

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT  
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



**MODELO BIOECONÓMICO PARA EL ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE EN  
LA PRODUCCIÓN SEMI-INTENSIVA DE *Litopenaeus vannamei* CON MANEJO DE  
PRE-COSECHAS**

**M. en C. MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ ROMERO**

Tesis presentada como requisito parcial para la obtención del grado de:  
Doctorado en Ciencias en el Área de Ciencias Pesqueras

Xalisco, Nayarit. Diciembre de 2017

*oficio de autorización del coordinador*

*firmas del comité de tesis*

## **DEDICATORIA**

Requirió un gran esfuerzo y sacrificio lograr el doctorado, pero no el mío, sino el de mi familia: mi esposa e hijos, papá, mamá, hermanos y hermanas.

A mi esposa Yessica Janeth, a mis hijos Ángel Saúl y Carlo Ismael, quienes nuevamente padecieron mi ausencia aun cuando estaba presente, pero me motivan a superarme.

A mamá y papá por sus sacrificios desde siempre y por su esfuerzo, sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A mis hermanos Fernando, por su ayuda y consejos, los cuales fueron de gran utilidad, y a Mónica, Yulisa y Ricardo, por su respaldo.

A mis suegros, quienes me alentaron.

A todos ustedes les dedico esta tesis y les doy las gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis, al Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velazco Arce y a mi codirector el Dr. Alfredo Hernández Llamas por darme la oportunidad de obtener un logro más en mi formación profesional, sin su apoyo, esto no hubiera sido posible, a ambos muchas gracias.

Así mismo, quiero extender mis agradecimiento al resto del comité tutorial de tesis, de quienes recibí importantes aportes: Dr. José Trinidad Nieto Navarro, Dr. Oscar Iram Zavala Leal y al Dr. Leonardo Martínez Cárdenas, así como a todos mis evaluadores en los distintos seminarios en los que participé.

A la Universidad Autónoma de Nayarit y al rector Jorge Ignacio Peña González, al Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias y al Dr. Juan Diego García Paredes, muchas gracias por formar alumnos e impulsar educación de calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida para cursar los estudios.

## ÍNDICE

Índice de cuadros.....	viii
Índice de figuras.....	x
RESUMEN.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	7
3.1. Objetivo general.....	7
3.1.1. Objetivos específicos.....	7
3.2. Hipótesis.....	8
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
4.1. Modelo bioeconómico.....	11
4.1.1. Sub-modelo biológico.....	11
4.1.2. Sub-modelo del factor de conversión alimenticia.....	13
4.1.3. Sub-modelo de manejo y calidad del agua.....	13
4.1.4. Evaluación de los sub-modelos biológico, del FCA y de manejo y calidad del agua	14
4.1.5. Elementos estocásticos de los sub-modelos biológico y del FCA.....	14
4.1.6. Niveles de manejo de la producción y simulación Monte Carlo.....	15
4.1.7. Sub-modelo económico.....	16
4.1.8. Elementos estocásticos del sub-modelo económico.....	18

4.1.9. Niveles de manejo de la utilidad y simulación Monte Carlo.....	19
4.1.10. Análisis de incertidumbre de la utilidad.....	19
4.1.11. Análisis de sensibilidad.....	20
V. RESULTADOS.....	21
5.1. Modelo bioeconómico	21
5.1.1. Sub-modelo biológico.....	21
5.1.2. Sub-modelo del factor de conversión alimenticia.....	21
5.1.3. Sub-modelo de manejo y calidad del agua.....	27
5.1.4. Evaluación de los sub-modelos biológico, del FCA y de manejo y calidad del agua	29
5.1.5. Elementos estocásticos de los sub-modelos biológico y del FCA.....	32
5.1.6. Niveles de manejo de la producción.....	33
5.1.7. Sub-modelo económico.....	40
5.1.8. Elementos estocásticos del sub-modelo económico.....	40
5.1.9. Niveles de manejo de la utilidad.....	41
5.1.10. Análisis de incertidumbre de la utilidad.....	41
5.1.11. Análisis de sensibilidad.....	45
VI. DISCUSIÓN.....	50
VII. CONCLUSIONES.....	58
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	59
<i>CURRICULUM VITAE</i> .....	65

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Valores mínimos (Mín) y máximos (Máx) de las variables registradas en la base de datos para casos con una (Esquema 1), dos (Esquema 2) y tres pre-cosechas (Esquema 3).....	10
Cuadro 2. Costos de insumos, precios de junio, 2016.....	18
Cuadro 3. Precios “base” de venta del camarón a pie de granja. Se presentan los precios promedio para todas las tallas.....	18
Cuadro 4. Mediana (*) y media ( $\pm$ SE) valores de manejo, producción, y variables de calidad del agua para los diferentes esquemas de producción. Los valores que tienen por lo menos un superíndice común no difieren significativamente.....	22
Cuadro 5. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo biológico en función de las variables de manejo y calidad del agua.....	28
Cuadro 6. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo del factor de conversión alimenticia en función de las variables de manejo y calidad del agua.....	29
Cuadro 7. Distribuciones normales ajustadas al error residual ( $\epsilon$ ) de los modelos de regresión múltiple para agregar el componente estocástico ( $\mu = 0$ ).....	32
Cuadro 8. Valores de las variables de manejo usadas para definir estrategias alternativas de manejo para los tres esquemas de producción.....	34
Cuadro 9. Cálculo de la biomasa y su variabilidad para los diferentes esquemas de	

producción y niveles de manejo.....	38
Cuadro 10. Distribuciones normales ajustadas al error residual ( $\epsilon$ ) de los modelos de regresión lineal simple del precio del alimento, de la postlarva y a los precios anuales del camarón ( $\mu = 0$ ).....	41
Cuadro 11. Indicadores del desempeño económico y su variabilidad.....	43
Cuadro 12. Coeficientes de variación (CV) de la utilidad de una granja con uno y con múltiples estanques para los tres esquemas de producción a los diferentes niveles de manejo (N1 a N5).....	45

## Índice de figuras

Figura 1. Ejemplos de curvas de crecimiento obtenidas utilizando la Ecuación 1 cuando se realizan una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c).....	24
Figura 2. Ejemplos de los ajustes de curvas de supervivencia utilizando las ecuaciones 3 y 4, para una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (3).....	25
Figura 3. Ejemplos del ajuste del factor de conversión alimenticia, una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c) (Ecuación 4).....	26
Figura 4. Resultados de la prueba de equivalencia entre la biomasa observada en la base de datos y la calculada, para una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c).....	30
Figura 5. Resultados de la prueba de equivalencia entre el FCA observado en la base de datos y el calculado, para una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c).....	31
Figura 6. Biomasa calculada utilizando valores extremos de las variables de manejo, al peor y mejor nivel (1 y 5, respectivamente), con una pre-cosecha (a), dos pre-cosechas (b) y tres pre-cosechas (c).....	35
Figura 7. Distribuciones de probabilidad de la producción de biomasa al Nivel 1 y 5 (el peor y el mejor) para los tres esquemas: con una pre-cosecha (a, b), con dos pre-cosechas (c, d) y con tres pre-cosechas (e, f).....	39
Figura 8. Ajuste de modelo lineal simple a los precios históricos del alimento.....	40
Figura 9. Ajuste de modelo lineal simple a los precios históricos del precio de postlarva..	40
Figura 10. Distribuciones de probabilidad de la utilidad al Nivel 1 y 5 (el peor y el mejor) para los esquemas con una pre-cosecha (a, b), con dos pre-cosechas (c, d)	

y con tres pre-cosechas (e, f).....	44
Figura 11. Análisis de sensibilidad de la utilidad del Esquema 1, a las variables de calidad del agua, a los parámetros del modelo de producción, del factor de conversión alimenticia y a los del submodelo económico. Nivel de manejo 1 (a) y Nivel de manejo 5 (b).....	47
Figura 12. Análisis de sensibilidad de la utilidad del Esquema 2, a las variables de calidad del agua, a los parámetros del modelo de producción, del factor de conversión alimenticia y a los del submodelo económico. Nivel de manejo 1 (a) y Nivel de manejo 5 (b).....	48
Figura 13. Análisis de sensibilidad de la utilidad del Esquema 3, a las variables de calidad del agua, a los parámetros del modelo de producción, del factor de conversión alimenticia y a los del submodelo económico. Nivel de manejo 1 (a) y Nivel de manejo 5 (b).....	49

## RESUMEN

En la presente investigación, se utilizó un modelo bioeconómico para el análisis de la producción semi-intensiva del cultivo de camarón en el estado de Nayarit, considerando el manejo de una (Esquema 1), dos (Esquema 2) y tres (Esquema 3) pre-cosechas. El modelo bioeconómico se integró por cuatro sub-modelos: biológico, de manejo y calidad del agua, de factor de conversión alimenticia (FCA) y económico. El modelo se calibró utilizando bases de datos de granjas semi-intensivas aportados por productores de Nayarit. El cálculo de la biomasa se llevó a cabo relacionando las variables de manejo y de calidad del agua con los parámetros de modelos de crecimiento y supervivencia mediante regresión múltiple. Se establecieron 5 niveles de manejo para cada esquema (con una, dos y tres precosechas): el Nivel 1 fue aquél con el cual las combinaciones de las variables de manejo produjeron la menor biomasa (981, 1 808 y 1 364 kg ha<sup>-1</sup>, Esquemas 1, 2 y 3), y Nivel 5 fue aquél para el que se calculó la mayor biomasa (2 573, 3 602 y 3 834 kg ha<sup>-1</sup>, Esquemas 1, 2 y 3). El sub-modelo económico consideró los costos de producción, los ingresos por pre-cosechas y cosechas y su variabilidad estocástica. Se establecieron 5 niveles de manejo: con el Nivel 1 se proyectó la menor utilidad (\$5 369 ha<sup>-1</sup>, \$46 543 ha<sup>-1</sup> y \$26 670 ha<sup>-1</sup>, Esquemas 1, 2 y 3), mientras que la mayor utilidad se calculó con el Nivel 5 (\$45 699 ha<sup>-1</sup>, \$93 723 ha<sup>-1</sup> y \$124 990 ha<sup>-1</sup>, Esquemas 1, 2 y 3). La mayor sensibilidad de la utilidad fue al peso final del camarón, al precio de venta de la cosecha, a la tasa de mortalidad hasta antes de la primera pre-cosecha y a los parámetros de la ecuación para el cálculo del FCA. El Esquema de manejo con tres pre-cosechas presentó el mejor desempeño económico y la menor incertidumbre por lo que se recomienda utilizarlo al mejor Nivel de manejo definido para el mismo.

## I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con datos de la FAO (2016), el consumo de productos de la pesca y la acuicultura va en aumento a nivel mundial; la producción alcanzó, en el año 2014, 167 millones de toneladas. Según datos publicados por la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2013), en 2013 la producción nacional de camarón, en su mayoría de la especie *Litopenaeus vannamei*, fue de 127 517 toneladas, de las cuales 60 292 correspondieron a camarón cultivado. En el estado de Nayarit la producción de camarón para ese mismo año fue de 9 086 toneladas, de las cuales 1 729 corresponden a captura en mar abierto, 3 614 a esteros y bahías y 3 743 a camarón de granja.

