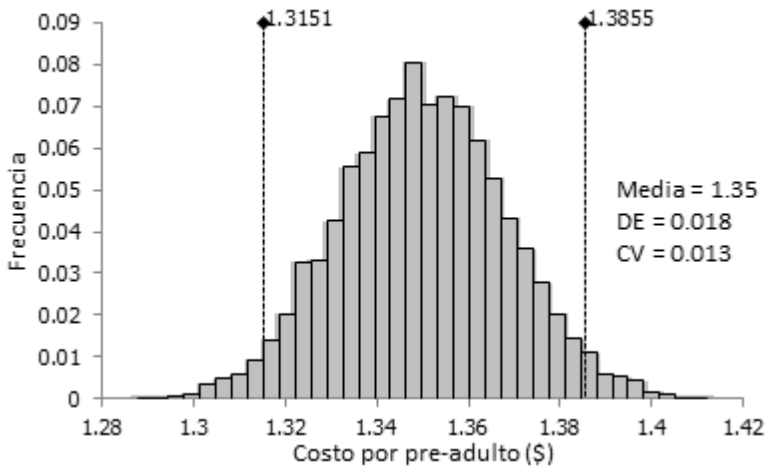

Figura 9. Distribución de probabilidad del costo de producción de un pre-adulto de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), a los 90 días del cultivo en la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

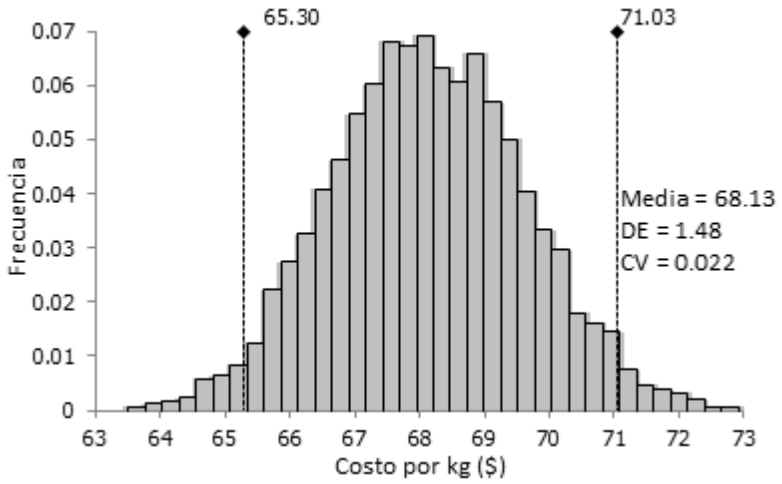

Figura 10. Distribución de probabilidad del costo de producción por kilogramo de pre-adulto de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), a los 90 días de cultivo, durante la etapa de pre-cría. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

7.2. Etapa de engorda

Los valores de los parámetros zootécnicos obtenidos al final de la etapa de engorda se presentan en tabla VII.

Tabla VII. Supervivencia, peso final, biomasa y factor de conversión alimenticia de machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), durante la etapa de engorda, en estanques con recubrimiento de PVC. Los valores promedio con letras diferentes entre sexos para cada parámetro son significativamente diferentes (p< 0.05).

		Supervivencia (%)	Peso final (g)	Biomasa (t/ha)	FCA
Machos	Estanque 1	82.0	65.4±11.67	3.22	0.9
	Estanque 2	81.2	67.0±13.67	3.26	1
	Estanque 3	81.0	60.0±14.60	2.92	0.95
	Media	81.4 ± 0.30a	64.1 ± 2.11a	3.13 ± 0.10a	0.95 ± 0.02a
Hembras	Estanque 1	80.5	57.0±13.40	2.75	1.1
	Estanque 2	79.5	55.0±12.07	2.62	1.0
	Estanque 3	79.8	54.5±13.43	2.61	1.1
	Media	79.9 ± 0.29b	55.5 ± 0.76b	2.66 ± 0.04b	1.06 ± 0.03a

Las ecuaciones (9), (10) y (11) que se utilizaron para el cálculo de w_t, p_1 y p_2 produjeron resultados satisfactorios y significativos, en términos del análisis de varianza de la regresión ($P < 0.05$), tanto para los machos como las hembras (Figs. 11 y 12). El peso individual final de los machos se estima que varía entre 58.4 y 66.0 g, y el de las hembras entre 52.7 y 56.2 g. De acuerdo con los resultados del análisis de regresión, el peso individual promedio de las hembras al cual se encuentra reclutada la mitad de la máxima población comercial, varió entre 38.7 y 42.0 g, y el de los machos entre 41.3 y 42.0 g.

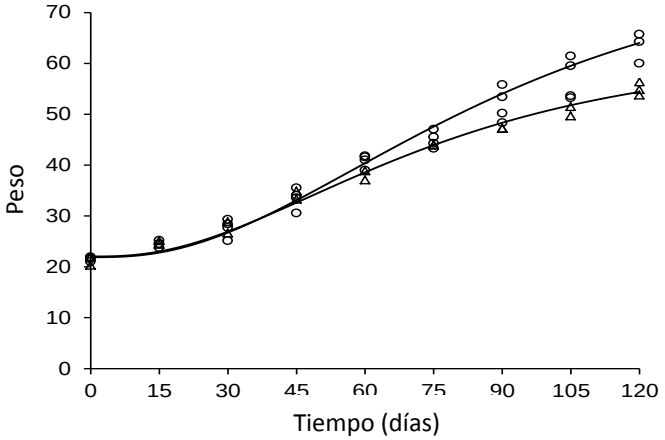

Figura 11. Ajuste de la ecuación de crecimiento individual (Ec. 9) a los valores medios de peso individual de machos (círculos) y hembras (triángulos) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*). La curva se ajustó por separado a los datos de las tres réplicas.

Las ecuaciones 14 y 15 para el cálculo del peso individual promedio de las categorías comerciales, en función del peso individual promedio de la población total, produjeron un ajuste satisfactorio y significativos en términos del análisis de varianza de la regresión ($P < 0.05$) (Fig. 13).

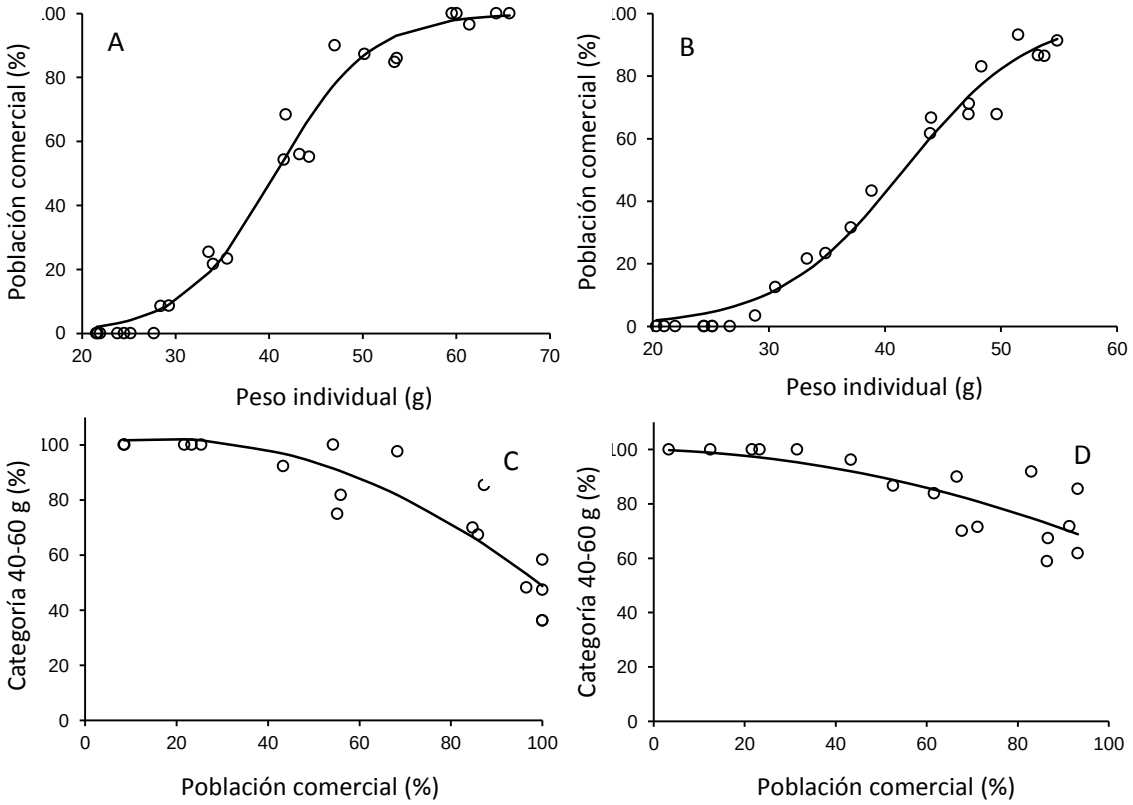

Figura 12. Ajuste de la ecuación logística (Ec. 10) al porcentaje de población comercial de machos (A) y hembras (B) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) en función del peso individual. Ajuste de un polinomio de segundo grado (Ec. 11) al porcentaje de la población que corresponde a la categoría de 40-60 g de machos (C) y hembras (D), en función del porcentaje de población comercial. Las curvas se ajustaron por separado a los datos de las tres réplicas.

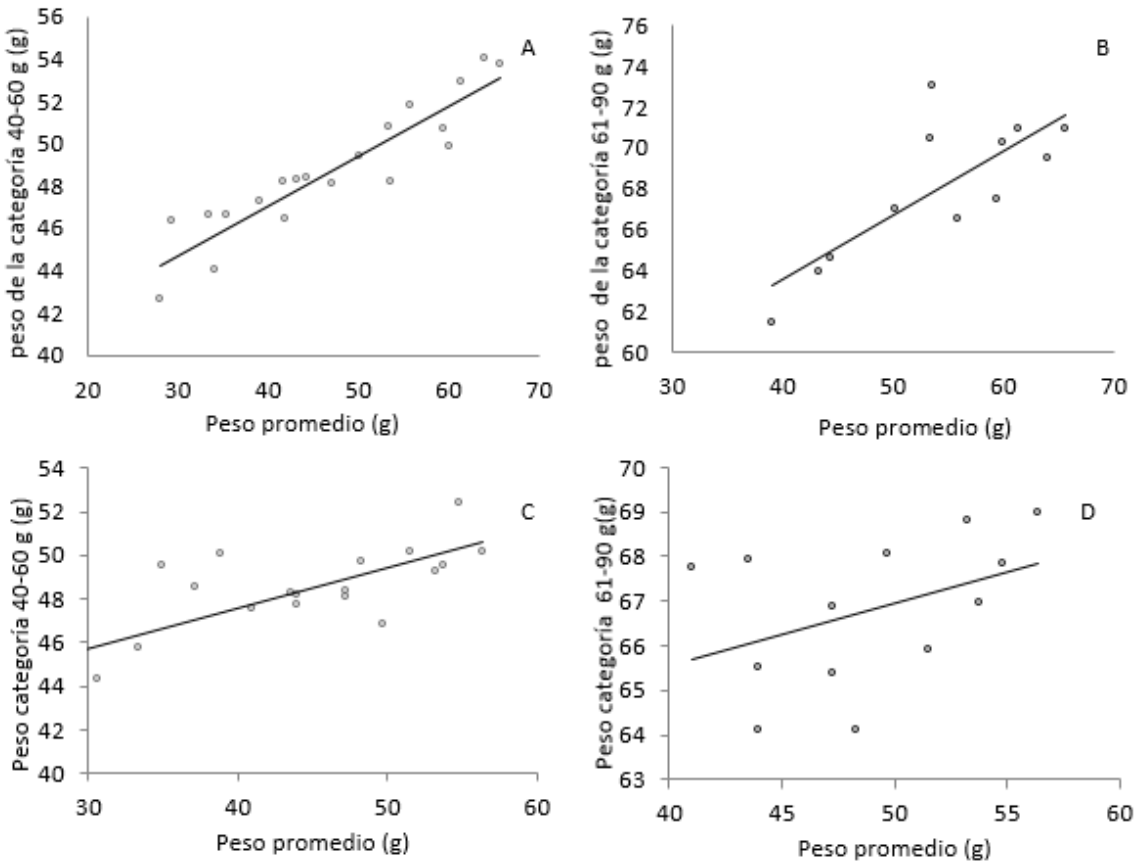

Figura 13. Ajustes de un modelo lineal a los pesos individuales promedio de la categoría 40-60 g para machos (A) y hembras (C), y de la categoría 61-90 g para machos (B) y hembras (D) de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en función del peso promedio del total de la población.

En la tabla VIII se muestran los resultados de los ajustes de las ecuaciones para el cálculo del peso individual de la langosta, de los porcentajes de las poblaciones comerciales y de los pesos individuales de la langosta para las categorías 40-60 y 61-90 g, con las correspondientes estimaciones de los parámetros de las distribuciones usadas para la generación de variación estocástica en los parámetros del sub-modelo biológico y de los errores residuales para la generación estocástica de sus variables dependientes.

Tabla VIII. Ecuaciones, distribuciones de parámetros y distribuciones de errores utilizadas para el sub-modelo biológico en la etapa de engorda de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).

	Ecuación	Descripción	Distribuciones de parámetros y de errores residuales *
9	$w_t = w_i + (w_f - w_i)\ [(1-k^t) / (1-k^h)]^{3} + e$	*wt* = peso promedio *wi* = peso inicial *wf* = peso final *k* = coeficiente de crecimiento *h* = número de unidades de tiempo en la época de cosecha *e* = error	Machos: w_f = pert (mín = 60.0, mp = 64.4, máx = 67.0); *k* = pert (mín = 0.977, mp = 0.982, máx = 0.981); *e* = nml^d (μ= 0, σ = 1.16) Hembras: w_f = pert (mín = 52.7, mp = 54.0, máx = 56.2); *k* = pert (mín = 0.976, mp = 0.977, máx = 0.978); *e* = nml (μ= 0, σ = 1.21)
2	$n_t = n_0 \exp^{-z\,t}$	*nt* = número de sobrevivientes n_0 = población inicial *t* = tiempo *z* = tasa instantánea de mortalidad	Machos: *z* = pert (mín = 0.00165, mp = 0.00172, máx = 0.00175) Hembras: *z* = pert (mín = 0.00175, mp = 0.00183, máx = 0.00213)
10	$p_1 = b / (1+ \exp^{-c\,(wt-d)}) + e$	p_1 = porcentaje de la población comercial *b* = porcentaje máximo de la población comercial *c* = velocidad de la transición de la curva sigmoide de la asíntota inferior a la superior *d* = peso individual cuando se recluta la mitad de la población comercial máxima *e* = error	Machos: *b* = 100; *c* = pert (mín = 0.163, mp = 0.192, máx = 0.207); *d* = pert (mín = 38.5, mp = 40.6, máx = 41.7); *e* = nml (μ= 0, σ = 4.08) Hembras: *b* = 100; *c* = pert (mín = 0.15295, mp = 0.18951, máx = 0.18952); *d* = pert (mín = 41.19, mp = 41.55, máx = 42.0); *e* = nml (μ= 0, σ = 4.69)
11	$p_2 = a_0 + a_1\, p_1 + a_2\, p_1^2 + e$	p_2 = porcentaje de la categoría 40-60g a_0, a_1, y a_2 = coeficiente de regresión *e* = error	Machos: a_0 = pert (mín = 91.1, mp = 94.9, máx = 100.3); a_1 = pert (mín = 0.10, mp = 0.43, máx = 0.78); a_2 = pert (mín = -0.010, mp = -0.009, máx = -0.007); *e* = nml (μ= 0, σ = 10.78) Hembras:

			a_0 = pert (mín = 101.6, mp = 108.3, máx = 124.0); a_1 = pert (mín = -1.06, mp = -0.47, máx = 0.036); a_2 = pert (mín = -0.006, mp = -0.0003, máx = -0.006); e = nml (μ= 0, σ = 7.37)
14	$w_{t\ 40\text{-}60} = a_0 + a_1\ w_t + e$	$w_{t\ 40\text{-}60}$ = peso medio de la categoría 40-60g a_0, and a_1 = coeficiente de regresión e = error	Machos: a_0 = pert (mín = 35.4, mp = 37.9, máx = 39.0); a_1 = pert (mín = 0.19, mp = 0.23, máx = 0.28); e = nml (μ= 0, σ = 0.81) Hembras: a_0 = pert (mín = 38.3, mp= 40.6, máx = 43.5; a_1 = pert (mín = 0.12, mp = 0.17, máx = 0.21); e = nml (μ= 0, σ = 1.29)
15	$w_{t\ 61\text{-}90} = a_0 + a_1\ w_t + e$	$w_{t\ 40\text{-}60}$ = peso medio de la categoría 61-90 g a_0, and a_1 = coeficiente de regresión e = error	Machos: a_0 = pert (mín = 47.8, mp = 54.8, máx = 57.4); a_1 = pert (mín = 0.19, mp = 0.25, máx mx = 0.35); e = nml (μ= 0, σ = 1.48) Hembras: a_0 = pert (mín = 52.9, mp = 57.5, máx = 63.2); a_1 = pert (mín = 0.08, mp = 0.18, máx = 0.26); e = nml (μ= 0, σ = 1.25)

* Mín, mínimo; máx, máximo; mp, más probable; nml, normal.

Los resultados de la simulación Monte Carlo para el cálculo de los rendimientos de biomasa mostraron que, en general, hay una tendencia de la biomasa a incrementar su variabilidad, misma que se refleja en mayores intervalos de confianza del 95 %, conforme avanza el cultivo (Figs. 14 y 15). En ambos sexos, el coeficiente de variación de la biomasa comercial de la categoría de 61-90 g disminuye a medida que el tiempo avanza. En el caso de la categoría de 40-60 g y la biomasa total, sin embargo, el coeficiente de variación disminuye en función del tiempo hasta 75 días (en los machos de la categoría 40-60 g), 84 días (en las hembras de la categoría 40 -60 g), 92 días (en los machos de la biomasa total) y 94 días (en las hembras de la biomasa total), cuando el coeficiente de variación alcanza un mínimo y, a partir de entonces, aumenta progresivamente (Fig. 14A, D, y Fig. 15A, D).

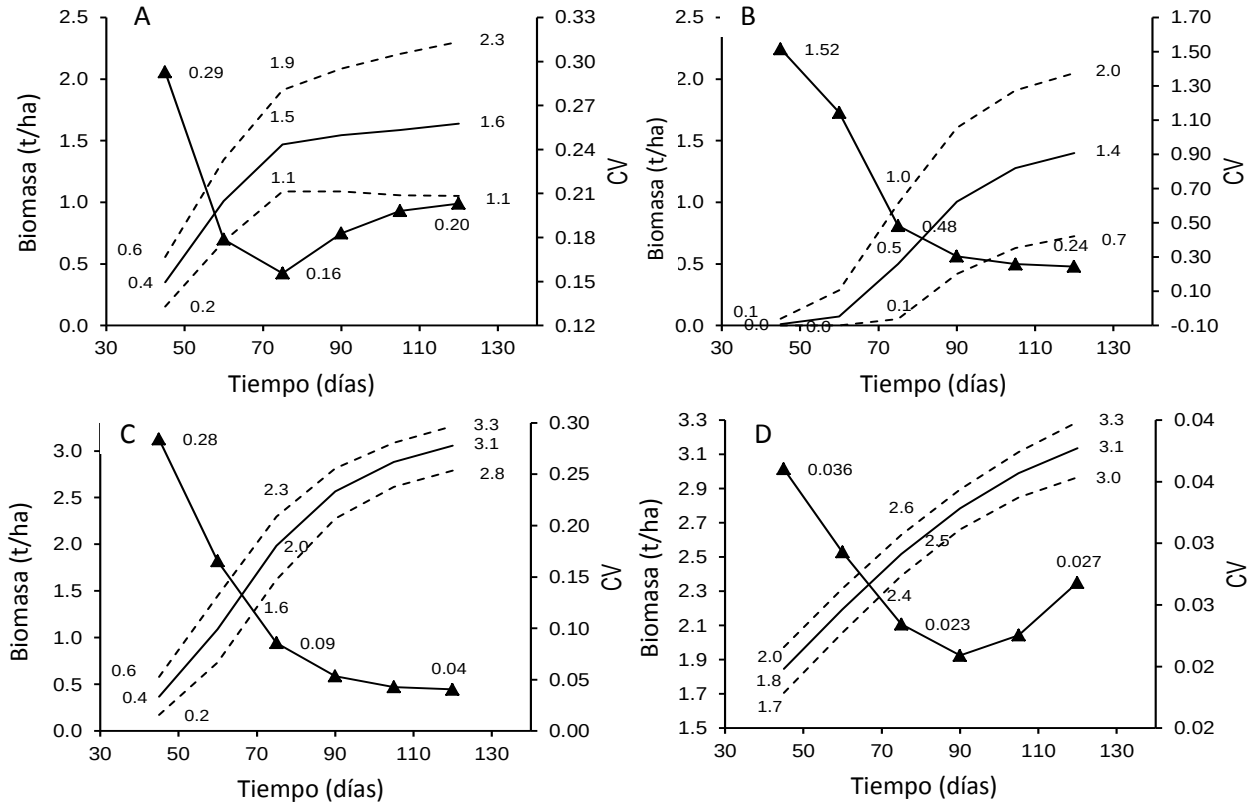

Figura 14. Producción de biomasa de machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus)* durante la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (A), 61-90 g (B), comercial (C) y población total (D). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %, y la curva con los triángulos corresponden a valores del coeficiente de variación.

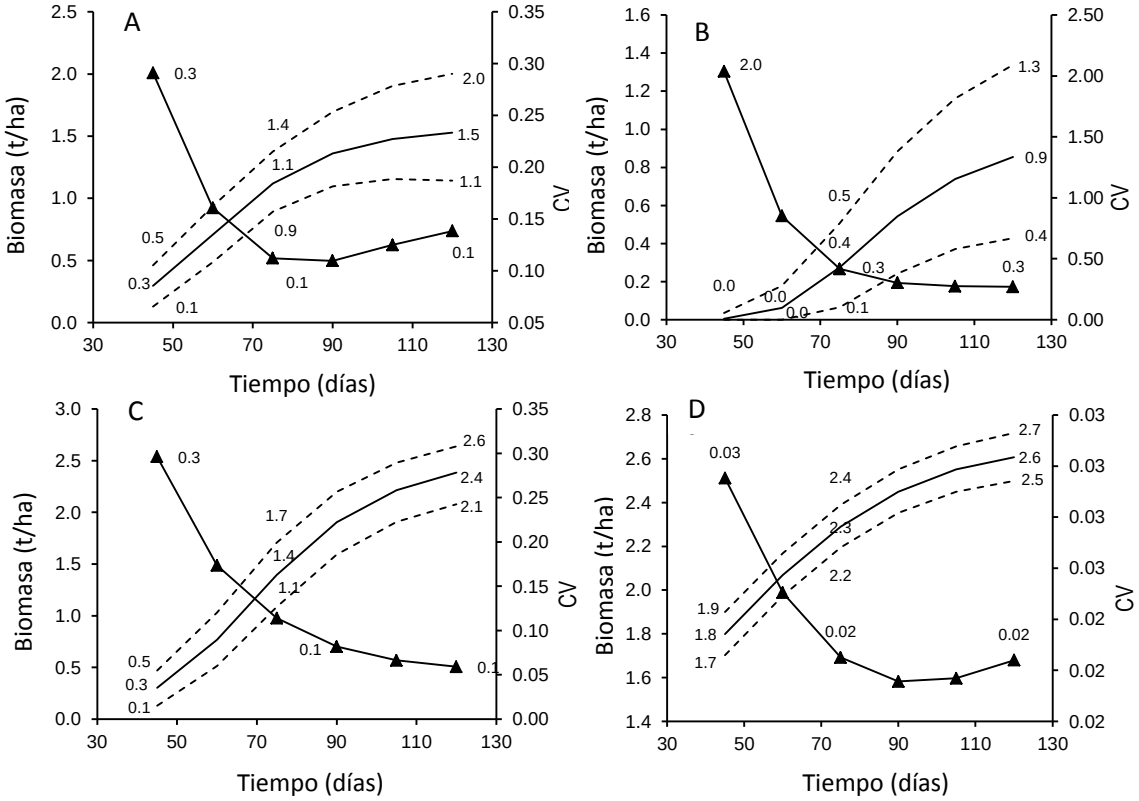

Figura 15. Producción de biomasa de hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus)* durante la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (A), 61-90 g (B), comercial (C) y población total (D). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %, y la curva con los triángulos corresponde a valores del coeficiente de variación.

En las figuras 16 y 17 se muestran las distribuciones de probabilidad de la biomasa correspondiente a las categorías 40-60 g y 61-90 g, para ambos sexos, y de las poblaciones comercial y total al final de la etapa de engorda. De acuerdo con esos resultados, hay 95 % de confianza de que el cultivo de los machos produzcan entre:

1) 1.07 y 2.28 t/ha (media = 1.65 t/ha) de la categoría 40-60 g;
2) 0.73 y 2.04 t/ha (media = 1,4 t/ha) de la categoría 61-90 g;
3) 2.79 y 3.26 t/ha (media = 3.05 t/ha) de biomasa comercial, y;
4) 2.96 y 3.29 t/ha, (media = 3.13 t/ha), de biomasa total.

Existe un 95 % de confianza de que el cultivo de las hembras produzcan entre:

1) 1.13 y 1.95 t/ha (media = 1.52 t/ha) de la categoría 40-60 g;
2) 0.43 y 1.34 t/ha (media = 0.85 t/ha) de la categoría 60-90 g;
3) 2.10 y 2.65 t/ha (media = 2.38 t/ha) de biomasa comercial, y;
4) 2.49 y 2.72 t/ha (media = 2.60 t/ha) de biomasa total.