El padrón de instalaciones acuícolas del Comité Estatal de Sanidad Acuícola del Estado de Nayarit, A. C. (CESANAY) divide el Estado en tres zonas con respecto a la producción de camarón. Los rendimientos en toneladas para el año 2015 fueron: Zona Norte (Acaponeta y Tecuala) 2 595 t, Zona Centro (Rosamorada, Tuxpan y Santiago Ixcuintla) 3 114 t, Zona Sur (San Blas) 1 851 t, para un total de 7 560 t (CESANAY, 2016).

En Nayarit se distinguen diferentes sistemas de cultivo de camarón, a saber:

- 1) Extensivo. Se siembran 4-10 PL m<sup>2</sup>, generalmente se requieren grandes superficies de espejo de agua y no se realiza aporte de alimento balanceado suplementario.
- 2) Semi-intensivo. Se usan densidades de siembra de 10-30 PL m<sup>2</sup>, se aprovecha la productividad natural del estanque y se proporciona alimento balanceado, requiere recambios parciales de agua y los estanques pueden ser desde 5 hasta 15 hectáreas.

- 3) Intensivo. Se siembra a altas densidades (60-300 PL m<sup>2</sup>), requiere aireación mecánica, recambios parciales de agua, alimento balanceado, y las superficies de espejo de agua puede ser desde 0.2 hasta 5 hectáreas (CNA, 2012).

Una estrategia alterna a realizar una sola cosecha final es llevar a cabo una o más pre-cosechas (cosechas parciales) durante el ciclo de producción, con lo cual se pretende disminuir la densidad de los estanques y lograr tallas finales mayores, así como obtener ingresos anticipados con la venta del camarón para enfrentar las obligaciones económicas (Allen et al., 1984; Engle, 2010).

Por otro lado, el enfoque bioeconómico de la producción de camarón ha venido adquiriendo mayor relevancia. La bioeconomía es la administración eficiente de recursos biológicos renovables (Clark, 1974), y sus principios han sido adaptados para el manejo acuícola (Allen, 1984). Dentro de la bioeconomía acuícola, el análisis de riesgo (o de la incertidumbre) es una herramienta importante desde la perspectiva empresarial, debido a que la percepción que se tenga de la incertidumbre sobre los posibles resultados que se obtengan con el cultivo afecta la toma de decisiones, y por lo tanto el desempeño económico de las granjas (Llorente y Luna, 2016).

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

Las primeras aplicaciones de la bioeconomía asociadas a la producción acuícola de camarón se dieron con Adams et al. (1980), quienes analizaron elementos biológicos, económicos y de ingeniería. Dichos autores consideraron la influencia del tamaño de la granja y los estanques sobre los costos de producción utilizando un modelo determinista.

Posteriormente, se incluyeron elementos estocásticos en modelos que consideraban la variabilidad ambiental y de manejo para calcular el rendimiento biológico y la rentabilidad económica (Griffin et al., 1981). El modelo propuesto por estos investigadores incluye aspectos biológicos, económicos, de ingeniería y de mercadotecnia, para determinar, con este último aspecto, las ganancias potenciales. De acuerdo con un análisis de sensibilidad, estiman que disminuciones en la salinidad, oxígeno y temperatura, reducen las ganancias.

El análisis de diferentes esquemas de alimentación y fertilización en cultivos experimentales de camarón con tecnología semi-intensiva mediante modelos bioeconómicos, permitieron a Hernández-Llamas y Magallón-Barajas (1991) cuantificar la sensibilidad de los indicadores económicos a los parámetros que tienen más influencia sobre el cultivo. Combinaciones de los parámetros permitieron proyectar puntos de equilibrio en los que no se registraran pérdidas económicas. Incrementos de la densidad de siembra logra incrementos en los beneficios económicos.

Martínez y Seijo (2001) construyeron un modelo para comparar el rendimiento económico de un sistema de cultivo con bajo recambio de agua con aireación, contra un sistema con bajo recambio sin aireación. Llevaron a cabo análisis de la incertidumbre para evaluar el efecto que tiene sobre la rentabilidad la variabilidad en el precio de la postlarva, la

tasa de crecimiento del camarón, la tasa de mortalidad y el precio de venta del camarón. Los autores concluyeron que el sistema de cultivo que ofrece más ventajas en términos económicos es el de bajo recambio de agua con aireación.

Valderrama y Engle (2002), por medio de un modelo bioeconómico encontraron que, en general, la densidad afecta las tasas de crecimiento pero no la supervivencia. El análisis de la incertidumbre mostró que densidades bajas de siembra (5 PL m<sup>-2</sup>) o intermedias (12-15 PL m<sup>-2</sup>) son menos riesgosas y hay mayor rentabilidad en granjas grandes que las más pequeñas.

Hernández-Llamas et al. (2004) desarrollaron un modelo bioeconómico para evaluar la producción intensiva del camarón azul (*Litopenaeus stylirostris*). Calcularon la variación estocástica de los parámetros de crecimiento y mortalidad y el factor de conversión alimenticia, a fin de analizar la incertidumbre correspondiente a dos ciclos de producción. El análisis de sensibilidad mostró que la tasa instantánea de mortalidad es el parámetro más sensible, seguido del precio de venta del camarón, la densidad de siembra y el peso final. Reportan que la producción en el punto de equilibrio se alcanza cuando la granja opera al 53 % de su capacidad.

El manejo de pre-cosechas permite que los productores pueden enfrentar las obligaciones económicas mediante la venta de una parte de la biomasa producida y que, al reducirse la densidad de cultivo, los organismos remanentes crezcan más rápido y puedan alcanzar mejor precio debido a su mayor talla (Engle, 2010).

El modelado de los sistemas de producción donde se realizan pre-cosechas ha sido abordado desde diferentes perspectivas. Forsberg (1999) utilizó modelado bioeconómico y

encontró que se pueden esperar aumentos de 10 a 15 % de los beneficios económicos si se clasifica el tamaño del salmón a ser cosechado en lugar de cosechar todo el lote de peces, el cual incluye organismos de diferentes tallas.

Brummett (2002) comparó tres sistemas típicos de producción de tilapia con pre-cosechas semanales utilizando anzuelos y uno de control sin pre-cosecha, y en términos de rendimiento económico observó que se obtuvieron beneficios significativamente más altos en los estanques pre-cosechados.

Mediante un modelo bioeconómico, Yu y Leung (2006) analizaron el desempeño económico de la producción acuícola, los resultados obtenidos indicaron que los esquemas donde se realizan pre-cosechas son más rentables económicamente que en los sistemas donde se realiza solo una cosecha.

Con un enfoque bioeconómico, Yu et al. (2009) desarrollaron un modelo para comparar la producción y la utilidad de la producción de camarón en sistemas intensivos con y sin pre-cosechas, y sus resultados indican que el mejor desempeño se obtiene con sistemas que utilizan pre-cosechas.

Utilizando modelado bioeconómico para analizar la producción intensiva de camarón en jaulas flotantes, Hernandez-Llamas y Zarain-Herzberg (2011) encontraron que realizando una pre-cosecha mejoran las expectativas sobre el ingreso neto a obtener con respecto a la producción sin pre-cosechas.

Estrada-Pérez et al. (2016) analizaron, mediante modelos deterministas y estocásticos, la producción intensiva de camarón con tres pre-cosechas y encontraron que los principales factores que afectan la producción fueron el peso final del camarón, su tasa de crecimiento, la

temperatura del agua, el tamaño de los estanques, la aireación y el tiempo al que se realizan las pre-cosechas. Con diferentes estrategias de manejo reportan producciones de 2 640 kg ha<sup>-1</sup> hasta 3 524 kg ha<sup>-1</sup>.

### III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo bioeconómico estocástico para analizar la incertidumbre del cultivo semi-intensivo de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* con el manejo de pre-cosechas.

#### 3.1.1. Objetivos específicos

- Construir un modelo bioeconómico que incorpore elementos estocásticos para analizar la producción semi-intensiva de camarón *L. vannamei*.
- Proponer esquemas que permitan incrementar la producción y la rentabilidad económica y disminuir la incertidumbre.
- Llevar a cabo un análisis de la variabilidad de la producción y de la incertidumbre económica del cultivo comercial semi-intensivo de camarón con el manejo de pre-cosechas.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo bioeconómico para establecer cuáles son los más importantes y emitir recomendaciones para el manejo.

### **3.2. Hipótesis**

Dado que en la industria de la acuicultura de camarón, diversas granjas camaroneras utilizan hasta tres pre-cosechas por ciclo de producción, se espera que la razón por la que los productores las llevan a cabo se fundamenta en que, con ese manejo de la producción, se obtienen mayores utilidades económicas que con manejos que realizan un menor número de pre-cosechas.

#### IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio, se utilizaron bases de datos proporcionadas por productores de camarón *L. vannamei* de Nayarit. Se verificó que los datos hayan sido registrados adecuadamente, que no se presentara alguna enfermedad y que no hubiera problemas mayores durante el ciclo de cultivo. Finalmente, se encontró que 42 casos (estanques) reunían las características necesarias para conformar la base de datos y calibrar los modelos de producción. De los 42 casos, en 11 se realizó una pre-cosecha (Esquema 1), en 15 se realizaron dos pre-cosechas (Esquema 2) y en 16 se realizaron tres pre-cosechas (Esquema 3). En el Cuadro 1, se presentan los valores mínimos y máximos de los parámetros zootécnicos y de calidad del agua correspondiente a cada esquema. En todos los casos la siembra se realizó durante el mes de mayo.

Se realizaron análisis de varianza paramétrica (ANDEVA) y no paramétrica (Kruskal-Wallis) de una vía, dependiendo de si las variables estaban normalmente distribuidas o no, para encontrar posibles diferencias en el manejo, producción y las variables de calidad del agua entre los tres esquemas. Para determinar la normalidad, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. La prueba post hoc de Tukey se empleó para separar diferencias entre los esquemas de producción después de que los resultados de análisis de varianza resultaran significativos. Se utilizaron los procedimientos disponibles en *Statistica v.7.0 (Stat-Soft, Tulsa, OK, USA)* con un nivel de significación de  $P < 0.05$ .

De acuerdo con la información proporcionada por los productores, la primera pre-cosecha se realiza preferentemente cuando el camarón alcanza los 10 gramos. Ocasionalmente el productor realiza pre-cosechas cuando el estanque sobrepasa su capacidad de carga (esto es,

cuando los niveles de oxígeno disuelto se encuentran por abajo de aproximadamente 2 mg L<sup>-1</sup> durante tres días sucesivos). Las pre-cosechas duran una noche y en estanques pequeños se realizan disminuyendo el nivel de agua del estanque y utilizando atarrayas, mientras que en estanques grandes no se disminuye el nivel de agua y la pre-cosecha se realiza con chinchorros.