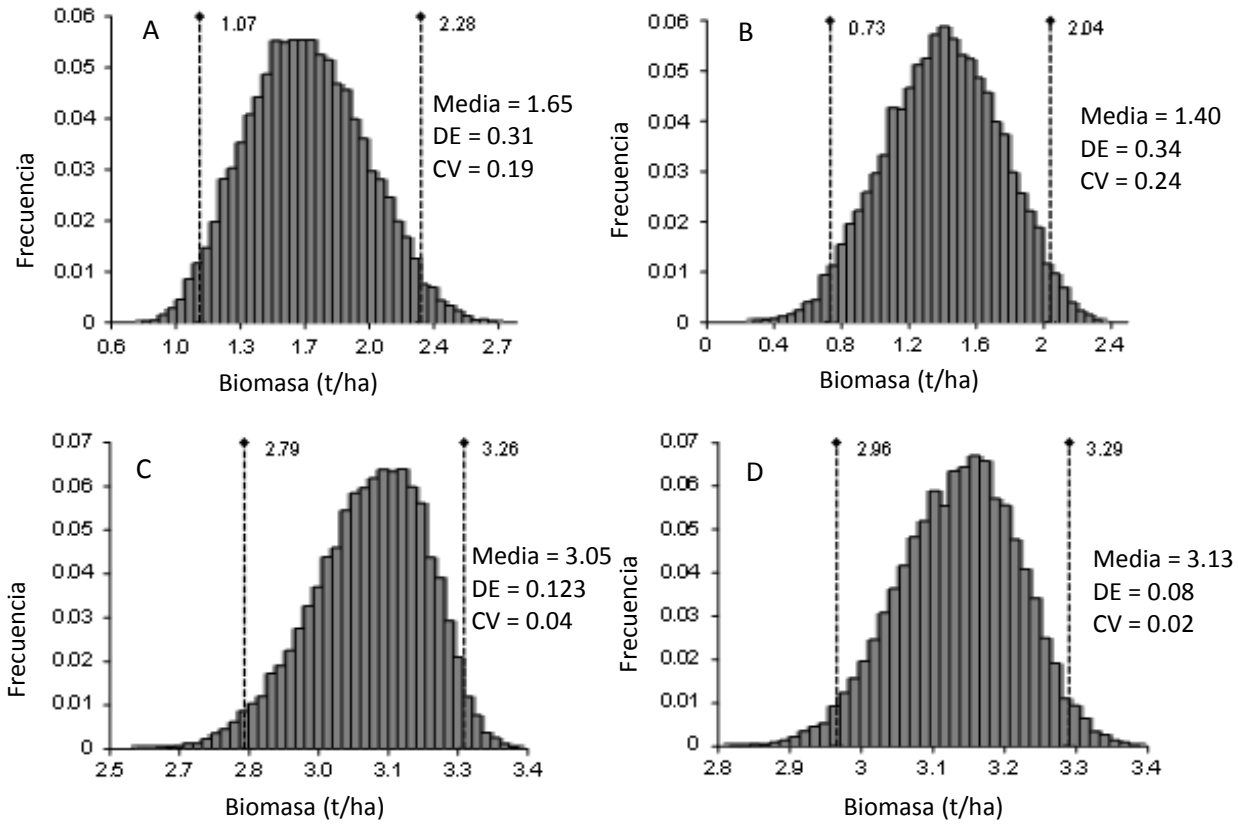

Figura 16. Distribuciones de probabilidad de la producción de biomasa de machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) después de 120 días de la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (A), 61-90 g (B), comercial (C) y población total (D). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %.

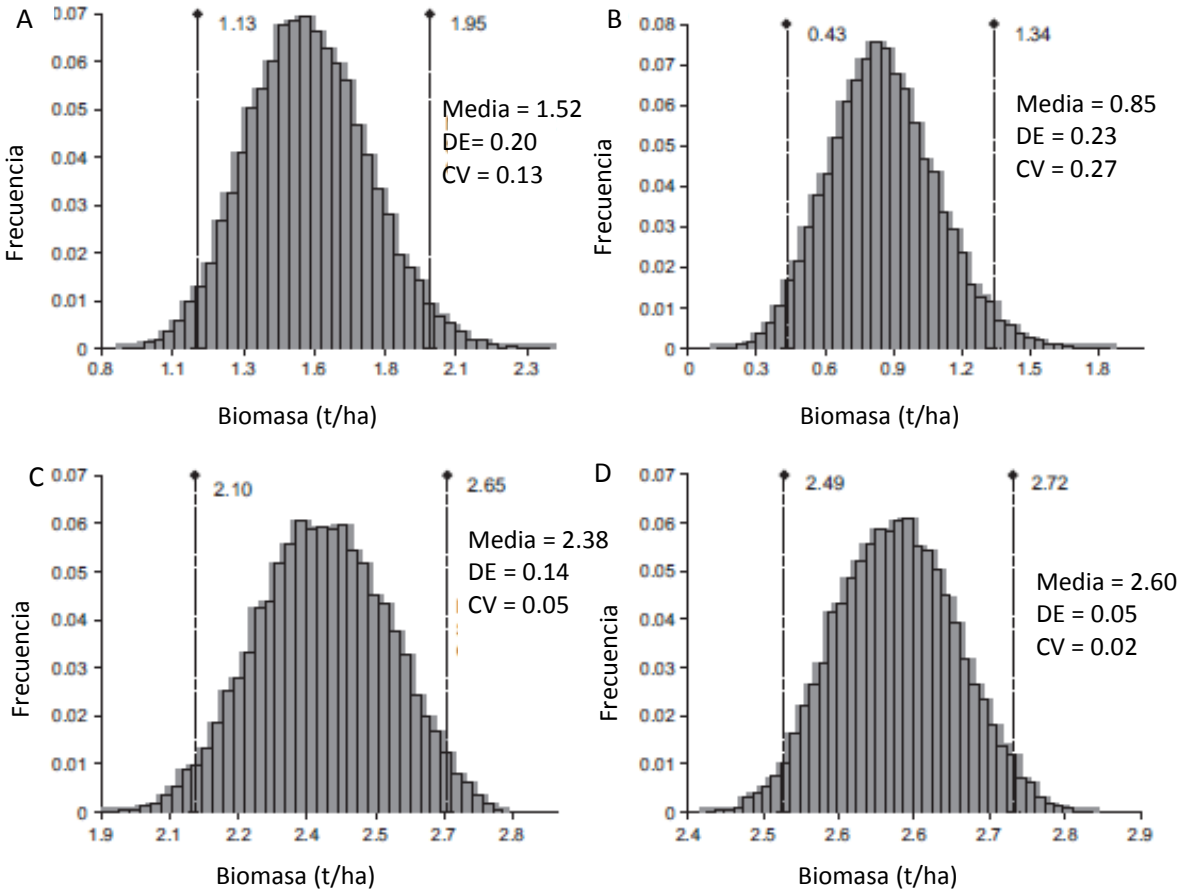

Figura 17. Distribuciones de probabilidad de la producción de biomasa de hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), después de 120 días de la etapa de engorda. Los rendimientos corresponden a las categorías 40-60 g (A), 61-90 g (B), comercial (C) y población total (D). Las líneas discontinuas indican los intervalos de confianza de 95 %.

En las figuras 18 y 19 se presentan las curvas obtenidas con los ajustes de las ecuaciones polinómicas empleadas para la predicción del factor de conversión alimenticia. De acuerdo con la metodología empleada, se determinó que polinomios de segundo y quinto grado produjeron ajustes satisfactorios y regresiones significativas ($P < 0.05$) para los machos y las hembras, respectivamente.

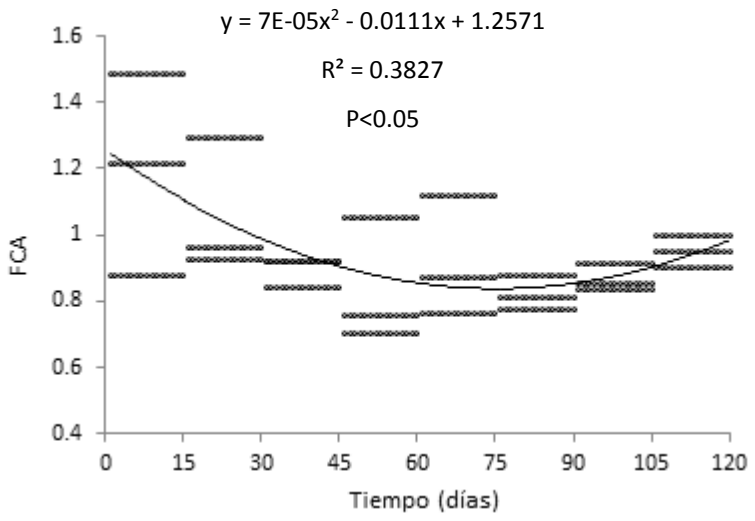

Figura 18. Ajuste de un polinomio de segundo grado a valores del factor de conversión alimenticia (FCA) de machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de engorda.

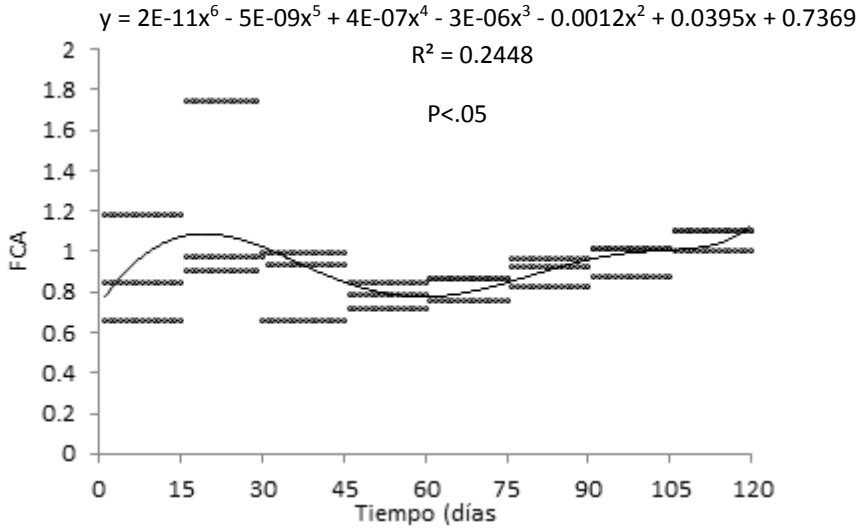

Figura 19. Ajuste de polinomio de quinto grado a valores del factor de conversión alimenticia de hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), en la etapa de engorda.

En la tabla IX se muestran los resultados de los ajustes de las ecuaciones polinómicas para el cálculo del factor de conversión alimenticia, con sus correspondientes estimaciones de los coeficientes de regresión y de los errores residuales para la engorda de langosta de agua dulce.

Tabla IX. Ecuaciones, coeficientes de regresión y distribución de los errores utilizados para el sub-modelo de conversión del alimento de la etapa de engorda de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*).

Ecuación		Descripción	Parámetro y distribución de errores
9	Machos: $FCA = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + e$	FCA = Factor de conversión alimenticio a_0, a_1, a_2 = coeficiente de regresión t = tiempo e = error	$a_0 = 1.25$ $a_1 = -0.011$ $a_2 = 0.00007$ e = nml[a] ($\mu = 0$, $\sigma = 0.14$)
10	Hembras: $FCA = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 \cdot t^5 + e$	FCA = Factor de conversión alimenticio $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ = coeficiente de regresión t = tiempo e = error	$a_0 = 0.67$ $a_1 = 0.058$ $a_2 = -0.002$ $a_3 = 0.00004$ $a_4 = -0.0000003$ $a_5 = 0.0000000009$ e = nml ($\mu = 0$, $\sigma = 0.07$)

Los resultados del análisis bioeconómico indicaron que los tiempos a los que se obtienen los valores máximos del valor presente de los ingresos netos, utilizando las ecuaciones (21) y (22) y con tasas de descuento de 2.5 %, 5.0 %, 7.5 % y 10.0 %, no fueron diferentes a los que se encontraron como tiempos óptimos de cosecha cuando se utiliza una tasa de descuento de 0.0 %. Por esa razón, los análisis se condujeron utilizando esta última tasa.

La estrategia consistente en la cosecha simultánea de machos y hembras mostró que los mejores resultados, en términos del ingreso neto y de la relación beneficio/costo, se obtienen después de 120 días de cultivo (Fig. 20A). A ese tiempo óptimo de cosecha hay 95 % de confianza de obtener entre $718 000 y $1 422 000/ha, y un promedio de $1 050

892/ha (Fig. 20B). En el caso de la relación beneficio/costo, el intervalo de confianza es de 2.87-4.63, con una media de 3.7 (Fig. 20C). De acuerdo con los valores del coeficiente de variación, la menor incertidumbre de obtener los valores de los indicadores económicos ocurre al día 101 del cultivo cuando, con 95 % de confianza, se espera que el ingreso neto varíe entre $670 950 y $1 302 850/ha, con un valor medio de $971 013/ha (CV = 0.16), y la relación beneficio/costo entre 2.85 y 4.58, con un promedio de 3.67 (CV = 0.12).

Los resultados de analizar la estrategia consistente en cosechar en forma independiente cada sexo indicaron, que, para machos, los valores promedio máximos del ingreso neto y de la relación beneficio/costo se obtienen después de 109 y 92 días, respectivamente (Fig. 21A). A los 109 días, hay 95 % de confianza de que el rendimiento económico de los machos se ubique entre $508 900 y $723 200/ha, promediando $620 505/ha (Fig. 21B), mientras que, después de 92 días, la relación beneficio/costo esperada varía entre 3.6 y 5.1, con una media de 4.36 (Fig. 21C). Los valores del coeficiente de variación indican que, después de 120 días, la incertidumbre en la obtención de los valores de ambos indicadores es mínima. A ese tiempo, hay 95 % de confianza de obtener un ingreso neto entre $504 100 y $708 700/ha, y una media de $614 638/ha (CV = 0.084), y de la relación beneficio-costo ubicarse entre 3.46 y 4.5, promediando 4.0 (CV = 0.067).