Cuadro 1. Valores mínimos (Mín) y máximos (Máx) de las variables registradas en la base de datos para casos con una (Esquema 1), dos (Esquema 2) y tres pre-cosechas (Esquema 3).

Variable	Esquema 1		Esquema 2		Esquema 3	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Densidad (postlarvas m <sup>-2</sup> )	13.3	33.3	14.3	33.3	10	33.3
Tamaño del estanque (ha)	0.6	7.0	1.1	7.0	0.6	20
Duración del cultivo (semanas)	13	16	17	19	18	20
Oxígeno disuelto( mg L <sup>-1</sup> )	3.7	5.5	2.5	6	2.7	5.5
Temperatura (°C)	31.3	32.2	28	31.7	28.2	32.7
Salinidad (g L <sup>-1</sup> )	8	19	8	19	4	18
Tiempo de la primera pre-cosecha (semanas)	9	11	9	12	10	12
Tiempo de la segunda pre-cosecha (semanas)			13	15	12	14
Tiempo de la tercera pre-cosecha (semanas)					15	17
Biomasa pre-cosechada 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	360	1 130	182	921	106	1 093
Biomasa pre-cosechada 2 (kg ha <sup>-1</sup> )			364	1070	126	864
Biomasa pre-cosechada 3 (kg ha <sup>-1</sup> )					88	736
Cosecha final (kg ha <sup>-1</sup> )	623	1 530	559	1 551	984	1 162
Biomasa total producida (kg ha <sup>-1</sup> )	983	2 660	1 105	3 542	1 304	3 855

## 4.1. Modelo bioeconómico

El modelo bioeconómico está integrado por cuatro sub-modelos: biológico, del factor de conversión alimenticia (FCA), de manejo y calidad del agua, y económico. El modelo se calibró para cada esquema de pre-cosechas por separado empleando las bases de datos correspondientes.

### 4.1.1. Sub-modelo biológico

Se utilizó un modelo de producción para el cálculo de la biomasa en función del tiempo para cada esquema de producción: El cálculo se realizó como el producto del peso promedio de cada individuo multiplicado por la cantidad de organismos sobrevivientes por hectárea a través del tiempo.

El peso de los organismos ( $W_t$ ) en la semana  $t$ , se calculó con el modelo desarrollado por Ruiz-Velazco et al., (2010a,b):

$$W_t = W_i + (W_f - W_i) [(1 - k^t) / (1 - k^c)]^3 \quad (1)$$

donde  $W_i$  es el peso inicial (g),  $W_f$  es el peso final,  $t$  es el número de semanas a la cual se calcula  $W_t$ ,  $k$  (coeficiente de crecimiento) es la tasa a la cual el peso cambia de su valor inicial a su valor final y  $c$  es número total de semanas que dura el cultivo. Para estimar los parámetros de crecimiento para cada estanque se utilizó regresión no lineal mediante *Statistica v.7.0*.

Para el cálculo del número de organismos sobrevivientes en el tiempo, se consideró una serie de fases sucesivas, cada uno de ellas definida por los tiempos en que se llevaron a cabo las pre-cosechas. La primera fase cubre desde el inicio del cultivo hasta que se realiza la primera pre-cosecha, la segunda fase corresponde al periodo comprendido entre la conclusión

de la primera pre-cosecha y el inicio de la segunda, y así sucesivamente hasta la cosecha final. Como resultado, el Esquema 1 contó con dos fases, el Esquema 2 presentó tres fases y el Esquema 3 consistió de cuatro fases.

La supervivencia, durante las diferentes fases, se calculó por medio de la ecuación exponencial, como una extensión del enfoque usado por Ruiz-Velazco et al. (2010a):

$$n_{t1} = n_1 \exp(-z_1 t), \text{ si } t \leq t_{c1} \quad (2a)$$

$$n_{t2} = [n_1 \exp(-z_1 t_{c1}) - c_1] \exp[-z_2 (t - t_{c1})], \text{ si } t_{c1} < t \leq t_{c2} \quad (2b)$$

$$n_{t3} = [n_2 \exp(-z_2 t_{c2}) - c_2] \exp[-z_3 (t - t_{c2})], \text{ si } t_{c2} < t \leq t_{c3} \quad (2c)$$

$$n_{t4} = [n_3 \exp(-z_3 t_{c3}) - c_3] \exp[-z_4 (t - t_{c3})], \text{ si } t_{c3} < t \leq t_{cf} \quad (2d)$$

donde  $n_{t1}$  hasta  $n_{t4}$  son la cantidad de organismos sobrevivientes durante las distintas fases al tiempo  $t$ ,  $n_1$  hasta  $n_3$  son el número inicial de individuos de cada fase,  $t_{c1}$  hasta  $t_{c3}$  son los tiempos en los cuales ocurrieron las pre-cosechas,  $t_{cf}$  es el tiempo correspondiente a la cosecha final,  $c_1$  hasta  $c_3$  es la cantidad de organismos pre-cosechados y  $z_1$  hasta  $z_4$  son la tasa instantánea de mortalidad de cada fase. Los valores de las tasas de mortalidad se estimaron como:

$$z_1 = -\ln(n_{F1}/n_1)/t_{d1} \quad (3a)$$

$$z_2 = -\ln(n_{F2}/n_2)/t_{d2} \quad (3b)$$

$$z_3 = -\ln(n_{F3}/n_3)/t_{d3} \quad (3c)$$

$$z_4 = -\ln(n_{F4}/n_4)/t_{d4} \quad (3d)$$

siendo  $n_{F1}$  hasta  $n_{F4}$  los organismos sobrevivientes al final de cada fase,  $n_1$  hasta  $n_4$  la cantidad de organismos al inicio de cada fase, y  $t_{d1}$  hasta  $t_{d4}$  la duración de cada fase.

#### 4.1.2. Sub-modelo del factor de conversión alimenticia

El factor de conversión alimenticia (FCA) es la razón entre el peso del alimento proporcionado y la biomasa de camarón producida. Se usó un modelo lineal para cada uno de los tres esquemas de producción para calcular el FCA en función del tiempo, a saber:

$$FCA_t = b_F + a_F t \quad (4)$$

donde  $b_F$  es el intercepto y  $a_F$  la pendiente del modelo de regresión.

#### 4.1.3. Sub-modelo de manejo y calidad del agua

Se utilizó regresión lineal múltiple con *eliminación progresiva hacia atrás* (*backward stepwise*) para relacionar los parámetros de los sub-modelos biológico (excluyendo a  $W_i$  y  $n_0$ ) y del factor de conversión alimenticia (FCA) con variables de manejo del cultivo y de calidad del agua. Para ello se utilizó la ecuación:

$$Q = a_0 + a_1T + a_2OD + a_3S + a_4D + a_5TE + a_6DC \quad (5)$$

donde  $Q$  puede ser  $W_f$ ,  $k$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ ,  $z_4$ ,  $a_F$  y  $b_F$ ,  $a_0$  hasta  $a_6$  son coeficientes de regresión,  $T$  es temperatura,  $OD$  es oxígeno disuelto,  $S$  es salinidad,  $D$  es densidad de siembra,  $TE$  es tamaño del estanque, y  $DC$  es duración del cultivo.

El análisis de regresión se llevó a cabo con *Stata 10* (*StataCorp, College Station, TX, USA*) utilizando los valores promedio de las variables de calidad del agua registradas para cada estanque, y una significación de  $P < 0.1$  como criterio para aceptar o rechazar las variables independientes. Para el análisis sólo se consideraron aquellas variables que, previamente, se encontraron correlacionadas significativamente con los parámetros de los sub-modelos.

#### **4.1.4. Evaluación de los sub-modelos biológico, del FCA y de manejo y calidad del agua**

Los sub-modelos se evaluaron, en forma conjunta, mediante la comparación de los valores finales de biomasa y del FCA que se calculan con ellos para cada caso (estanque), con los valores de dichas variables que se tienen registrados en las bases de datos.

De acuerdo con Poole (1974) y Franco et al. (2006), la comparación se llevó a cabo mediante una función de identidad, incorporando la biomasa y el FCA calculados con los sub-modelos como variables independientes, y las registradas en las bases de datos como dependientes en un análisis de regresión lineal simple, fijando el intercepto de la ecuación igual a cero. Una vez concluido el análisis de regresión, se aplicó una prueba t-Student para determinar si la pendiente difería significativamente de 1 (Zar, 2010). Después de obtener un resultado que no fue significativo, se realizó una prueba de equivalencia con el fin de no aceptar falsamente la hipótesis nula correspondiente (error Tipo II de la estadística; Zar, 2010) (Hauck y Anderson, 1986). Se utilizó el procedimiento de dos colas (Chow y Liu, 2004), con un nivel de significación de  $P < 0.05$ , y se estableció una tolerancia de error de 10 % del valor de la pendiente. Cuando el resultado de la prueba de equivalencia indicó que el valor de la pendiente ajustada fue equivalente a 1, se consideró que la evaluación del el sub-modelo fue favorable.

#### **4.1.5. Elementos estocásticos de los sub-modelos biológico y del FCA**

Se utilizó el método de “envoltura” descrito por Vose (2001), con el fin de incorporar variabilidad estocástica en el modelo bioeconómico. Para ello, se incluyeron elementos

estocásticos en el sub-modelo de manejo y calidad del agua mediante la modificación del valor determinista de  $Q$  en la ecuación (5) conforme a:

$$Q_e = Q + r \quad (12)$$

donde  $Q_e$  es valor estocástico que puede adquirir el parámetro, y  $r$  es el valor calculado por medio de una distribución normal ajustada a los residuales de la regresión lineal múltiple correspondiente. También se ajustaron distribuciones de probabilidad a los valores de las variables de calidad del agua que fueron significativas en el análisis de regresión. A los parámetros que no resultaron significativos en el análisis de regresión, se le ajustaron distribuciones a los valores registrados en la base de datos.

#### **4.1.6. Niveles de manejo de la producción y simulación Monte Carlo**

El modelo bioeconómico se programó en Excel 10.0 usando hojas de cálculo por separado para cada esquema de pre-cosechas. Se determinaron los valores de las variables de manejo que producen la menor y mayor producción y utilidades promedio (nivel de manejo 1 y 5 respectivamente) por medio de *RISKOptimizer v.5.5 (Palisade Corp., Ithaca, NY, USA)*, y posteriormente se determinaron valores intermedios (niveles de manejo 2, 3 y 4). Se realizaron simulaciones Monte Carlo con 10,000 iteraciones para los tres esquemas de producción y los distintos niveles de manejo (*@RISK 5.5; Palisade Corp., Ithaca, NY, USA*), con el fin de generar distribuciones de probabilidad de la biomasa calculada.

#### 4.1.7. Sub-modelo económico

Con este sub-modelo se calcularon, en función del tiempo, los costos de producción ( $C_t$ ), los ingresos ( $I_t$ ) (por las pre-cosechas y cosechas finales), la utilidad ( $U_t$ ), la relación beneficio-costos ( $B/C_t$ ), la producción en el punto de equilibrio ( $PPE$ ) y el porcentaje de aprovechamiento de la capacidad instalada ( $PACI$ ).