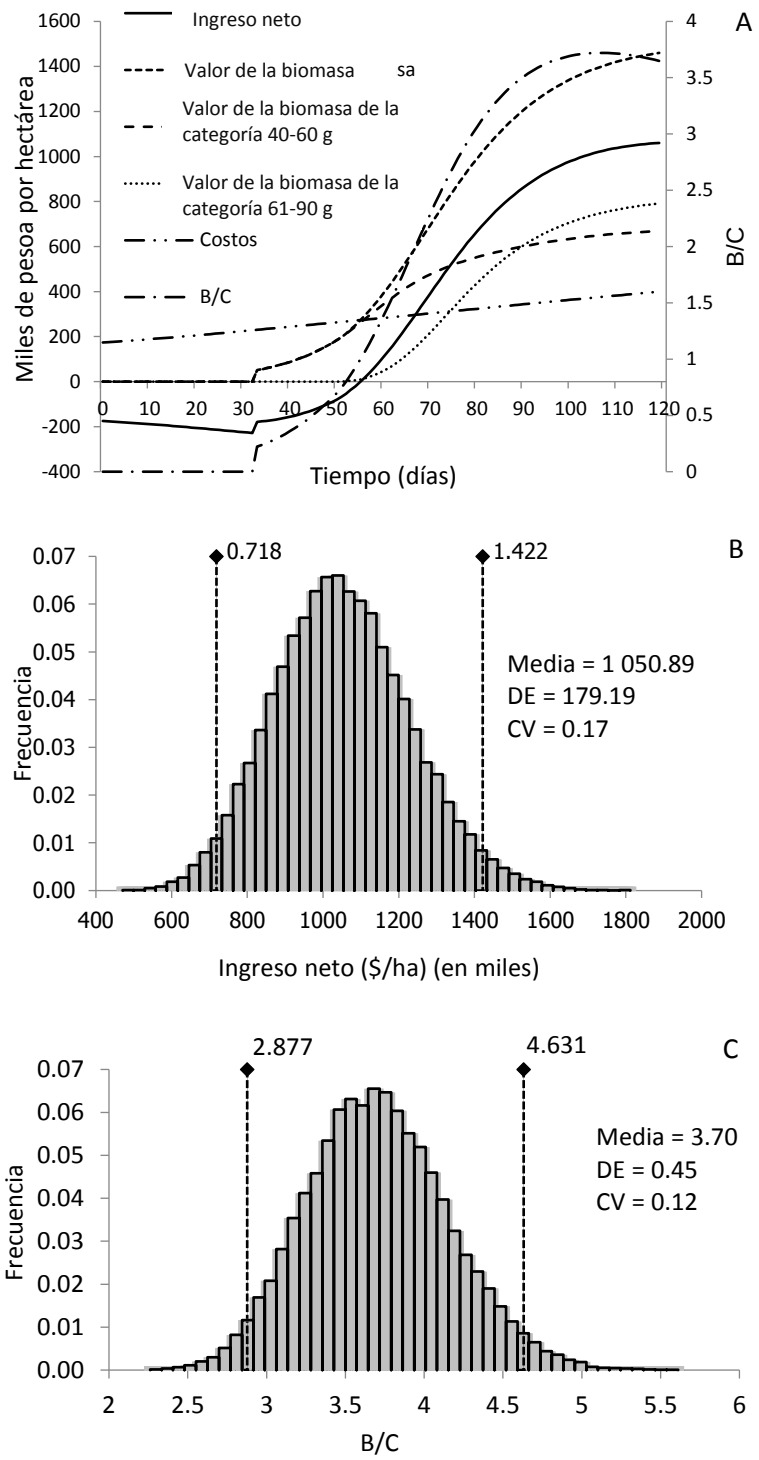

Figura 20. Resultados del análisis bioeconómico para la estrategia de cosecha simultánea de machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo de cosecha (120 días). A = Resultados; B = Ingreso neto; C = Relación beneficio-costo. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %.

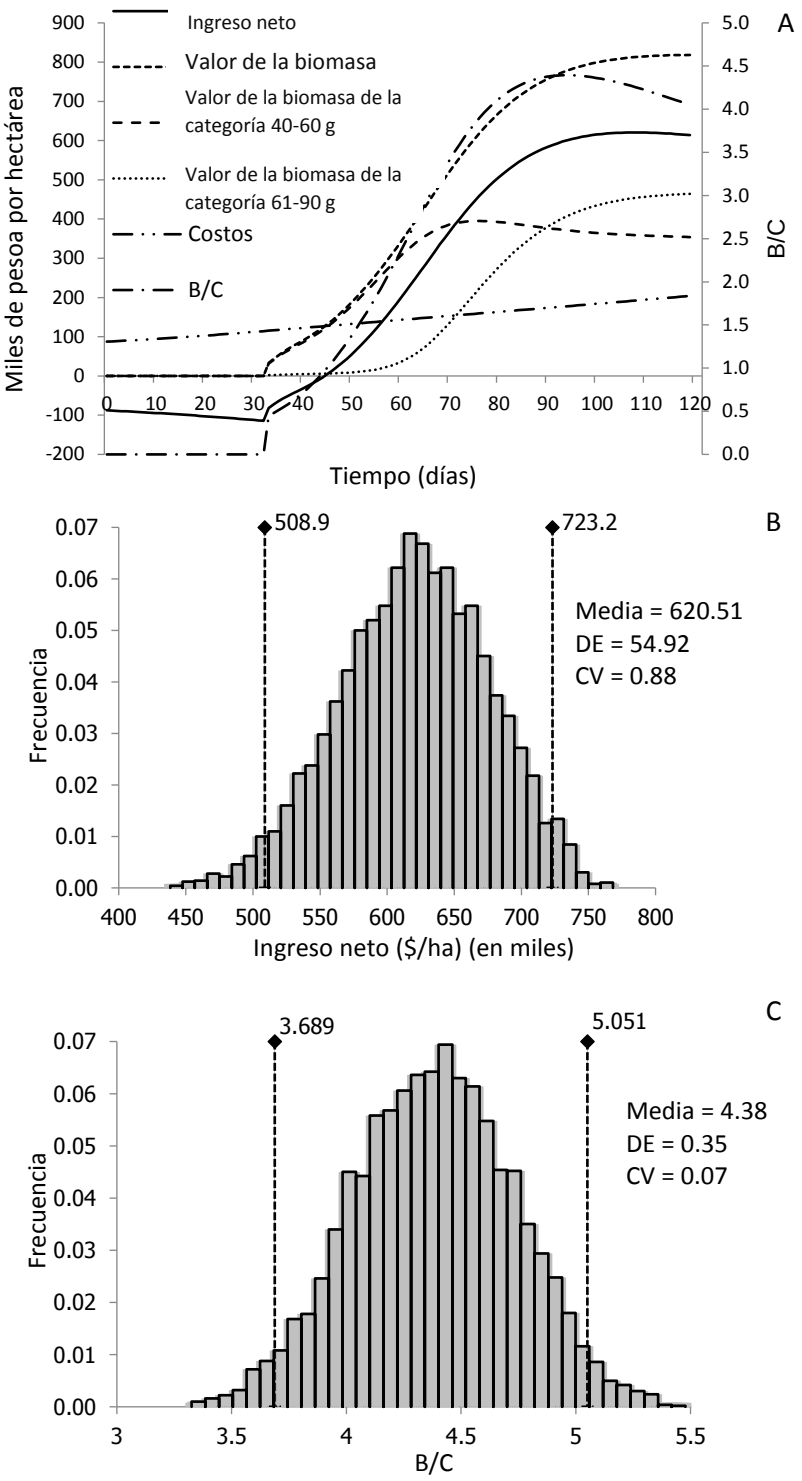

Figura 21. Resultados del análisis bioeconómico para machos de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo de cosecha bajo la estrategia de cosechar en forma independiente los sexos. A = Resultados; B = Ingreso Neto; C = Relación B/C. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza del 95%.

La estrategia de cosechar a las hembras independientemente de los machos, mostró que el máximo ingreso neto se obtiene a los 120 días del cultivo, mientras que la máxima relación beneficio/costo, se obtiene a los 106 días del cultivo (Fig. 22A). Al tiempo óptimo de cosecha, las hembras pueden generar, con 95 % de confianza, un ingreso neto entre $395 700 y $590 600/ha, con una media de $488 337/ha (Fig. 22B), y una relación beneficio/costo entre 3.04 y 4.14, con un promedio de 3.56 (Fig. 22C). Los valores del coeficiente de variación indicaron que al tiempo óptimo de cosecha (120 días), se tiene también la menor incertidumbre de obtener, tanto los ingresos netos, como la relación beneficio/costo esperados.

Combinando los resultados de las cosechas independientes de machos y hembras, se obtuvo que, con 95 % de confianza, el ingreso neto varía entre $1 018 800 y $1 217 500/ha, con una media de $1 114 211/ha (Fig. 23A), y la relación beneficio/costo entre 3.5 y 4.4, promediando 3.97 (Fig. 23B; tabla X). El promedio de los ingresos netos y de la relación beneficio/costo obtenida con esta estrategia son, respectivamente, $63 318.35/ha y 0.27 más altos que los valores de los indicadores obtenidos con la estrategia de cosecha simultánea de ambos sexos. Lo anterior significa un costo de oportunidad de $5 325/ha/día y, por peso invertido, de $0.012/día (machos) y $0.005/día (hembras). La cosecha independiente de los sexos también permite una importante reducción de la incertidumbre en los resultados económicos esperados, como lo indican los valores del coeficiente de variación, al disminuir de 0.169 a 0.068 (ingreso neto) y de 0.12 a 0.06 (relación beneficio/costo).

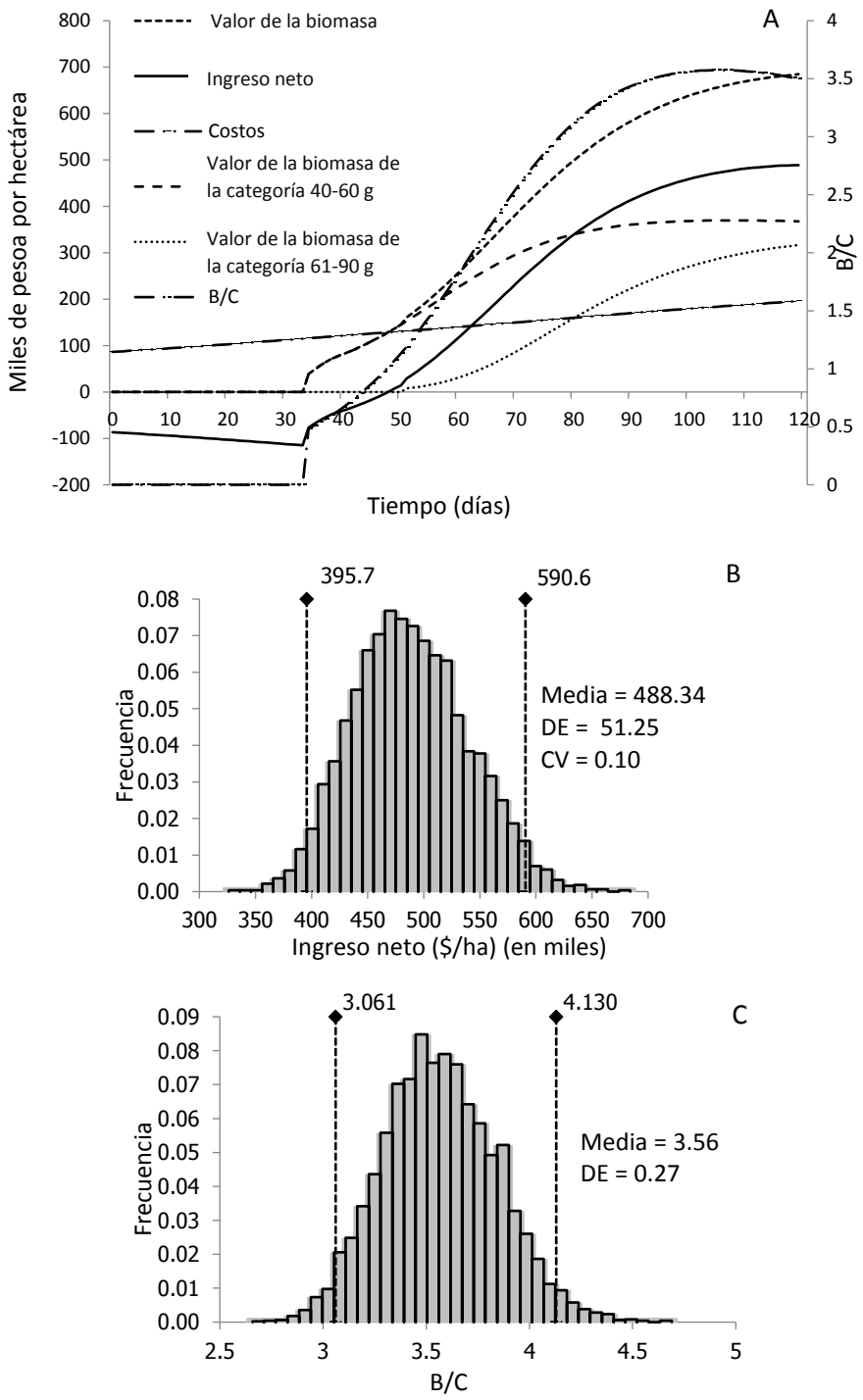

Figura 22. Resultado del análisis bioeconómico para las hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo de cosecha bajo la estrategia de cosechar en forma independiente los sexos. A = Resultados; B = Ingreso Neto; C = Relación B/C. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %.

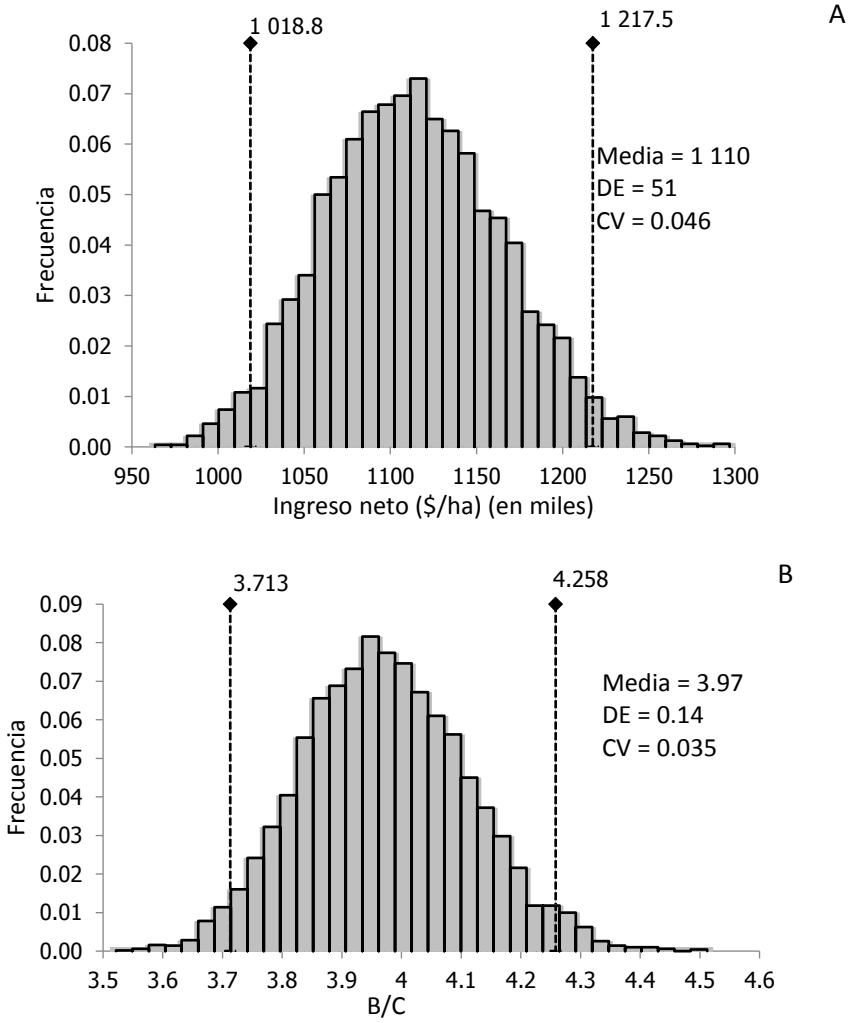

Figura 23. Ingresos netos (A) y relación beneficio/costo (B) para la estrategia de cosecha en forma independiente a machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), a sus respectivos tiempos óptimos de cosecha. Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %.

Los costos de operación, el valor de la biomasa y el ingreso neto para cosechas independientes al tiempo óptimo de hembras y machos de langosta de agua dulce se muestran en la tabla X. Los costos más relevantes son los pre-adultos, personal (nómina) y alimentación. El valor de la biomasa muestra el efecto de la mayor talla de los machos. Particularmente se observa que, mientras el valor de la biomasa de la categoría 40-60 g es similar entre los sexos, el monto que aporta la categoría 61-90 g de machos es superior a la

aportada por la misma categoría de hembras (aproximadamente 50 %), siendo este el factor principal que determina la diferencia en el desempeño económico entre ambos sexos.

Tabla X. Costos, valor de la biomasa e ingreso neto asociados a la estrategia de cosechas independientes de machos y hembras de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*), al tiempo óptimo. Los valores son en miles de pesos por hectárea.

Costos (en miles de pesos por hectárea)	Machos	%	Hembras	%	Total	%
Pre-adultos	81.00	41.88	81.00	41.33	162.01	41.60
Llenado de estanque	3.02	1.56	3.02	1.54	6.05	1.55
Fertilizante	0.11	0.06	0.11	0.06	0.22	0.06
Alimento	30.56	15.80	25.69	13.11	56.25	14.45
Costos de aireación	9.19	4.75	10.02	5.11	19.21	4.93
Costos de bombeo	11.48	5.94	12.53	6.39	24.01	6.17
Nómina	34.83	18.01	38.00	19.39	72.83	18.70
Otros costos	23.20	12.00	25.63	13.08	48.84	12.54
Costos totales	193.40	100.00	196.02	100.00	389.42	100.00
Valor de la biomasa						
Categoría 40-60g	357.75	43.96	367.08	53.64	725.40	48.40
Categoría 61-90g	456.15	56.04	317.23	46.36	773.38	51.60
Total	813.90	100.00	684.31	100.00	1 498.78	100.00
Ingreso neto	620.50		488.30		1 109.36	

La prueba t-Student empleada para el análisis estadístico de los valores de ingresos netos, permitió detectar que existe una diferencia significativa ($P < 0.05$) entre los valores medios de los ingresos netos que se obtienen con machos y hembras. A efecto de comprobar la hipótesis establecida para este trabajo, y considerando que, como se indicó, el porcentaje de supervivencia fue significativamente mayor en los machos que en las hembras ($P < 0.05$) y que el factor de conversión alimenticia no difirió significativamente (Tabla VII), se hizo un análisis complementario generando, mediante simulación, nuevos valores de ingresos netos para las hembras. Para dicha simulación, se asumió que las

hembras tendrían una supervivencia igual a la que se observó para los machos y se encontró que la prueba t-Student nuevamente indicó que, aun bajo esas condiciones, los ingresos netos de las hembras son significativamente inferiores a los de los machos. Con base en dichos resultados, puede afirmarse que la hipótesis de este trabajo es correcta, en tanto que el sólo hecho de que los machos tengan mejor crecimiento que las hembras permite explicar el por qué también tienen un mejor desempeño económico.

Para la simulación del desempeño económico de cuatro estanques, en lugar de un solo estanque para cada sexo, se emplearon las distribuciones de probabilidad de los ingresos netos de ambos sexos correspondientes a la estrategia de cosechas independientes. Los resultados de esta simulación mostraron que, mientras los valores medios del ingreso neto no se vieron afectados, la desviación estándar y el coeficiente de variación correspondiente, disminuyeron significativamente en ambos sexos (Fig. 24A y B), así como para la simulación de la agregación de ocho estanques, que corresponden al área de engorda de la granja (Fig. 24C). De acuerdo con dichos resultados, el uso de cuatro estanques, en vez de uno solo, permitió disminuir el coeficiente de variación y la incertidumbre de los ingresos netos esperados, de 0.09 a 0.04 (machos), de 0.11 a 0.05 (hembras) y de 0.068 a 0.03 (cuatro estanques de machos más cuatro estanques de las hembras).

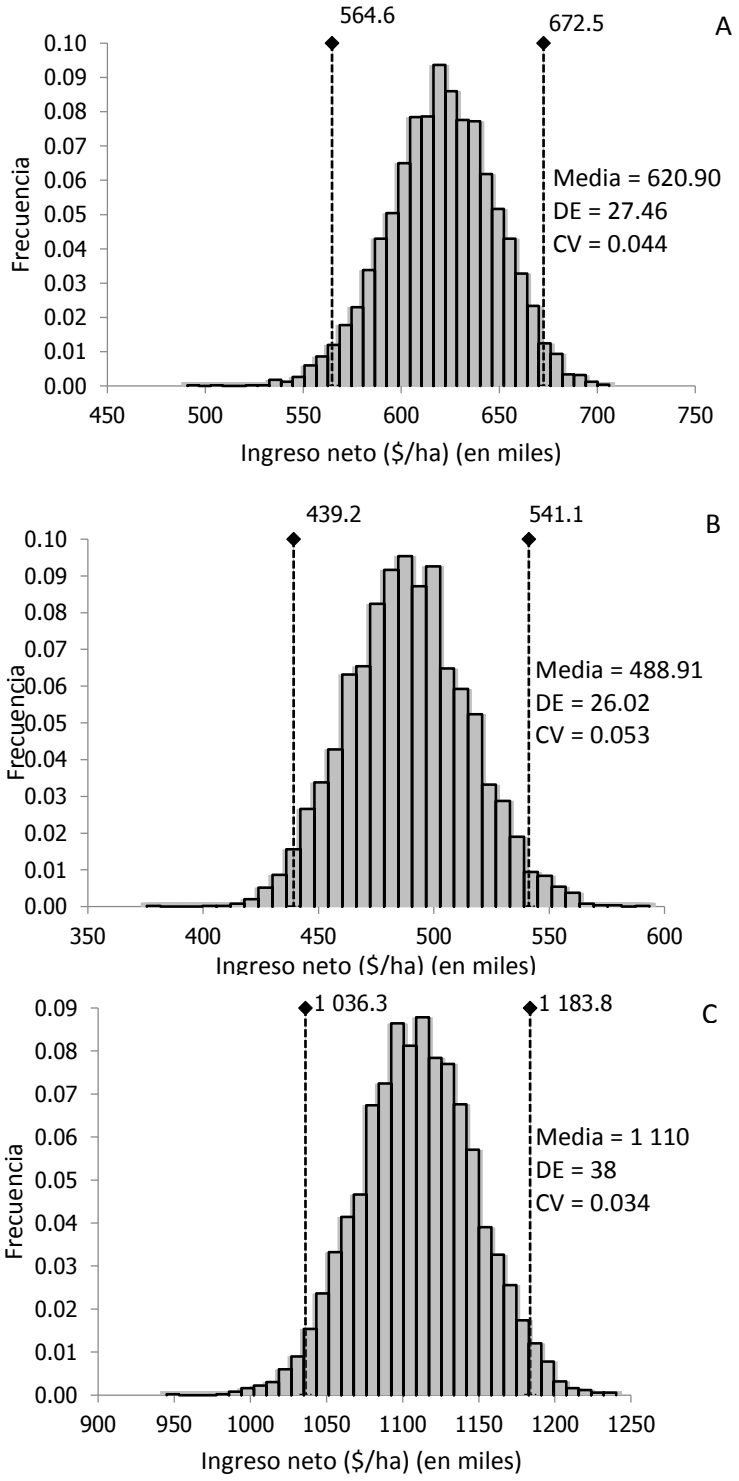

Figura 24. Resultados de la simulación de los ingresos netos promedio para langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) con 4 estanques de machos (A), 4 estanques de hembras (B) y 8 estanques agregados (C). Las líneas discontinuas indican intervalos de confianza de 95 %.

El análisis de sensibilidad indicó que las variables y parámetros de la ecuación 11, utilizados para calcular el porcentaje de machos y hembras incluidos en la categoría 40-60 g fueron los que más influyeron en la variabilidad estocástica de los ingresos netos (Tabla XI).

De acuerdo a ello, el impacto varió entre $12 559.9 y $63 947.9/ha por desviación estándar de la variable o parámetro. El porcentaje de la población comercial de machos y hembras calculado con la ecuación 3, también tuvo un importante impacto en los ingresos netos, variando entre $36 250.8 y $37 409.9/ha por desviación estándar de la variable o parámetro.

Los elementos usados para el cálculo del peso promedio individual de la langosta de agua dulce en las ecuaciones (9) y (14), tuvieron moderada o poca relevancia, con un impacto que varió entre $8 733 y $14 251.4$/ha por desviación estándar de la variable o parámetro.

Tabla XI. Resultados del análisis de sensibilidad de los ingresos netos a la variabilidad estocástica de variables y parámetros del modelo bioeconómico. Los valores absolutos de los cambios en los ingresos netos por cada desviación estándar (DE) de las variables o parámetros se presentan en orden decreciente de importancia.

Variable o parámetro	Cambio en las utilidades ($/ha/DE)
Coeficiente de regresión (a_2) de la ecuación 11 para calcular el porcentaje de la población de hembras incluidas en la categoría de 40-60 g	63 947.93
Coeficiente de regresión (a_1) de la ecuación 11 para calcular el porcentaje de la población de hembras incluidas en la categoría de 40-60 g	58 832.38
Coeficiente de regresión (a_1) de la ecuación 11 para calcular el porcentaje de la población de machos incluidos en la categoría de 40-60 g	44 790.35
Porcentaje de la población comercial de machos (p_1) de la ecuación 10	37 409.90
Porcentaje de la población comercial de hembras (p_1) de la ecuación 10	36 250.83
Porcentaje de la población de machos incluidos en la categoría 40-60 g (p_2) de la ecuación 11	31 367.80
Coeficiente de regresión (a_2) de la ecuación 11 para calcular el porcentaje de la población de machos incluidos en la categoría de 40-60 g	21 750.85
Porcentaje de población de hembras incluidas en la categoría 40-60 g (p_2) de la ecuación 11	19 271.18
Peso promedio individual de hembras de la ecuación 9	14 251.48
Coeficiente de regresión (a_0) de la ecuación 11 para calcular el porcentaje de la población de hembras incluidas en la categoría 40-60 g	12 559.90
Coeficiente de regresión (a_0) de la ecuación 15 para calcular el peso promedio de machos incluidos en la categoría 61-90 g	11 590.75
Peso final promedio de hembras (W) de la ecuación 9	9 402.18
Coeficiente de regresión (a_0) de la ecuación 15 para calcular el peso promedio de hembras incluidas en la categoría 61-90 g	9 235.33
Coeficiente de regresión (a_1) de la ecuación 15 para calcular el peso promedio de las hembras incluidas en la categoría 61-90 g	8 734.78
Peso final promedio de machos (w_f) de la ecuación 9	8 733.00

8. DISCUSIÓN

La evaluación de los datos del sistema productivo es esencial para determinar si el modelo bioeconómico está basado en parámetros ideales o subóptimos de cultivo. En el estudio, los datos de calidad de agua fueron aceptables y relativamente uniformes para todos los estanques de cultivo, particularmente la temperatura, el nivel de oxígeno disuelto y el pH. Se ha sugerido que estanques con recubrimiento de plástico mejoran la calidad de agua para el cultivo de langosta de agua dulce, ya que el flujo en el fondo mejora cuando se compara con estanques de tierra arcillosa y la suspensión de materia orgánica es más eficiente. Esto contribuye a la reducción de los niveles de desechos amoniacales (Moreno *et al.,* 2017). Por otro lado, el factor de conversión alimenticia se mantuvo cercano a 1 indicando que una cantidad significativa de la nutrición del organismo resulta de mantener niveles de productividad natural óptimos. Anderson *et al.* (1987), Martínez *et al.* (1998), y Tacon *et al.* (2002), han mostrado que dicha productividad representa entre 50 y 70% del alimento total consumido por los crustáceos durante el cultivo. Los resultados de FCA del presente estudio son similares a los de Pinto y Rouse (1996), que reportó valores de 1.3-1.4, y significativamente más bajos que los mostrados por Rodgers *et al.* (2006), que variaron entre 2 y 4.6, o los de Jones y Ruscoe (2000) que fueron de 4.1 a 7.4.