La utilidad ( $U_t$ ) se calculó como la diferencia entre ingresos y costos:

$$U_t = I_t - C_t \quad (6)$$

mientras que la relación beneficio-costos ( $B/C_t$ ) fue la razón entre ingresos y costos y se calculó como:

$$B/C_t = I_t / C_t \quad (7)$$

El cálculo de los ingresos por concepto de la venta del camarón de las pre-cosechas y la cosecha final se realizó por medio de:

$$I_t = b_t P_{C_t} \quad (8)$$

donde  $b_t$  es la biomasa de camarón en el tiempo y  $P_{C_t}$  es el precio comercial del camarón.

El cálculo de los costos de producción en el tiempo ( $C_t$ ) se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$C_t = C_f + C_v \quad (9)$$

siendo  $C_f$  los costos fijos (administrativos, materiales diversos, mano de obra, mantenimiento, y otros) y  $C_v$  los costos variables (postlarva, gastos asociados a las pre-cosechas y cosecha, alimento, otros).

La producción en el punto de equilibrio (*PPE*) es aquella para la que los ingresos son iguales a la suma de los costos variables y los costos fijos, y por lo tanto no se registran pérdidas ni ganancias:

$$PPE = Cf / (Iu - Cvu) \quad (10)$$

donde *Iu* es el ingreso unitario por kilogramo de camarón producido y *Cvu* es el costo variable unitario por kilogramo del total producido.

El porcentaje de aprovechamiento de la capacidad instalada por hectárea (*PACI*) corresponde a la capacidad a la que debe de operar una granja de tal forma que se alcance la producción en el punto de equilibrio y se calculó con la siguiente ecuación:

$$PACI = (PPE / PT) * 100 \quad (11)$$

siendo *PT* la producción total por hectárea.

Los costos unitarios utilizados para el análisis bioeconómico se obtuvieron de productores y proveedores de insumos acuícolas y gasolineras (Cuadro 2). Los precios “base” de venta del camarón se estimaron con base en información de los compradores del producto. Una vez que se determinó el precio “base” en función de la talla del camarón, se le agregó un peso extra por cada gramo de peso promedio del camarón, para obtener así el precio de venta final (Cuadro 3).

Cuadro 2. Costos de insumos, precios de junio, 2016.

Concepto	Precio (\$)	Concepto	Precio (\$)
Postlarva (\$ millar <sup>-1</sup> )	80.0	Aceite (\$ L <sup>-1</sup> )	47.0
Diesel (\$ L <sup>-1</sup> )	13.8	Grasa (\$ kg <sup>-1</sup> )	59.0
Gasolina (\$ L <sup>-1</sup> )	13.2	Rastra (\$ ha <sup>-1</sup> )	600.0
Fertilizante (\$ kg <sup>-1</sup> )	18.0	Personal (\$ semana <sup>-1</sup> )	630.0
Alimento (\$ kg <sup>-1</sup> )	15.8	Pre-cosecha y cosecha (\$ kg <sup>-1</sup> )	2.0
Reparaciones (\$ semana <sup>-1</sup> )	119.0	Electricidad (\$ ciclo <sup>-1</sup> )	246.0

Cuadro 3. Precios “base” de venta del camarón a pie de granja. Se presentan los precios promedio para todas las tallas.

Mes	Precio (\$ kg <sup>-1</sup> )	Mes	Precio (\$ kg <sup>-1</sup> )
Enero	63.0	Julio	53.6
Febrero	60.8	Agosto	51.0
Marzo	59.0	Septiembre	50.4
Abril	59.0	Octubre	53.5
Mayo	56.2	Noviembre	56.5
Junio	54.0	Diciembre	58.1

#### 4.1.8. Elementos estocásticos del sub-modelo económico

El sub-modelo económico también se modificó con el fin de incorporar variabilidad aleatoria en los precios de venta del camarón, postlarva y alimento. Para ello, se ajustó una distribución al precio promedio anual del camarón para el periodo 2012-2015, después que un

análisis de regresión no mostrara incremento o decremento significativo ( $P > 0.05$ ) en la tendencia de los mismos. La variabilidad anual en los precios de venta se incorporó multiplicando los precios del camarón correspondientes a los meses del ciclo de producción, por el coeficiente de variación (desviación estándar / promedio) de la distribución normal de los precios promedio anuales.

Las variabilidades aleatorias anuales de los precios del alimento y de la postlarva se estimaron usando regresiones lineales simples para el ajuste a valores de los insumos proporcionados, por los proveedores, correspondientes a los años 2006-2016. De manera similar a lo realizado con el sub-modelo de manejo y calidad del agua, los valores deterministas de los precios se modificaron añadiendo errores residuales calculados por medio de distribuciones ajustadas a los residuales de las regresiones lineales simples.

#### **4.1.9. Niveles de manejo de la utilidad y simulación Monte Carlo**

Se establecieron cinco niveles de manejo de la utilidad y se llevaron a cabo simulaciones Monte Carlo con el fin de generar distribuciones de probabilidad de la utilidad y la relación beneficio-costos.

#### **4.1.10. Análisis de incertidumbre de la utilidad**

El coeficiente de variación ( $CV = \text{desviación estándar} / \text{media}$ ) se usó como un índice de incertidumbre de la utilidad (Ayyub, 2014) considerando los diferentes niveles de manejo para cada esquema de pre-cosechas. De acuerdo con lo anterior, un valor bajo del CV indica menor incertidumbre económica.

Para calcular la incertidumbre de la utilidad, asociado al número total de estanques correspondientes a cada esquema de pre-cosechas, en vez de a un solo estanque, se usaron las distribuciones teóricas disponibles en *@RISK v.5.5* que presentaron el mejor ajuste a las distribuciones de utilidades obtenidas para un estanque. Enseguida, dependiendo del esquema, se utilizaron 11, 15 y 16 réplicas de dichas distribuciones que presentaron el mejor ajuste, con el fin de tomar los mismos números de muestras de lo que puede ocurrir, a nivel de un estanque, en la variabilidad de las utilidades. El proceso de muestreo se hizo repetidamente promediando, en cada ocasión y por separado, los valores de las 11, 15 y 16 muestras y generando así valores de lo que puede ocurrir en un estanque “promedio” para cada esquema.

#### **4.1.11. Análisis de sensibilidad**

Para analizar la sensibilidad de las utilidades a factores de incertidumbre, se utilizaron valores “mapeados” de los coeficientes de regresión múltiple los cuales relacionan la utilidad 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 la utilidad. Para el análisis de sensibilidad se utilizaron los procedimientos disponibles en *@RISK v.5.5*.

## **V. RESULTADOS**

Los resultados de los análisis de varianza indicaron diferencias significativas en las variables de manejo y en la producción entre los tres esquemas de producción, sin embargo, no se encontraron diferencias en las variables de calidad del agua (Cuadro 4). Se encontró que, conforme se incrementa el número de pre-cosechas, las densidades de siembra son más bajas, y que son mayores los estanques, la duración del cultivo, el peso final del camarón y la producción. También se encontró que la población de la cosecha final fue significativamente mayor en el Esquema 1 y que la supervivencia estimada considerando la mortalidad natural del camarón durante el periodo de cultivo (sin tomar en consideración los organismos pre-cosechados), fue significativamente menor en el Esquema 1.

### **5.1. Modelo bioeconómico**

#### **5.1.1. Sub-modelo biológico**

Los modelos de crecimiento y supervivencia se ajustaron adecuadamente a los valores registrados en la base de datos para los diferentes esquemas de manejo. En la Figura 1 y 2 se presentan ejemplos representativos de las curvas de crecimiento y supervivencia correspondientes a los esquemas de producción.

#### **5.1.2. Sub-modelo del factor de conversión alimenticia**

Los modelos del factor de conversión alimenticia se ajustaron adecuadamente a los valores registrados en la base de datos para los diferentes esquemas de manejo (Figura 3).

Cuadro 4. Mediana (\*) y media ( $\pm$  SE) valores de manejo, producción, y variables de calidad del agua para los diferentes esquemas de producción. Los valores que tienen por lo menos un superíndice común no difieren significativamente.

Variable	Esquema 1	Esquema 2	Esquema 3
Densidad de siembra (postlarvas m <sup>-2</sup> )*	25.0 <sup>a</sup>	19.4 <sup>ab</sup>	15.0 <sup>b</sup>
H = 7.9, p = 0.019			
Tamaño del estanque (ha)*	1.2 <sup>a</sup>	1.8 <sup>ab</sup>	3.7 <sup>b</sup>
H = 12.3, p = 0.002			
Duración del cultivo (semanas)*	13.0 <sup>a</sup>	18.0 <sup>b</sup>	19.0 <sup>b</sup>
H = 14.8, p = 0.000			
Peso final del camarón (g)	13.9 <sup>a</sup> $\pm$ 0.4	20.0 <sup>b</sup> $\pm$ 0.7	20.9 <sup>b</sup> $\pm$ 0.6
Coefficiente de crecimiento (g semana <sup>-1</sup> )	1.02 <sup>a</sup> $\pm$ 0.04	1.13 <sup>a</sup> $\pm$ 0.04	1.11 <sup>a</sup> $\pm$ 0.03
Producción total (kg ha <sup>-1</sup> )	1807.4 <sup>a</sup> $\pm$ 148.5	2505.3 <sup>b</sup> $\pm$ 171.3	2153.8 <sup>ab</sup> $\pm$ 163
Peso a la primera precosecha (g)	10.2 <sup>a</sup> $\pm$ 0.4	10.8 <sup>a</sup> $\pm$ 0.5	10.5 <sup>a</sup> $\pm$ 0.4
Primera precosecha (kg ha <sup>-1</sup> )	606.4 <sup>a</sup> $\pm$ 76.4	534.4 <sup>a</sup> $\pm$ 66.3	311.6 <sup>b</sup> $\pm$ 66.6
Población de la precosecha uno (%)*	28.2 <sup>a</sup>	24.1 <sup>a</sup>	10.0 <sup>b</sup>
H = 16.9, p = 0.000			
Peso a la segunda precosecha (g)	--	15.2 <sup>a</sup> $\pm$ 0.8	12.9 <sup>b</sup> $\pm$ 0.4
Segunda precosecha (kg ha <sup>-1</sup> )	--	685.3 <sup>a</sup> $\pm$ 64.3	394.6 <sup>b</sup> $\pm$ 45.0
Población de la precosecha dos (%)	--	28.8 <sup>a</sup> $\pm$ 12.3	18.5 <sup>b</sup> $\pm$ 6.0
Peso a la tercera precosecha (g)	--	--	16.8 $\pm$ 0.5
Tercera precosecha (kg ha <sup>-1</sup> )	--	--	293.3 $\pm$ 39.8
Población de la precosecha tres (%)	--	--	13.6 $\pm$ 6.0
Cosecha (kg ha <sup>-1</sup> )	1201.0 <sup>a</sup> $\pm$ 145.4	1285.6 <sup>a</sup> $\pm$ 129.3	1154.3 <sup>a</sup> $\pm$ 79.8
Población de la cosecha (%)*	57.9 <sup>a</sup>	45.0 <sup>b</sup>	48.4 <sup>ab</sup>
H = 6.4, p = 0.041			
Supervivencia (%)	62.0 $\pm$ 3.8 <sup>a</sup>	73.5 $\pm$ 2.5 <sup>b</sup>	76.6 $\pm$ 1.9 <sup>b</sup>

Cuadro 4 (continuación).