Por otro lado, en general se reconoce que el incremento en la densidad de cultivo tiene un impacto negativo sobre la sobrevivencia y tasa de crecimiento (Lutz y Wolters, 1986; McClain, 1995; Mills y McCloud, 1983; Morrissy *et al.,* 1995; Pinto y Rouse, 1996; Rodgers *et al.,* 2006). Las sobrevivencias obtenidas en el presente estudio son superiores a otros reportes para la especie (ver Curtis, 1990; Jones y Ruscoe, 2000; Pinto y Rouse, 1996; Rodgers *et al.,* 2006).

Calvo *et al.* (2013), Jones y Ruscoe (2000), y Parnes y Sagi (2002), mostraron que los escondrijos en el estanque juegan un papel relevante para limitar el impacto de interacciones entre los organismos y los efectos del canibalismo, que puede presentarse sin

escondrijos en el sistema de producción. Los escondrijos utilizados en el estudio contribuyeron a mejorar el sistema productivo.

En cuanto a los rendimientos, los resultados del presente estudio son significativamente más altos que lo reportado anteriormente para la especie. Webster *et al.* (2004) obtuvo rendimientos de 0.6 t/ha, sembrando juveniles de 8 gramos y una densidad de siembra de 2.4 organismos/m^2. Salame y Rouse (2000) reportaron rendimientos de 0.9 t/ha para poblaciones mezcladas (macho y hembra) y densidades de siembra de 4/m^2 con juveniles de 10 g. Karplus *et al.* (2001) registró biomasas de 2 ton/ha sembrando 20 organismos de 7 g por metro cuadrado, en un biocultivo con tilapia. En consecuencia, se puede establecer que las condiciones de producción del presente estudio fueron adecuadas y que los resultados de producción pueden ser utilizados para un análisis bioeconómico que establezca tiempos óptimos de cosecha en base a la utilidad neta o el índice beneficio/costo para machos y hembras de *C. quadricarinatus*.

El análisis bioeconómico permitió demostrar que la hipótesis establecida, en donde el cultivo de machos de langosta de agua dulce, por su tasa de crecimiento superior, produce un mejor desempeño económico que el cultivo de hembras, es correcta. Por otro lado, fue posible validar una estrategia óptima de operación, en donde la cosecha independiente por sexo al tiempo óptimo para el cultivo intensivo comercial de machos y hembras de *C. quadricarinatus* maximiza la utilidad neta y la relación beneficio/costo.

Como se mencionó en la introducción, existen pocos estudios relacionados con aspectos económicos del cultivo de la langosta de agua dulce y, debido a la diversidad de condiciones de operación de los cultivos, las variables económicas que se analizan y los distintos objetivos de las investigaciones, no resulta posible hacer una comparación sistemática con el presente trabajo. Ponce-Marban *et al.* (2006), utilizaron un modelo bioeconómico para el análisis del cultivo de langosta de agua dulce (*C. quadricarinatus*) cuando se cría en forma conjunta con tilapia, pero no evaluaron estrategias de cosecha para la especie. Medley *et al.* (1994), por su parte, utilizaron un enfoque estocástico para el

cálculo de los precios de la langosta de agua dulce en función de la talla de cosecha, pero no emplearon un enfoque bioeconómico para establecer una estrategia óptima para llevar a cabo las cosechas.

La estrategia óptima de cosecha evaluada en el presente trabajo indica que es más conveniente para el productor realizar cosechas independientes de ambos sexos, asociadas al tiempo óptimo de cosecha, y no realizar cosechas simultáneas de los mismos. La ventaja de la primera estrategia equivale a un incremento de 5.3% en ingresos netos y de 7.3 % en la relación beneficio/costo. Idealmente, en la medida en que la disponibilidad de pre-adultos de ambos sexos no resulte en una limitante, lo más conveniente es llevar a cabo programas de siembra-cosecha en estanques de cultivo monosexual (Villarreal y Peláez, 1999) para machos y hembras de la especie. Dado que la estrategia de cultivo establece que las siembras deben ser sincrónicas, ya que los pre-adultos se separan por sexo al alcanzar aproximadamente 20 gramos, se debe considerar que los machos alcanzarán la talla comercial deseada en menor tiempo que las hembras. Esto implica que los estanques destinados a los machos permanecen vacíos por periodos un poco más prolongados que los utilizados para las hembras. A pesar de ello, y como lo demuestran los resultados de la presente investigación, en las condiciones actuales del desarrollo tecnológico del cultivo, dicha diferencia en los tiempos de desocupación no es significativa.

En este estudio se encontró que el maximizar los ingresos netos y la ganancia por peso invertido implica la decisión de cosechar en días diferentes, lo que impide que ambos indicadores pueden maximizarse cosechando el mismo día. La selección del día óptimo para cosechar depende, entonces, de las preferencias del productor por alguno de los indicadores. En general, considerando los resultados obtenidos para los ingresos netos, resulta recomendable realizar ensayos de cultivo de las hembras por periodos mayores a 120 días, con el propósito de incrementar las ganancias económicas.

Como se mencionó anteriormente, existen estudios que indican que los machos de *C. quadricarinatus* crecen más rápido que las hembras (Karplus *et al.*, 2001; Sagi *et al.* 2002;

Villarreal y Peláez, 1999). En esta investigación se obtuvieron resultados que confirman lo anterior. Los análisis estadísticos de los parámetros de la ecuación 9 y de los pesos promedio obtenidos después de 120 días de cultivo, indicaron un crecimiento significativamente mayor en los machos. Además, la sobrevivencia de los machos fue significativamente más alta después del periodo de cultivo. Las pruebas estadísticas con que se evaluaron los ingresos netos obtenidos en los tiempos óptimos de cosecha para ambos sexos, permitieron demostrar que dicha diferencia en crecimiento es la causa fundamental por la que el desempeño económico de los machos es claramente superior al de las hembras. La diferencia en los ingresos netos promedio entre los sexos asciende a $132 415/ha, mientras que en la relación beneficio/costo, la de los machos es superior en 0.8. La simulación complementaria mediante la cual se asumió una supervivencia de las hembras igual que la de los machos, escasamente alteró los resultados obtenidos en primera instancia. Todo lo anterior hace evidente que la hipótesis establecida para la presente investigación, en el sentido de que el mejor crecimiento de los machos debe reflejarse también en un mejor desempeño económico que el de las hembras, es correcta.

El menor crecimiento que se observó en las hembras produjo que el valor de la biomasa correspondiente a la categoría 40-60 g fuera sistemáticamente inferior al de categoría 61-90 g. En contraste, el mayor crecimiento de los machos permitió que, a partir de aproximadamente el día 90, el valor de la biomasa de esta última categoría fuera superior al de la primera. El mayor precio comercial de la categoría 61-90 g produce un efecto de amplificación en el valor de la biomasa y un mejor desempeño económico del cultivo de machos de langosta de agua dulce. Todo ello se vio reflejado en la diferencia en los valores de biomasa de las categorías comerciales entre machos y hembras calculados al tiempo óptimo de cosecha (Tabla XI). En general, el efecto de amplificación sobre el valor de la biomasa atribuible a los precios de las categorías comerciales provocó que la diferencia entre machos y hembras fuera más evidente, en términos económicos, que de producción.

Los valores del coeficiente de variación de los indicadores económicos indicaron, consistentemente, que la mayor certidumbre en obtener lo que predice el modelo bioeconómico se tiene a los 120 días de cultivo. Tomando esto en cuenta, la recomendación de cosechar hembras a los 120 días para maximizar los ingresos netos no genera un conflicto con la intención de, simultáneamente, disminuir la incertidumbre, porque ambos objetivos se logran cosechando a los 120 días. No obstante, las recomendaciones de cosechar a los 106 días para maximizar la relación beneficio/costo en las hembras, y a los 109 y 91 días para maximizar los indicadores económicos de los machos, generan el conflicto de decidir entre maximizar el beneficio económico o disminuir la incertidumbre. Para la resolución de ese tipo de situaciones es necesario recurrir a la teoría de decisiones con el fin de tomar en cuenta la actitud (adversa, neutral o proclive) hacia el riesgo del tomador de decisiones, y crear una función de utilidad personalizada para el mismo (Clemen y Reilly, 2014). El uso de la teoría de decisiones, sin embargo, rebasa el ámbito de la bioeconomía acuícola y los objetivos establecidos para este trabajo de investigación.

La simulación de la variabilidad de los valores promedio de los ingresos netos cuando se consideró la totalidad (8) de los estanques que la granja destina a la engorda, en vez de la variabilidad asociada a un solo estanque para cada sexo, produjo una drástica reducción (aproximadamente 50%) en la incertidumbre de obtener los beneficios económicos esperados. Ello obedece a que, si por cuestiones aleatorias se obtienen resultados pobres en algunos de los estanques, también por azar se pueden obtener buenos resultados en otros de ellos. Esto hace que se reduzca la incertidumbre cuando se le compara con el comportamiento aleatorio de un solo estanque. De acuerdo con el límite central de la estadística, es esperable que la varianza de la media disminuya conforme se incrementa el tamaño de la muestra (en este caso el número de estanques) (Vose, 2001).

De acuerdo con la base de datos proporcionada por la empresa, las producciones obtenidas a la conclusión de la etapa de engorda fueron 3.1 t/ha (machos) y 2.6 t/ha (hembras); sin embargo, el análisis bioeconómico indicó que, para maximizar los

indicadores económicos utilizando la estrategia de cosecha óptima, las producciones pueden limitarse a 3.0 t/ha (machos) y 2.6 t/ha (hembras) cuando se desea maximizar el ingreso neto, y a 2.8 t/ha (machos) y 2.5 t/ha (hembras) si se pretende maximizar la relación beneficio/costo. Estos resultados ejemplifican que las soluciones ofrecidas por un manejo encaminado a maximizar la producción de un recurso acuícola, no necesariamente coinciden ni son mejores que las aportadas por el enfoque interdisciplinario e integral de la bioeconomía acuícola.

Las predicciones de rendimientos de producción que se realizan con el modelo bioeconómico son adecuadas tomando en cuenta que, para los machos, se calcula un rendimiento final promedio de 3.1 t/ha y que, con 95 % de confianza, se pueden obtener entre 2.9 y 3.3 t/ha, mismos valores que coinciden con la media, la mínima y la máxima producción registrada en la base de datos. La variabilidad de la producción observada en la base de datos corresponde a tan solo tres estanques y cabe esperar que, si el número de estanques hubiera sido mayor, lo más probable es que la diferencia entre el valor mínimo y el máximo de la producción obtenida hubiera sido también mayor. El análisis de la variabilidad estocástica de los parámetros de producción permitió estimar que los valores mínimos y máximos se amplían hasta 2.8 y 3.4 t/ha. En el caso de las hembras, el rendimiento final promedio de 2.6 t/ha coincide con el de la base de datos, aunque el intervalo de 95 % de confianza es un poco más amplio (2.5-2.7 t/ha) que los valores mínimo (2.6 t/ha) y máximo (2.7 t/ha) observados en la base de datos estimándose que, por azar, pudieran llegar a ser hasta 2.4 y 2.8 t/ha, en caso de que el número de estanques fuera mayor que tres.

En los registros de la granja se observó que la totalidad de la población de machos alcanzó tallas comerciales después de los 120 días de cultivo. No obstante, el modelo estimó que aproximadamente 2.5% de la población de machos pudiera, por razones aleatorias, no alcanzar tallas comerciales. En el caso de las hembras, el modelo estimó que hasta 8.5% de

la población total podía no alcanzar tallas comerciales, prácticamente coincidiendo con el 9.0% registrado en la base de datos al momento de la cosecha.

Para la presente tesis se hizo una revisión de las condiciones de cultivo y producciones de *C. quadricarinatus* referidas por Jones y Ruscoe (2000), Salame y Rouse (2000), Jones y Ruscoe (2001), Thompson *et al*. (2004), Webster *et al*. (2004), Thompson *et al*. (2005), Rodgers *et al*. (2006), Thompson *et al*. (2006), Metts *et al*. (2007), Saoudi *et al*. (2013) y Kobayashi *et al*. (2015). Tomando en cuenta la diversidad de condiciones de cultivo y de manejo del mismo, no resulta posible hacer una comparación directa de los rendimientos obtenidos por dichos autores con los presentados en este estudio.

Como se mencionó, el trabajo de Salame y Rouse (2000) es el único realizado en estanques comerciales (0.3 ha) aunque, a diferencia de lo considerado para esta investigación, no se empleó revestimiento plástico, los sexos se cultivaron mezclados, lo que se tradujo en una producción de 0.89 t/ha. Webster *et al.* (2004), por otra parte, usaron estanques pequeños (0.02 ha) con aireación y sin revestimiento, y los sexos se mezclaron. La producción reportada fue entre 0.29 y 0.61 t/ha.