Factor de conversión alimenticia	$1.7 \pm 0.11^a$	$1.6 \pm 0.06^a$	$1.6 \pm 0.04^a$
Oxígeno disuelto ( mg L <sup>-1</sup> )	$4.4 \pm 0.1^a$	$4.8 \pm 0.2^a$	$4.3 \pm 0.3^a$
Temperatura del agua del estanque (°C)	$31.8 \pm 0.1^a$	$30.5 \pm 0.3^a$	$30.7 \pm 0.3^a$
Salinidad (g L <sup>-1</sup> )	$15.4 \pm 1.0^a$	$14.4 \pm 0.9^a$	$13.8 \pm 0.7^a$

---

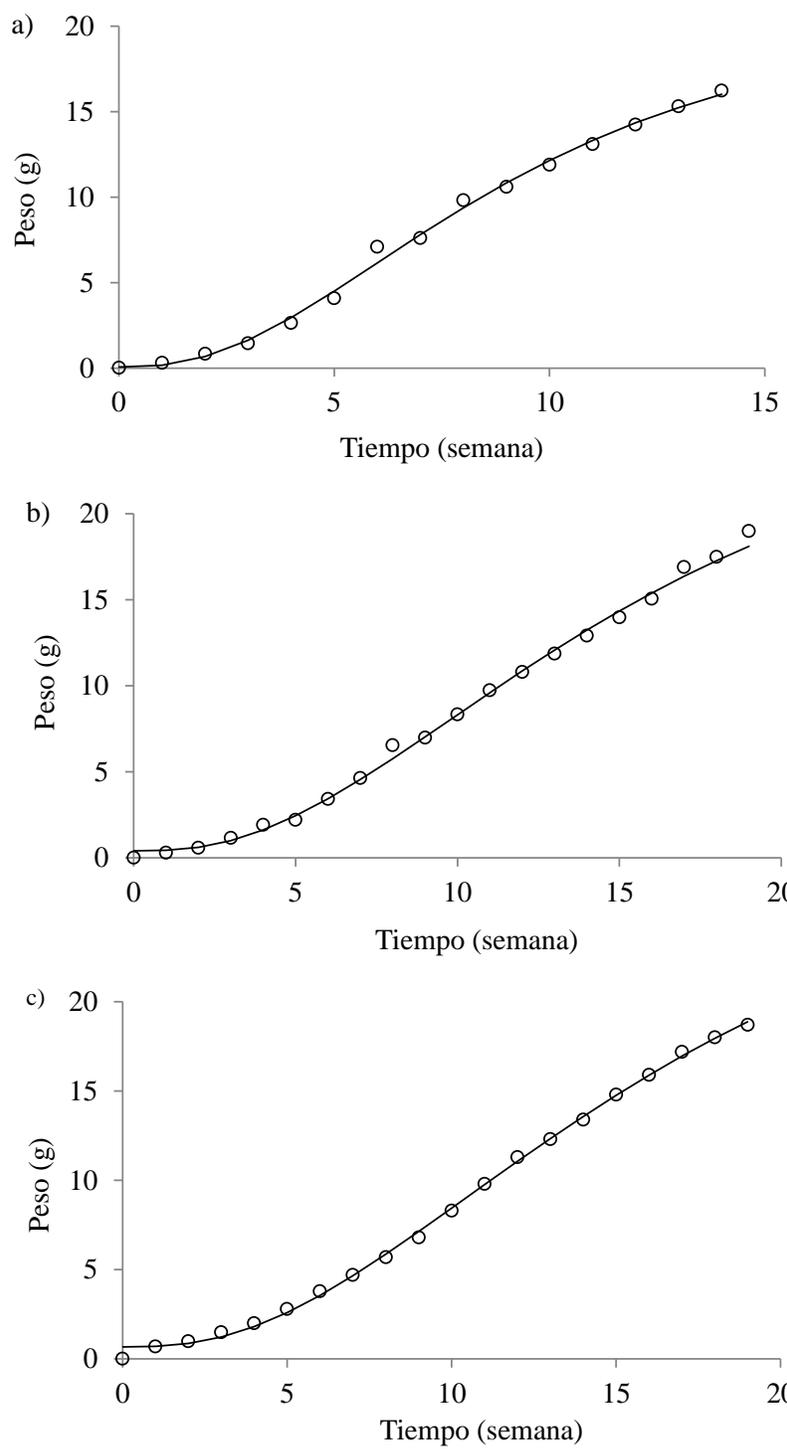


Figura 1. Ejemplos de curvas de crecimiento obtenidas utilizando la Ecuación 1 cuando se realizan una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c).

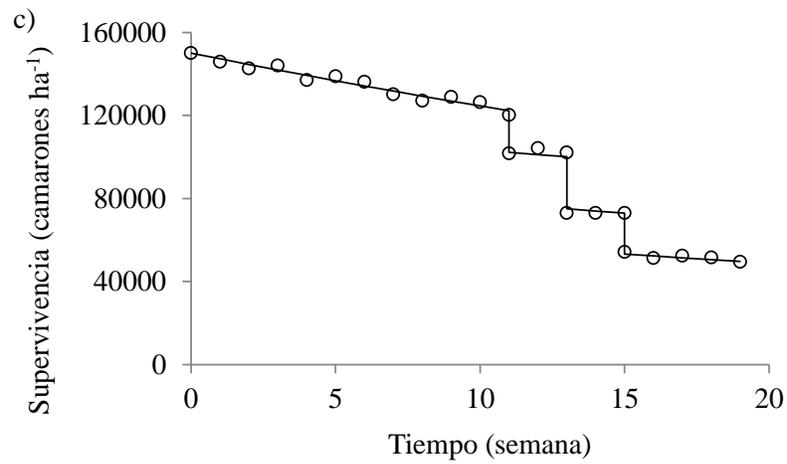
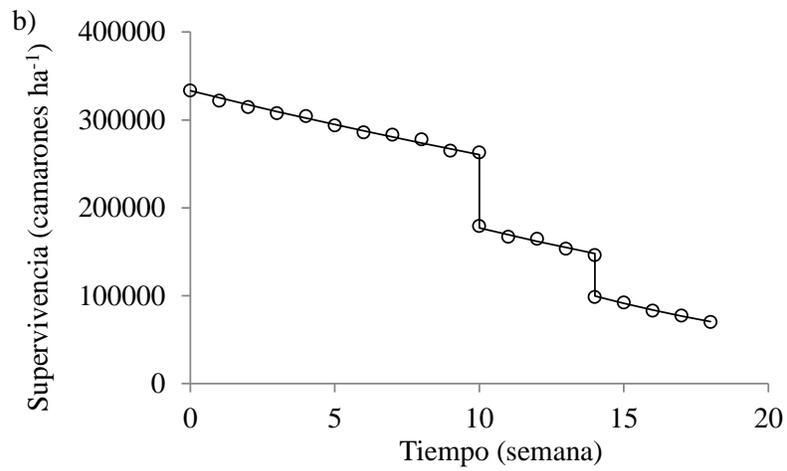
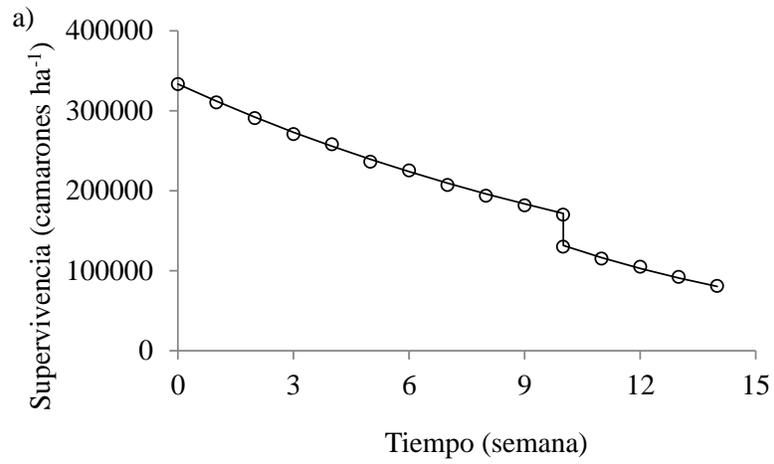


Figura 2. Ejemplos de los ajustes de curvas de supervivencia utilizando las ecuaciones 3 y 4, para una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (3).

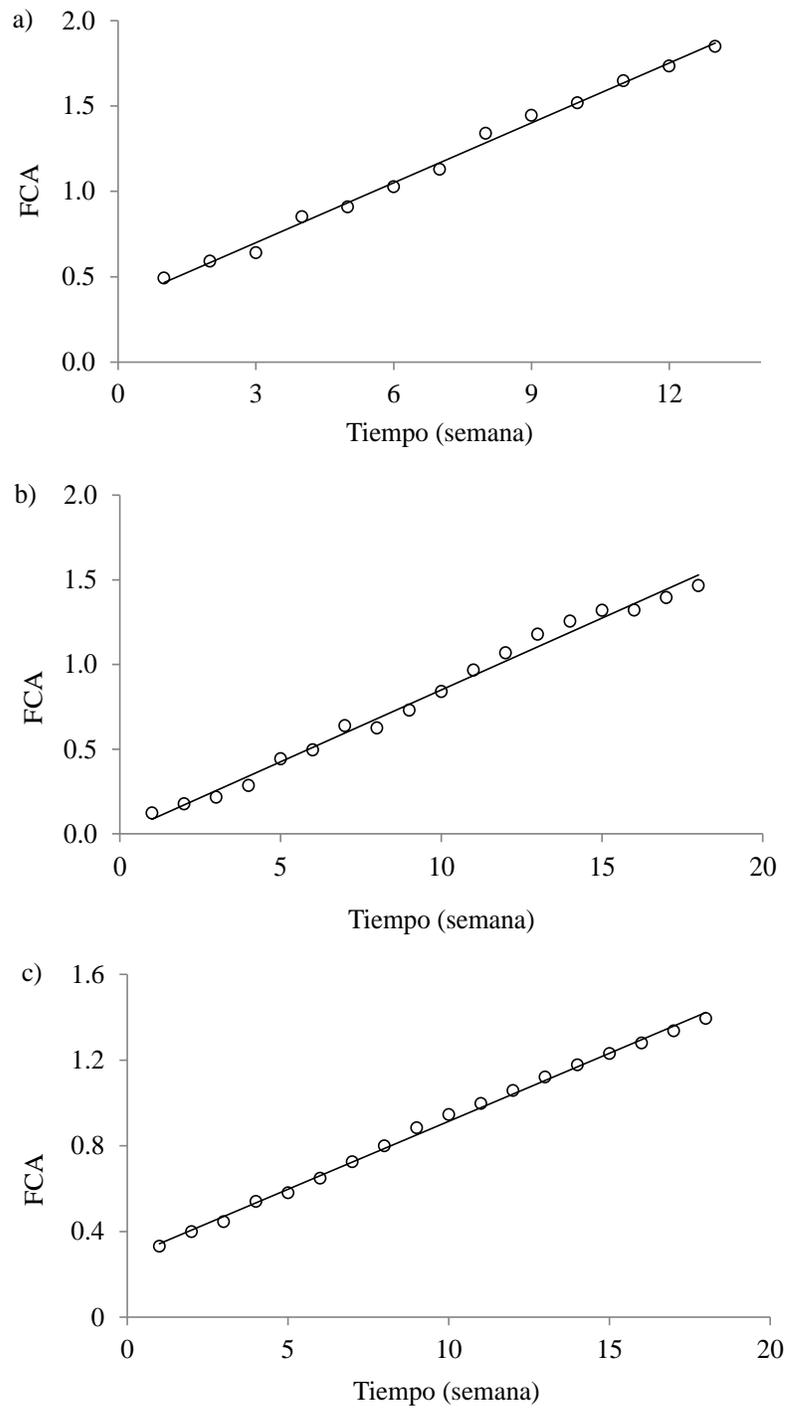


Figura 3. Ejemplos del ajuste del factor de conversión alimenticia, una (a), dos (b) y tres cosechas (c) (Ecuación 4).

### 5.1.3. Sub-modelo de manejo y calidad del agua

En los esquemas 1 y 2, el peso final del camarón ( $W_f$ ) estuvo inversamente relacionado con la densidad de siembra ( $D$ ), mientras que el coeficiente de crecimiento ( $k$ ) presentó una relación directa con la duración del cultivo ( $DC$ ) y una relación inversa con el oxígeno disuelto ( $OD$ ). En el Esquema 3, las tasas instantáneas de mortalidad de las cuatro fases presentaron una relación directa con la densidad de siembra (Cuadro 5).

El coeficiente de regresión  $a_F$  (pendiente) para el cálculo del FCA (Ecuación 5) se relacionó directamente con la densidad de siembra (Esquema 1), e inversamente con la duración del cultivo (Esquema 2) y la temperatura (Esquema 3). El coeficiente de regresión  $b_F$  (intercepto) se relacionó directamente con la temperatura (Esquema 3), (Cuadro 6).

Cuadro 5. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo biológico en función de las variables de manejo y calidad del agua.

Modelo	P
Esquema 1	
$W_f = 16.9266 - 0.1201D$	0.0062
$k = 0.6045 + 0.0174DC$	0.0161
Esquema 2	
$W_f = 25.1927 - 0.2471D$	0.0348
$k = 0.9284 - 0.0117OD$	0.0357
Esquema 3	
$z_1 = 0.0072 + 0.0004D$	0.0747
$z_2 = 0.0047 + 0.0008D$	0.0088
$z_3 = 0.0035 + 0.0013D$	0.0066
$z_4 = -0.0038 + 0.0023D$	0.0051

$W_f$ , peso final

$k$ , coeficiente de crecimiento

$z_1$  a  $z_4$ , tasa de mortalidad de la fase 1 a la 4

$D$ , densidad de siembra

$DC$ , duración del cultivo

Cuadro 6. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo del factor de conversión alimenticia en función de las variables de manejo y calidad del agua.

Modelo		p
	Esquema 1	
$a_F = 0.0670 + 0.0018D$		0.0029
	Esquema 2	
$a_F = 0.2846 - 0.0110DC$		0.0005
	Esquema 3	
$a_F = 0.2799 - 0.0066T$		0.0289
$b_F = -1.9447 + 0.0711T$		0.0328
$a_F$ , Pendiente de la ecuación del FCA	$DC$ , Duración del cultivo	
$b_F$ , Intercepto de la ecuación del FCA	$T$ , Temperatura	
$D$ , Densidad de siembra		

#### 5.1.4. Evaluación de los sub-modelos biológico, del FCA y de manejo y calidad del agua

Los resultados de las pruebas t-Student y de equivalencia realizados para la evaluación los sub-modelos mostraron que los valores de las pendientes ajustadas a los valores de biomasa y FCA fueron estadísticamente equivalentes a 1 ( $P < 0.05$ ), por lo que se consideró que los sub-modelos son adecuados para representar los tres esquemas de manejo (Figuras 4 y 5).

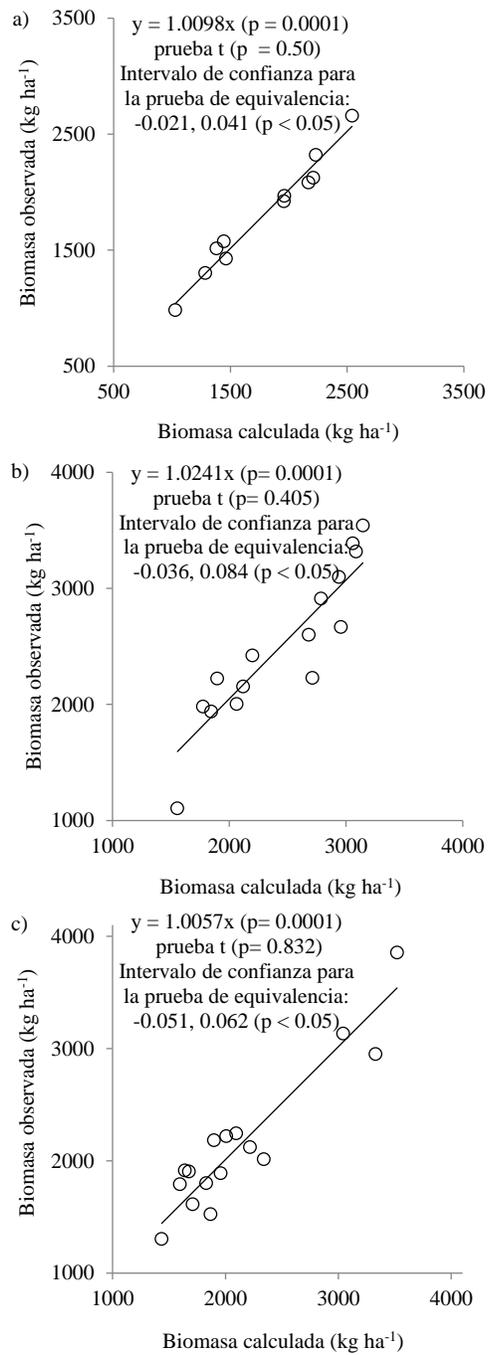


Figura 4. Resultados de la prueba de equivalencia entre la biomasa observada en la base de datos y la calculada, para una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c).

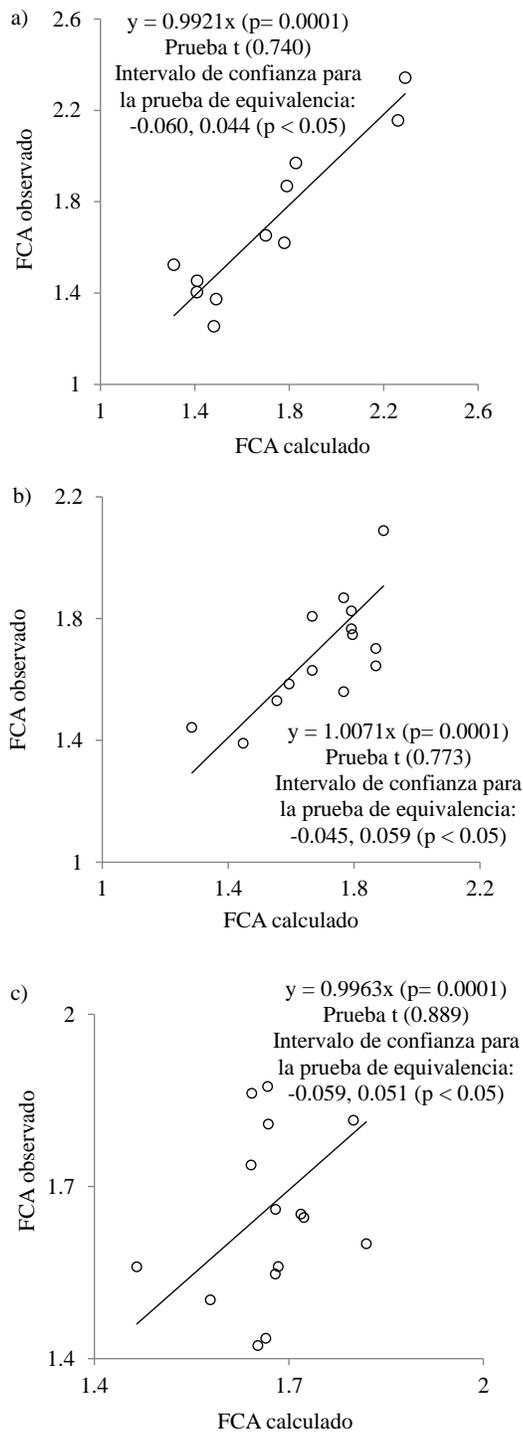


Figura 5. Resultados de la prueba de equivalencia entre el FCA observado en la base de datos y el calculado, para una (a), dos (b) y tres pre-cosechas (c).

### 5.1.5. Elementos estocásticos de los sub-modelos biológico y del FCA

Las distribuciones resultantes del ajuste a los valores de los errores residuales correspondientes al modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación 5) fueron normales (Cuadro 7).

Cuadro 7. Distribuciones normales ajustadas al error residual ( $\varepsilon$ ) de los modelos de regresión múltiple para agregar el componente estocástico ( $\mu = 0$ ).

Parámetro	Elemento estocástico	Elemento estocástico	Elemento estocástico
	Esquema 1	Esquema 2	Esquema 3
$W_f$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.771)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 2.353)$	normal (20.863, 2.379)
$k$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.021)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.015)$	normal (0.900, 0.020)
$z_1$	normal (0.034, 0.009)	normal (0.016, 0.007)	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.006)$
$z_2$	normal (0.049, 0.013)	normal (0.022, 0.010)	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.007)$
$z_3$		normal (0.032, 0.009)	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.010)$
$z_4$			$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.018)$
Precio de postlarva	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 5.816)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 5.816)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 5.816)$
Precio del alimento	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.515)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.515)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.515)$
$a_F$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.009)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.009)$	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.011)$
$b_F$	normal (0.165, 0.164)	normal (0.198, 0.124)	$\varepsilon = \text{normal} (\sigma = 0.123)$
$W_f$ , peso final	$a_F$ , pendiente del factor de conversión alimenticia		
$k$ , coeficiente de crecimiento	$b_F$ , intercepto del factor de conversión alimenticia		
$z_1$ - $z_4$ , tasas instantáneas de mortalidad			

### **5.1.6. Niveles de manejo de la producción**

Se definieron los cinco niveles de manejo de la producción de biomasa, donde el Nivel 1 es el más desfavorable y el 5 es el más favorable (Cuadro 8). Así mismo se calculó la biomasa en función del tiempo para los tres esquemas de producción, al peor y mejor nivel de manejo (Figura 6). Para efecto de este análisis, los valores de las variables de manejo se utilizaron de manera independiente, una vez que se demostró que no había correlación significativa entre los valores de ambas variables.