Jones y Ruscoe (2000) lograron rendimientos similares a los de este estudio utilizando cercos experimentales (4m x 4m x 1.8 de profundidad) dentro de un estanque de 0.02/ha, sin aireación ni recubrimientos. Los investigadores utilizaron una talla de siembra de 16.9 g y densidades de 3, 9, y 15 juveniles/m^2, lo que se tradujo, después de 140 días, en rendimientos extrapolados de 1.59, 3.46, y 5.52 t/ha. Con fines comparativos, en este trabajo se ajustó una curva a los datos antes mencionados y, por interpolación, se estimó que para una densidad como la empleada en esta investigación (6 organismos/m^2), los investigadores pudieron haber obtenido 2.5 t/ha, producción similar a la aquí obtenida con las hembras (2.6 t /ha) pero inferior a la obtenida con los machos (3.1 t/ha).

La biomasa al inicio del cultivo analizado en este trabajo (1.28 t/ha) es la más alta reportada para *C. quadricarinatus* en estanques que emplean aireación artificial. Jones y Ruscoe (2000) pudieron manejar biomasas iniciales entre 1.52 y 2.53 t/ha en un estanque

sin aireación, aunque debe aclararse que, para su ensayo, utilizaron cercos experimentales que escasamente ocuparon la quinta parte de área total del estanque. Bajo esas condiciones, resulta posible mantener biomasas tan altas porque la capacidad de carga total es aproximadamente cinco veces superior a la correspondiente a la del área ocupada por los cercos. A semejanza de otras especies, como el camarón, la crianza intensiva de la langosta de agua dulce incluye la aireación artificial, como elemento fundamental, con el fin de aprovechar la capacidad de carga del sistema (Hernández-Llamas y Villarreal-Colmenares, 1999).

En contraste con los indicadores económicos, cuyos valores mínimos del coeficiente de variación se presentaron a los 120 días, en el caso de la categoría 40-60 g la mayor certidumbre en la producción se presenta a los 69 días (machos) y a los 84 días (hembras), en tanto que para la biomasa total ocurre a los 92 días (machos) y a los 94 días (hembras). La principal causa del aumento de la incertidumbre durante la segunda mitad del periodo de engorda se debe, como puede apreciarse en la Figura 11, al incremento que se presenta en la variabilidad del porcentaje de la población correspondiente a la categoría 40-60 g, conforme avanza el cultivo.

Lo anterior, es indicativo de que la dinámica de producción de biomasa comercial de la langosta varía ampliamente de un estanque a otro, provocando que el intervalo de confianza para la predicción de la producción correspondiente a las categorías comerciales se incremente conforme transcurre el tiempo. En última instancia, esto se refleja en que, a pesar de que el valor promedio de la biomasa se incrementa al avanzar el cultivo, no lo hace a una tasa suficiente para compensar el incremento en la variabilidad (la desviación estándar) de la producción de las categorías comerciales. No obstante, lo anterior no se refleja en un aumento en la incertidumbre de los indicadores económicos. Ello es consecuencia de que, el progresivo reclutamiento a la categoría 61-90 g y el efecto amplificador de los precios en el valor de la biomasa mencionado con anterioridad, provocan que la tasa con que se incrementan los indicadores sea superior a la tasa de aumento de su variabilidad, teniéndose, en consecuencia, que la mayor certidumbre de los

indicadores se presenta al final del cultivo. Esta situación también ejemplifica la diferencia que puede haber entre los resultados obtenidos cuando sólo se analizan los aspectos productivos, y los que se obtienen cuando se lleva a cabo un análisis más integral mediante un modelo bioeconómico.

Los resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad confirman la relevancia de variables y parámetros de las ecuaciones usadas para el cálculo del reclutamiento de las poblaciones comerciales de la langosta, y señalan que la alta variabilidad de dicho proceso constituye la principal fuente de incertidumbre para la obtención de los ingresos netos. Tomando en cuenta lo anterior, resulta recomendable que se incremente el tamaño de la muestra que se emplea para medir el crecimiento de la langosta, así como para estimar los porcentajes de la población pertenecientes a las categorías comerciales, particularmente después de los ochenta días de cultivo, cuando es más probable que ocurra el tiempo óptimo de cosecha. De ser necesario, la estrategia óptima de cosecha que se ha definido en este trabajo deberá modificarse para tomar en cuenta resultados futuros basados en mediciones más precisas del proceso de reclutamiento, así como en posibles modificaciones en las prácticas de cultivo.

Los resultados del análisis de sensibilidad también indican que las hembras tienen un impacto ligeramente mayor que los machos en la variabilidad de los ingresos netos y que la tasa de mortalidad (z) tiene un impacto muy limitado sobre los ingresos netos. Esto último es atribuible a la alta estabilidad de la supervivencia que se obtuvo en los ensayos de engorda. Por otra parte, ninguno de las variables y parámetros del sub-modelo económico resultaron tan importantes para la rentabilidad del cultivo como los correspondientes al sub-modelo biológico. Es necesario destacar que, como se indicó previamente, para este trabajo los precios de la langosta se mantuvieron constantes y resulta recomendable llevar a cabo estudios que permitan tener información más completa sobre los precios del producto en los mercados local y regional.

Por su cuantía, el costo de producción de pre-adultos es el más importantes de los costos de operación analizados (41.6 %). No obstante, el análisis de sensibilidad reveló que

su impacto en la variabilidad de los ingresos netos fue insignificante, lo que indica alta estabilidad y confiabilidad de la tecnología desarrollada para la etapa de pre-cría que permite, en forma consistente, abastecer el principal insumo para la engorda.

Un elemento fundamental para garantizar un abasto confinable del pre-adulto se relaciona con la necesidad de que la dispersión de tallas no sea muy significativa. El potencial del cultivo de *C. quadricarinatus* ha sido considerado impráctico por la dispersión de tallas. Como se aprecia en los trabajos de engorda mixta, existe una amplia heterogeneidad de tallas. Es importante entender que el manejo de poblaciones mixtas es complejo, debido a las interacciones que se presentan una vez que machos y hembras alcanzan la madurez sexual. Las hembras desarrollan la gónada, dirigiendo una cantidad significativa de energía con ese propósito (Rodríguez *et al.,* 2006) y su velocidad de crecimiento disminuye (Manor *et al.,* 2002). Una hembra cargando una masa ovígera retardará la ecdiscis y, consecuentemente, reducirá su tasa de crecimiento. El rendimiento de langostas de agua dulce que alcanzan la talla comercial es altamente variable en cada cosecha (Jones and Ruscoe, 2000; Rodgers *et al.,* 2005).

Por otro lado, cuando la estrategia de producción considera una etapa de precría (Villarreal y Peláez 1999), es posible tomar ventaja de una tasa de crecimiento similar de machos y hembras de la especie. Los resultados del presente estudio así lo confirman, ya que se obtuvieron pesos promedio de 20.9 g, sobrevivencia de 84%, con factores de conversión de 1.1 para obtener una biomasa promedio de 2.6 ton/ha. Estos valores son similares a los reportados por Naranjo *et al.* (2004), quienes demostraron que juveniles, machos y hembras, con peso promedio de 1.3 g crecen a tasas similares en cultivo mixto hasta alcanzar 25-30 g en 90 días de cultivo. Curtis y Jones (1995) plantearon la posibilidad de que, en ausencia de machos, es factible que las hembras de langosta de agua dulce alcancen la talla comercial. El presente estudio confirma dicha aseveración.

Desde el punto de vista productivo, el uso de un sistema con estanques de precría es altamente relevante ya que utiliza eficientemente la capacidad de carga del estanque a más altas densidades, tiene un factor de conversión alimenticia bajo, lo que permite

establecer un flujo continuo de organismos para el cultivo monosexual de machos y hembras, a un costo apropiado. Los resultados mostraron que el precio del pre-adulto no fue un elemento significativo en el análisis de riesgo de los cultivos monosexuales de machos y hembras. Esta estrategia reduce la dispersión en comparación con la que se presenta con otras estrategias que utilizan siembras de juveniles en el intervalo de 8-15 g.

El enfoque bioeconómico usado en el presente trabajo puede ser empleado para el análisis del cultivo de otras especies acuáticas, con las necesarias modificaciones para adaptarlo a cada caso. Por lo que se refiere al sub-modelo biológico, puede destacarse que la curva de crecimiento correspondiente a la ecuación (1) fue propuesta por Ruíz-Velazco *et al*. (2010) y constituye una simplificación al modelo de crecimiento desarrollado por Hernández-Llamas y Ratkowsky (2004), mismo que se ha demostrado que es adecuado para el modelado del crecimiento de peces, crustáceos y moluscos en condiciones de cautiverio y silvestres. La ecuación exponencial (2) permite el cálculo de organismos sobrevivientes y es la suposición más simple que puede hacerse cuando sólo se dispone de estimaciones de la supervivencia final. En caso de que se cuente con estimación de la supervivencia para diferentes tiempos del cultivo, se debe verificar el supuesto, implícito en el modelo, de una tasa instantánea de mortalidad constante. Por otra parte, como se ha observado en procesos de reclutamiento poblacional, es muy probable que el reclutamiento de poblaciones cultivadas a categorías comerciales pueda modelarse empleado curvas sigmoideas, como la curva logística empleado en este trabajo, mientras que una función polinómica casi siempre puede usarse para predecir, en función de la talla promedio o del tiempo, la disminución de la fracción de la población perteneciente a la categoría comercial más baja. Debe señalarse, no obstante, que el modelado de más de dos categorías comerciales puede suponer un incremento en la complejidad del sub-modelo.

En lo relativo al sub-modelo para el cálculo del factor de conversión alimenticia, su adaptación al cultivo de otras especies puede requerir del uso de distintos modelos cuyos parámetros, deseablemente, debieran tener interpretación biológica o relativa al manejo del cultivo, o en su defecto, se puede recurrir al uso de polinomios en los que, como se sabe,

únicamente el término independiente tiene un significado práctico. Por lo que se refiere al sub-modelo económico, cabe destacar que, por la sencillez de su estructura, es el más fácil de adaptar, ya que sólo se requiere de la consideración de los costos específicos del cultivo, mientras que los ingresos resultan de simplemente multiplicar la biomasa que se calcula con el sub-modelo biológico por su precio comercial.

Independientemente de la especie que se cultive, la incorporación de elementos estocásticos en el modelo bioeconómico no debe suponer mayores dificultades, una vez que se disponga de software adecuado para simulación Monte Carlo y de información para incorporar variabilidad aleatoria en las variables dependientes y parámetros de los sub-modelos, después de corroborar la significación estadística de los ajustes por regresión de las ecuaciones y la normalidad de los errores residuales correspondientes.

9. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el presente trabajo de investigación permiten concluir que la hipótesis establecida para el mismo es correcta. Es decir, se recabó evidencia de que el crecimiento de los machos de la langosta de agua dulce *C. quadricarinatus* es más rápido que el de las hembras y que, ese sólo hecho, permite explicar la diferencia en el desempeño económico que se observa entra ambos sexos.

Por otra parte, también se concluye que el objetivo general y los particulares de este trabajo se han alcanzado en forma satisfactoria, en tanto que la construcción de un modelo estocástico permitió cumplir el objetivo general de realizar un análisis bioeconómico del cultivo intensivo de la especie, y que los objetivos particulares se cumplieron considerando que:

1) Se evaluaron tres modelos de crecimiento con el fin de evaluar su desempeño estadístico como elementos de un modelo bioeconómico.

2) Mediante la evaluación de estrategias alternativas de cosecha, se proyectaron indicadores económicos para diferentes escenarios de operación del cultivo.
3) Mediante la definición de tiempos óptimos de cosecha, se identificaron esquemas de manejo bioeconómico óptimo.
4) Al cuantificar la incertidumbre de los resultados esperados, e identificar los factores de riesgo principales a través de un análisis de sensibilidad, se evaluó el riesgo económico implicado en la operaciones del cultivo.

En términos generales, se concluye que el modelado bioeconómico es una herramienta útil para el manejo acuícola, ya que ofrece un marco de referencia objetivo para la evaluación del desempeño de las prácticas de cultivo e identificar acciones futuras para su mejora. El modelo desarrollado en este trabajo se puede adaptar para evaluar, desde una perspectiva bioeconómica, las condiciones de operación de otros acuicultivos, enfatizando la dinámica de producción de las poblaciones comerciales con el fin de definir estrategias óptimas de cosecha.

10. LITERATURA CITADA

Allen, P.G., L. Abbotsford, A. Schuur, W. Johnston. 1984. Bioeconomics of aquaculture, developments in aquaculture and fisheries science. Elsevier. New York. 351p.

Anderson, R.K., P.L. Parker, A.L. Lawrence. 1987. A 13C/14C Tracer study of the utilization of present feed by a commercial important shrimp (*Penaeus vannamei)* in a pond growout system. J. World Aquacult. Soc. 18:149–155.

Araneda, M. E., J. M. Hernández, E. Gasca-Leyva, M. A. Vela. 2013. Growth modelling including size heterogeneity: Application to the intensive culture of white shrimp (*P. vannamei*) in freshwater. Aquac. Eng. 56:1-12.

Ayyub, B.M. 2014. Risk analysis in Engineering and Economics. CRC Press. Boca Raton, FL. 640p.

Carreño-León, D., I. Racotta-Dimitrov, R. Casillas-Hernández, A. Monge-Quevedo, L. Ocampo-Victoria, L., J., Naranjo-Paramo J., H., Villarreal colmenares. 2014. Growth, Metabolic and Physiological Response of Juvenile *Cherax quadricarinatus* Fed Different Available Nutritional Substrates. J. Aquac. Res. Development. 220:1-7.

Calvo, N.S., A.L. Tomas, L.S. López-Greco. 2013. Influencia de la disposición espacial y la superficie de refugios sobre la supervivencia y crecimiento de juveniles de *Cherax quadricarinatus* (*Parastacidae*) y su aplicación al cultivo intensivo. Lat. Am. J. Aquat. Res. 41:732–738.