Cuadro 8. Valores de las variables de manejo usadas para definir estrategias alternativas de manejo para los tres esquemas de producción.

Nivel de manejo	Variable	
	Densidad de siembra (postlarvas m <sup>-2</sup> )	Duración del cultivo (semanas)
Esquema 1		
1	13.3	16.0
2	18.3	15.3
3	23.3	14.5
4	28.3	13.8
5	33.3	13.0
Esquema 2		
1	14.3	19.0
2	19.0	18.5
3	23.8	18.0
4	28.6	17.5
5	33.3	17.0
Esquema 3		
1	10.0	20.0
2	15.8	19.3
3	21.7	18.5
4	27.5	17.8
5	33.3	17.0

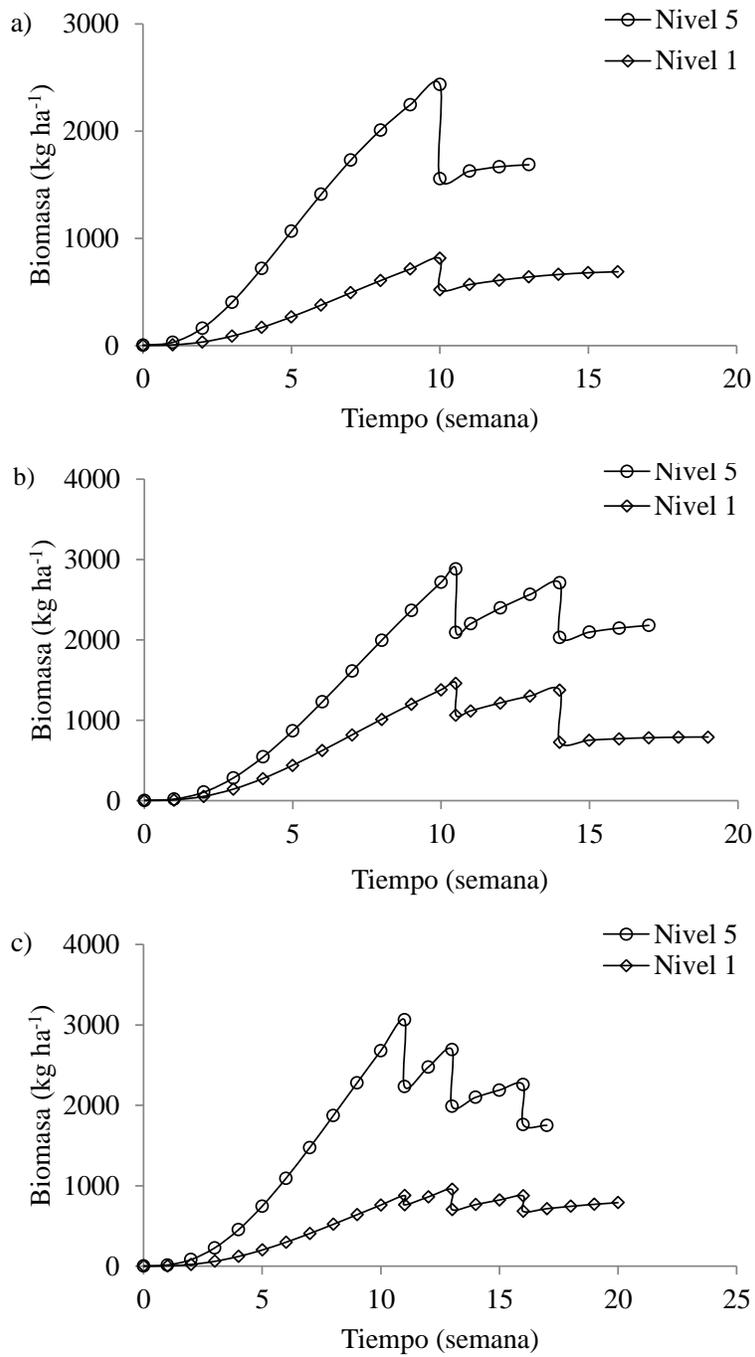


Figura 6. Biomasa calculada utilizando valores extremos de las variables de manejo, al peor y mejor nivel (1 y 5, respectivamente), con una pre-cosecha (a), dos pre-cosechas (b) y tres pre-cosechas (c).

Los valores promedio de las producciones mínima y máxima en el Esquema 1 fueron 981 y 2 573 kg ha<sup>-1</sup>, representando un incremento de 162 %; en el Esquema 2 fueron 1 808 y 3 602 kg ha<sup>-1</sup>, lo cual representa un incremento de 99 %; mientras que en el Esquema 3 la fueron 1 364 y 3 834 kg ha<sup>-1</sup>, significando un incremento de 181 % (Cuadro 9).

Los estanques de la base de datos que mejor se aproximaron a las condiciones simuladas con los Niveles 1 y 5 para el Esquema 1 se sembraron a 13,3 y 33,3 PL m<sup>-2</sup>, y la duración del cultivo duró 13 semanas, con una producción total de 983 y 2 660 kg ha<sup>-1</sup>. Estos valores de rendimiento se aproximan cercanamente a las producciones medias de 981 y 2 573 kg ha<sup>-1</sup> obtenidos con la simulación.

Para el Esquema 2, los estanques de la base de datos que tuvieron mayor similitud con las condiciones simuladas para esos mismos niveles de manejo se sembraron a 14,3 y 33,3 PL m<sup>-2</sup> y la duración del cultivo fue de 18 y 19 semanas, con producciones medias de 1 982 y 3 542 kg ha<sup>-1</sup>, valores cercanos a la biomasa calculada mediante las simulaciones, las cuales fueron de 1 808 y 3 602 kg ha<sup>-1</sup>.

Los estanques con más similitud a lo simulado para el Esquema 3 se sembraron a 10.0 y 33.3 PL m<sup>-2</sup> y la duración del cultivo fue de 17 y 19 semanas, con una producción de 1 304 y 3 855 kg ha<sup>-1</sup>, cercanos a la biomasa proyectada por las simulaciones, las cuales fueron de 1 364 y 3 834 kg ha<sup>-1</sup>. Con base en esto, se considera que los resultados obtenidos de la simulación de las estrategias de manejo son razonablemente aceptables.

Los valores decrecientes de los coeficientes de variación indicaron que, a excepción del Esquema 2, las mejoras en el manejo no solo aumentaron la producción media total cosechada, sino que también disminuyó la variabilidad, por lo que la confianza en obtener las

biomasas calculadas se incrementó al pasar del Nivel de manejo 1 al 5 (Cuadro 9). En general, el rendimiento promedio de los 5 niveles de manejo del Esquema 2, son claramente superiores a los del Esquema 1 y ligeramente mayores que los del Esquema 3. El esquema 1 tuvo menores rendimientos que los otros particularmente debido a las menores duraciones de cultivo que se manejan (Cuadro 8), lo que impide que el camarón alcance tallas comparables a las obtenidas con los otros esquemas. Los mayores rendimientos de biomasa se obtuvieron con el Esquema 3 al Nivel de manejo 5 (Cuadro 9).

Con el Esquema 1, cuando se realiza el peor manejo, hay 95 % de confianza de que la producción total varíe entre 775 y 1 215 kg ha<sup>-1</sup>, promediando 981 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 7a); mientras que con el mejor manejo puede variar entre 2 127 y 3 090 kg ha<sup>-1</sup> con una media 2 573 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 7b). Con el Esquema 2 se tiene 95 % de confianza de que la producción puede ir desde 1 359 hasta 2 296 kg ha<sup>-1</sup>, con una producción media de 1 808 kg ha<sup>-1</sup> para el peor nivel de manejo (Figura 7c); y desde 2 651 hasta a 4 675 kg ha<sup>-1</sup>, con una media de 3 602 kg ha<sup>-1</sup> para el mejor nivel de manejo (Figura 7d). Usando el peor manejo, con el Esquema 3 se tiene 95 % de confianza de que la producción varíe entre 1 092 y 1 696 kg ha<sup>-1</sup>, con una producción media de 1 364 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 7e); y con el mejor manejo, desde 3 123 hasta 4 686 kg ha<sup>-1</sup>, promediando 3 834 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 7f).

Cuadro 9. Cálculo de la biomasa y su variabilidad para los diferentes esquemas de producción y niveles de manejo.

Nivel de manejo	Biomasa promedio (kg ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar (kg ha <sup>-1</sup> )	Coefficiente de variación
Esquema 1			
1	981	117	0.119
2	1 373	154	0.112
3	1 779	192	0.108
4	2 179	223	0.103
5	2 573	256	0.099
Promedio	1 777	188	0.108
Esquema 2			
1	1 808	241	0.133
2	2 331	318	0.136
3	2 809	388	0.138
4	3 231	458	0.142
5	3 602	530	0.147
Promedio	2 756	387	0.139
Esquema 3			
1	1 364	157	0.115
2	2 020	228	0.113
3	2 630	287	0.109
4	3 227	345	0.107
5	3 834	404	0.105
Promedio	2 615	284	0.110