Clemen, R., T. Reilly. 2014. Making Hard Decisions with Decision Tools: An Introduction to Decision Analysis. Southwestern, Cengage Learning, Mason, OH. 807p.

Chumporn, S.G.T.N., N. P. Long, P. Mongkhol, N. Naruemon. 2015. Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) is susceptible to yellow head virus (YHV) infection and can transmit it to the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). Aquaculture. 445:63–69.

Coronado Castro, E., L. Silva Ledezma, E. Gasca Leyva.2010. Economic analysis of polyculture tilapia and Australian redclaw crayfish. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, México. IIFET. Montpellier Proceedings. 1-10.

Cortés, E., H. Villarreal Comenares, R. Civera. 2002. Production of juvenile redclaw in Mexico: effect of different protein levels. Glob. Aquac. Advoc.5(2):22-23

Cortés, E., H. Villarreal Colmenares, R. Civera Cerecedo, J. Naranjo-Paramo. 2004. Effect of dietary protein level on the growth and survival of pre-adult freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens) in monosex culture. Aquac. Res.35:71–79.

Curtis, M.C., 1990. Aquaculture special: red claw. Australian Fisheries 49, 18–20.

Curtis, M. C., C. M. Jones. 1995. Observations on monosex culture of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* von Martens (*Decapoda: Parastacidae*) in earthen ponds. J. World Aquac. Soc. 26:154–159.

Crandall, K.A., J. W. Fetzner**.,** S.H. Lawler, M. Kinnersley, C.M. Austin. 1999. Phylogenetic relationships among the Australian and New Zealand genera of freshwater crayfish (*Decapoda: Parastacidae*). Austral. J. of Zool. 47:199-214.

Domínguez May R., J.M. Hernández, E. Gasca-Leyva, G.R. Poot-López. 2011. Effect of ration and size heterogeneity on harvest time: Tilapia Culture in Yucatán, México. Aquac. Econ. And Manag.15.(4):278-301.

FAO. 2016. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y nutrición para todos. Roma. 244p.

Garza de Yta, A. 2009. Hatchery, nursery, nutrition and stock evaluation of Redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus.* Dissertation (Doctor of Philosophy). Auburn, Alabama. Auburn University. 1-129.

Harrison R.W., T. Stringer, W. Prinyawiwatkul. 2002. An analysis of consumer preferences for value-added seafood products derived from crawfish. Agric. and Res. Econ. Rev. 31(2): 157-170.

Hernández Llamas A., D.A. Ratkowsky. 2004. Growth of fishes, crustaceans and molluscs: estimation of the Von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Richards curves and a new growth model. Mar. Ecol. Progres. Ser. 282:237–244.

Hernández Llamas A., H. Villareal Colmenares. 1999. A software reference to shrimp *Litopenaeus vannamei* farming practices. Aquac. Econ. And Manag. 3(3):267-280.

Hobbs, H. H., Jr. 1988. Crayfish distribution, adaptive radiation and evolution. D. M. Holdich and R. S. Lowery, eds. *Freshwater crayfish: biology, management and exploitation*. Timber Press, Portland, OR. 52–82

Huner, J. V. 1994. Freshwater Crawfish Cultural Methods: An Overview. World Aquac. 25. (3):38-40.

Hutchings, R.W., H. Villarreal. 1996. Biología y cultivo de la langosta de agua dulce (redclaw) *Cherax quadricarinatus*. Manual de producción, Navimar, S.A., Guayaquil, Ecuador. 300 p.

Instituto Sinaloense de Acuicultura y Pesca (ISAPESCA). 2017. Rendimiento productivo y económico en granjas semi-intensivas de camarón blanco en el estado de Sinaloa. Boletín informativo. 5: 1-5.

Jones, C.M., I.M. Ruscoe. 1996. Production Technology for Redclaw Crayfish *(Cherax quadricarinatus*). Final Report.155p.

Jones, C.M., I.M. Ruscoe. 2000. Assessment of stocking size and density in the production of redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (van Martens) (*Decapoda: Parastacidae*), cultured under earthen pond conditions. Aquac. 189:63-71.

Jones, C.M., I. M. Ruscoe. 2001. Assessment of five shelter types in the production of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (*Decaoda: Parastacidae)* under earthen pond conditions. J. World Aquac. Soc. 32(1):41-51.

Karplus, I., S. Harpaz, G. Hulata, R. Segev, A. Barki. 2001. Culture of the Australian red-claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Israel VI. Crayfish incorporation into intensive tilapia production units. The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh 53(1), 23–33.

Kennedy, P. L., Y.J. Lee. 2008. Determining the impact of crawfish imports on U.S. domestic prices. Aquac. Econ. Manag. 12:176–187.

Kobayashi, C.D. Webster, K. R. Thompson, V. C. Cummins Jr., A. L. Gannam, R. G Twibell, N. M. Hyde, J. F. Albers Koch. 2015. Effects on growth, survival, body composition, processing traits and water quality when feeding a diet without vitamin and mineral supplements to Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) grown in ponds. Aquac. Res. 46:2716-2727.

Llorente, I., L. Luna. 2016. Bioeconomic modelling in aquaculture: an overview of the literature. Aquac. Intern. 24:931–948.

Lutz, C.G., W.R. Wolters. 1986. The effect of five stocking densities on growth and yield of red swamp crawfish Procambarus clarkii. J. World Aquac. Soc. 17:33–36.

Manor, R., R. Segev, M. L. Pimienta, E.D. Aflalo, A. Sagi. 2002. Intensification of redclaw crayfish Cherax quadricarinatus culture II. Growout in a separate cell system. Aquac. Engin. 26:263-276.

Martínez Cordova, L., M. Porchas Cornejo, H. Villarreal Colmenares, J. Calderón Pérez, J. Naranjo Páramo. 1998. Evaluation of three feeding strategies on the culture of white shrimp Penaeus vannamei Boone, 1931 in low water exchange ponds. Aquacult. Eng. 17:21–28.

Masser, M., D. Rouse. 1990. Australian Craysh. Agricultural & Natural Resources Information. Nat. Res. Ser. 4p.

McClain, W.R. 1995. Investigations of crayfish density and supplemental feeding as factors influencing growth and production of Procambarus clarkii. Fresh. Crayfish 10:512–520.

Medley, P.B. 1994. Production capabilities and economic potential of and Australian redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) hatchery in the United States. Dissertation (Doctor of Philosophy). Louisiana, U.S.The Louisiana State University. 72 p.

Medley, P. B., C. M. Jones, J.W. Avault. 1994. A global perspective of the culture of Australian redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus*: production, economics and marketing. World aquac. 25(4):6-13.

Medley, P.B., R.G. Nelson, L.U. Hatch, D.V. Rouse, G.F. Pinto. 1994. Economic feasibility and risk analysis of Australian Red Claw Crayfish (*Cherax quadricarinatus)* aquaculture in the southeastern United States. J. World Aquac. Soc. 25:135–146.

Metts, L. S., K. R. Thompson, Y. Xiong, B. Kong, C. D. Webster, Y. Brady. 2007. Use of Alfafa Hay, compared to feeding practical diets containing two protein levels, on growth, survival, body composition, and processing traits of australian red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*, grown in ponds. J. World Aquac. Soc. 38(2):218-230.

Mills, B. J., P. I. McCloud. 1983. Effects of stocking and feeding rates on experimental pond production of the crayfish Cherax destructor Clark (*Decapoda: Parastacidae*). Aquaculture 34: 51–72.

Morrissy, N.M., C. Bird, G. Cassells. 1995. Density-dependent growth of cultured marron, *Cherax tenuimanus*,Smith 1912. Fresh. Crayfish 10:560–568.

Mun, J. 2006. Modeling risk: applying Monte Carlo Simulation, real option analysis, forecasting and optimization techniques. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ. 976p.

Naranjo-Páramo, J., A. Hernández Llamas, H. Villarreal Colmenares, 2004. Effect of stocking density on growth, survival and yield of juvenile redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus Decapoda: Parastacidae*) in gravel-lined commercial nursery ponds. Aquacult. 242:197–206.

Parnes, S., A. Sagi. 2002. Intensification of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* culture. I. Hatchery and nursery system. Aquac. Eng. 26:251-262.

Pinto, G.F., , D.B. Rouse. 1996. Growth and survival of the Australian red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus,* at three densities in earthen ponds. J. World Aquacult. Soc. 27:197–192.

Ponce Marbán, D., J. M. Hernández b, E. Gasca-Leyva. 2006. A Simulating the economic viability of Nile tilapia and Australian redclaw crayfish polyculture in Yucatán, México. Aquac. 261:151–159.

Ponce, Palafox, J. T., J. L. Arredondo Figueroa, X. Romero. 1999. Análisis del cultivo comercial de la langosta de agua dulce (*Cherax quadricarinatus*): y su posible impacto en América Latina. Cont. 31:64-61

Pomeroy, R., B. E. Bravo Ureta, D. Solı´s, R. J. Johnston. 2008. Bioeconomic modelling and salmon aquaculture: an overview of the literature. Int. J. Env. Pol. 33:485–500

Rabobank International Food and Agribusiness. Rabobank Industry Note #341 (October 2012) Research and Advisory. www.rabobank.com.

Ratkowsky, D. 1983. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. Marcel Dekker Inc. New York. 288p.

Ratkowsky, D.A. 1990 Handbook of Nonlinear Regression Models. Marcel Dekker Inc. New York. 264p.

Robertson, C. 2008. Scoping Analysis. Redclaw Industry development. Qld Department of Primary Industry and Fisheries Northern Fisheries Division. 65p.

Rodgers, L.J., P.I. Saoud, D.B. Rouse. 2006. The effects of monosex culture and stocking density on survival, growth and yield of redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in earthen ponds. Aquaculture. 259:164-168.

Rodríguez-González, H., A. Hernández-Llamas, H. Villarreal, P.E. Saucedo, M. García Ulloa, Rodríguez-Jaramillo C., 2006. Gonadal development and biochemical composition of female crayfish, *Cherax quadricarinatus* (*Decapoda: Parastacidae*) in relation to the Gonadosomatic Index at first maturation. Aquac. 254:637–645

Ruíz Velazco, J.M., A. Hernández Llamas, V.M. Gómez Muñoz, F.J. Magallón. 2010. Dynamics of intensive production of shrimp Litopenaeus vannamei affected by white spot disease. Aquac. 300:113-119.

Salame, M.J., D.B. Rouse. 2000. Forage-Based feeding in commercial red claw ponds in Ecuador. J. Applied Aquac. 10.(3):83-90.

Saoud, I.P., J. Ghanawi, K. R. Thompson, C. D. Webster. 2013. A review of the culture and Diseases of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Von Martens 1868). Journal of the World Aquc. Soc. 44.(1):1-29.

Tacon, A.G.J., J.J. Cody, L.D. Conquest, S. Divakaran, I.P. Forster, O.E. Decamp. 2002. Effect of culture system on the nutrition and growth performance of pacific white shrimp Litopenaeus vannamei (Boone) fed different diets. Aquacult. Nutr. 8:121–137.

Thompson, K.R., L.A. Muzinic, L.S. Engler, S. Morton, C.D. Webster. 2004. Effects of feeding practical diets containing various protein levels on growth, survival, body composition, and processing traits of Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) and on pond water quality. Aquac. Res. 35:659-668.

Thompson, K.R., L.A. Muzinic, D.H. Yancey, C.D. Webster, D.B. Rouse, Y. Xiong. 2005. Growth, processing measurements, tail meat yield, and tail meat proximate composition of male and female Australian red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus,* stocked into earthen ponds. Journ. of App. Aquac. 16: 117–129.

Thompson, K.R., C.D. Webster, I.P. Saoud, J. Ghanawi. 2013. A Review of the Culture and Diseases of Redclaw Crayfish Cherax. J. W. Aquac. Soc. 44(1):10-12.

The Crayfish Company. (20 de Septiembre de 2017). The Crayfish Company. Obtenido de http://thecrayfishcompany.com/prices.html.

Thompson, K. R., L. A. Muzinic, D. H. Yancey, C. D. Webster, D. B Rouse, Y. Xiong. 2005. Growth, processing measurements, tail meat yield, and tail meat proximate composition of male and female Australian red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*, stocked into earthen ponds. Journal of Applied Aquaculture. 16:117–129.

Thompson, K. R., L. S. Metts, L. A. Muzinic, S. Dasgupta, C.D. Webster. 2006. Effects of feeding practical diets containing different protein levels, with or without fish meal, on growth, survival, body composition and processing traits of male and female Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) grown in ponds. Aquaculture Nutrition. 12:227-238.

Villarreal Colmenares H., J. Naranjo Paramo. 2008. Reporte de producción. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste y Acuacultivos Santo Domingo. La Paz, B.C.S. México.

Villarreal, H., J. Peláez. 1999. Biología y cultivo de langosta de agua dulce, *Cherax quadricarinatus*. Manual de Producción. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste y Acuacultivos Santo Domingo, La Paz, B.C.S. México.

Vose, D. 2001. Risk Analysis. A Quantitative Guide. John Wiley & Sons. 2nd ed. Chichester, West Sussex, UK. 752p.

Webster, C. D., K. R. Thompson, L. A. Muzinic, D.H. Yancey, S. Dasgupta, Y. L. Xiong, D.B. Rouse, L. Manomaitis. 2004. A preliminary assessment of growth, survival, yield, and economic return of Australian red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*, stocked at three densities in earthen ponds in a cool, temperate climate. J. of Applied Aquac. 15.(3-4): 37-50.

Williams, W.D. 1980. Australian freswater life: The invertebrates of Australian inland waters. Macmillan Education AU, Victoria. 321p.

Zar, J. H. 2010. Biostatistical Analysis. Prentice Hall. 5th ed. Upper Saddle River, New York. 944p.