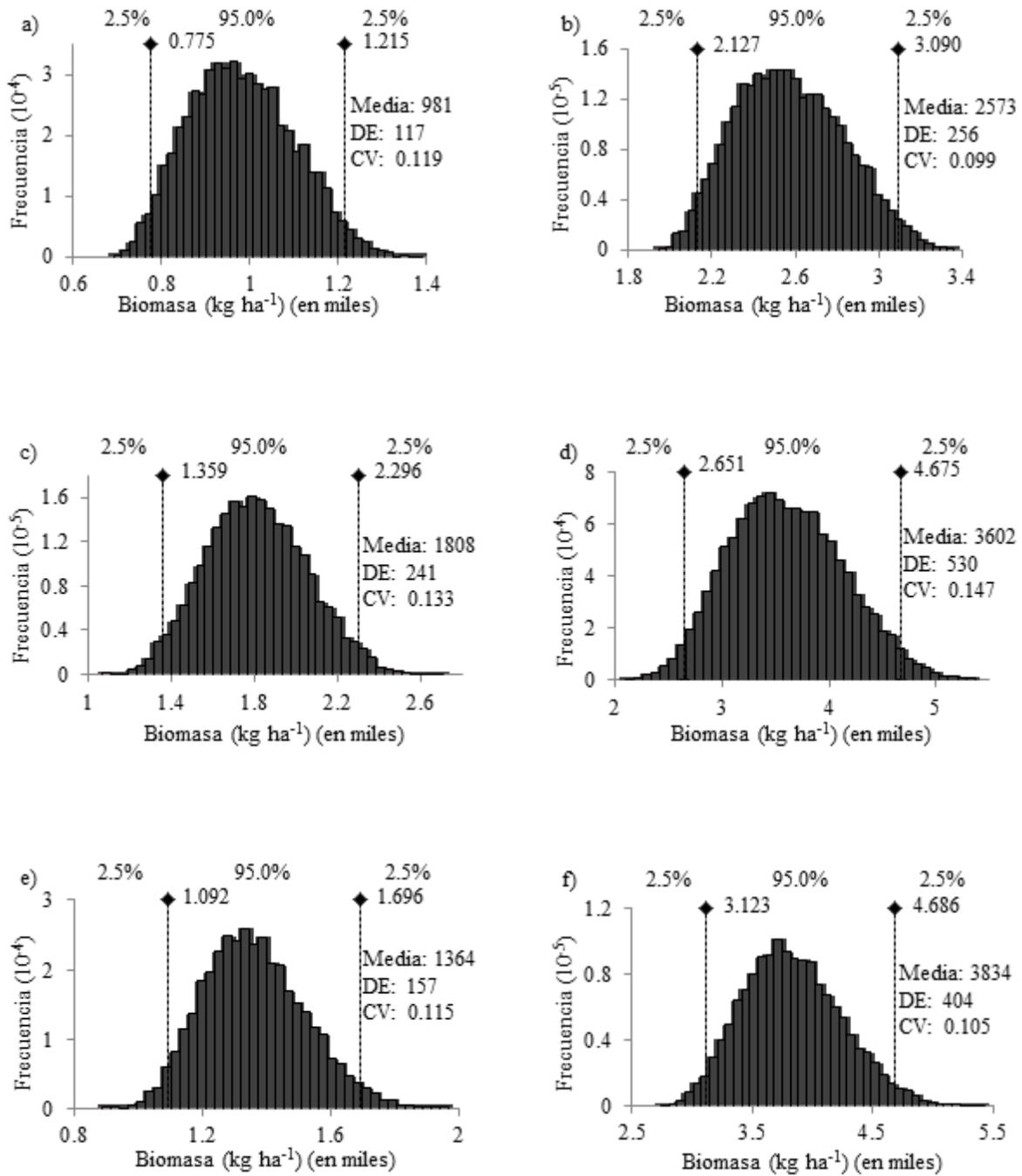


Figura 7. Distribuciones de probabilidad de la producción de biomasa al Nivel 1 y 5 (el peor y el mejor) para los tres esquemas: con una pre-cosecha (a, b), con dos pre-cosechas (c, d) y con tres pre-cosechas (e, f).

### 5.1.7. Sub-modelo económico

#### 5.1.8. Elementos estocásticos del sub-modelo económico

Los ajustes, mediante regresión lineal, del precio del alimento así como el de la postlarva en función del tiempo fueron satisfactorios y significativos en términos del análisis de varianza de la regresión ( $P < 0.05$ ) (Figuras 8 y 9). Los resultados de los ajustes de distribuciones de probabilidad a los valores residuales resultantes de los análisis de regresión se presentan en el Cuadro 10. En ese mismo cuadro se presentan los parámetros de la distribución usada para el cálculo de la variabilidad anual del precio del camarón.

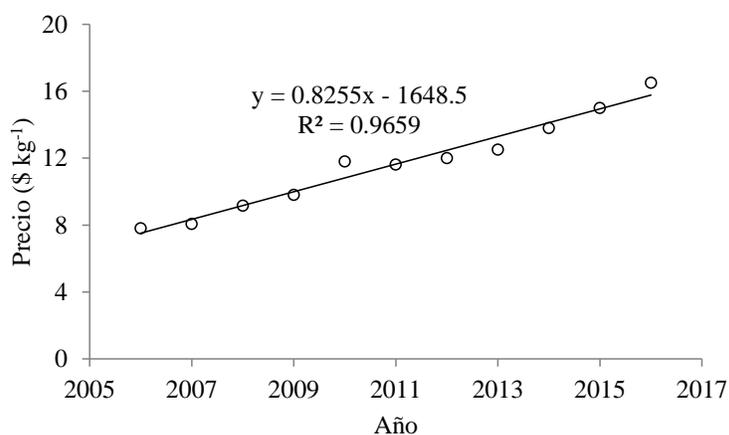


Figura 8. Ajuste de modelo lineal simple a los precios históricos del alimento.

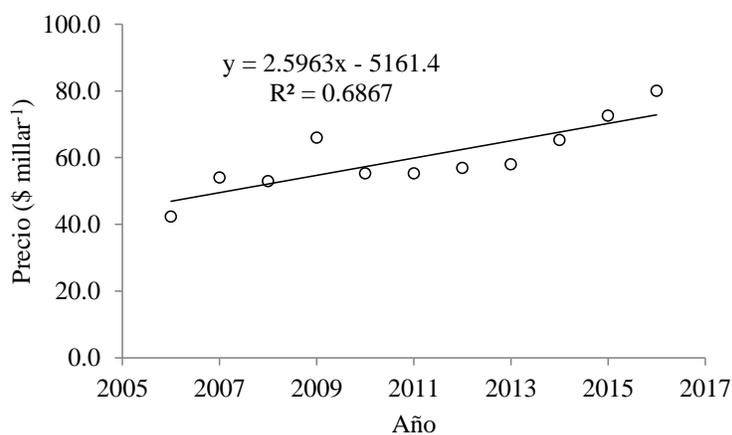


Figura 9. Ajuste de modelo lineal simple a los precios históricos del precio de postlarva.

Cuadro 10. Distribuciones normales ajustadas al error residual ( $\varepsilon$ ) de los modelos de regresión lineal simple del precio del alimento, de la postlarva y a los precios anuales del camarón ( $\mu = 0$ ).

Parámetro	Elemento estocástico	Parámetro	Elemento estocástico	Parámetro	Elemento estocástico
Precio del alimento	$\varepsilon = \text{normal } (\sigma = 0.515)$	Precio de la postlarva	$\varepsilon = \text{normal } (\sigma = 5.816)$	Precio del camarón	$\varepsilon = \text{normal } (\sigma = 13.912)$

### 5.1.9. Niveles de manejo de la utilidad

En general, tanto la utilidad como el resto de los indicadores económicos mejoran conforme aumenta el nivel de manejo (Cuadro 11). La producción en el punto de equilibrio, si bien no muestra una tendencia clara a aumentar o disminuir, también refleja un efecto positivo tomando en cuenta que, al incrementarse la producción con la mejora en el manejo (Cuadro 9), la producción necesaria para lograr el equilibrio resulta proporcionalmente menor en la medida en que el manejo es más adecuado. En general, el mejor desempeño promedio de los indicadores económicos se observó con el Esquema 3 (Cuadro 11).

### 5.1.10. Análisis de incertidumbre de la utilidad

En términos generales la incertidumbre de la utilidad disminuye al incrementar el nivel de manejo, con excepción del Esquema 2, en el cual alcanza un mínimo con el Nivel 3. La máxima incertidumbre se presenta con el Esquema 1, mientras que la menor se obtiene con el Esquema 3 (Cuadro 11).

Los resultados de la simulación Monte Carlo indicaron que para el Esquema 1 y al peor nivel de manejo, hay 95 % de confianza de que la utilidad puede variar desde pérdidas económicas de \$11 400 ha<sup>-1</sup> hasta ganancias de \$25 200 ha<sup>-1</sup>, con una utilidad media de \$5 369 ha<sup>-1</sup> (Figura 10a); con el mejor nivel de manejo, hay 95 % de confianza de que la utilidad puede variar entre \$5 100 ha<sup>-1</sup> y \$91 300 ha<sup>-1</sup>, con una media de \$45 699 ha<sup>-1</sup> (Figura 10b). En el Esquema 2, con el peor manejo hay 95 % de confianza de que la utilidad puede variar desde \$13 700 ha<sup>-1</sup> hasta \$85 500 ha<sup>-1</sup>, promediando \$46 543 ha<sup>-1</sup> (Figura 10c); y que con el mejor manejo y la misma confianza la utilidad puede variar desde \$32 500 ha<sup>-1</sup> hasta \$170 400 ha<sup>-1</sup> con una utilidad media de \$93 723 ha<sup>-1</sup> (Figura 10d). En el Esquema 3, con la misma confianza, el peor manejo produce utilidades entre \$2 400 ha<sup>-1</sup> y \$57 000 con un promedio de \$26 670 ha<sup>-1</sup> (Figura 10e); mientras que el mejor manejo produce entre \$64 100 ha<sup>-1</sup> hasta \$198 500 ha<sup>-1</sup>, con una media de \$124 990 ha<sup>-1</sup> (Figura 10f).

Cuadro 11. Indicadores del desempeño económico y su variabilidad.

N	D	DC	U	CV	B/C	CV	PPE	CV	PACI	CV
Esquema 1										
1	13.3	16	5 369	1.731	1.093	0.148	887	0.504	92.5	0.535
2	17.9	15.3	15 953	0.786	1.229	0.145	911	1.233	68.9	1.293
3	22.5	14.5	26 400	0.590	1.320	0.141	860	0.989	50.7	1.045
4	27.1	13.8	36 078	0.516	1.375	0.139	875	0.764	42.2	0.781
5	31.7	13	45 699	0.478	1.416	0.140	857	0.721	35.0	0.742
Promedio	22.5	14.5	25 900	0.820	1.287	0.143	878	0.842	57.9	0.879
Esquema 2										
1	14.3	18.2	46 543	0.397	1.553	0.130	678	0.224	36.9	0.296
2	19.1	18.2	61 146	0.375	1.614	0.130	706	0.223	30.8	0.297
3	23.8	18.3	79 923	0.356	1.705	0.132	685	0.236	25.4	0.315
4	28.6	18.4	88 416	0.363	1.706	0.135	717	0.258	23.8	0.340
5	33.3	18.4	93 723	0.378	1.692	0.138	753	0.268	23.0	0.353
Promedio	23.8	18.3	73 950	0.374	1.654	0.133	708	0.242	28.0	0.320
Esquema 3										
1	10	20	26 670	0.521	1.373	0.138	724	0.235	54.1	0.290
2	15.8	19.3	54 409	0.374	1.601	0.136	689	0.224	34.7	0.278
3	21.7	18.5	80 180	0.321	1.747	0.134	658	0.213	25.5	0.269
4	27.5	17.8	98 846	0.299	1.801	0.130	664	0.205	20.9	0.263
5	33.3	17	124 990	0.275	1.900	0.129	627	0.199	16.6	0.255
Promedio	21.7	18.5	77 019	0.358	1.684	0.133	672	0.215	30.4	0.271

*N*, nivel de manejo.

*B/C*, relación beneficio-costo.

*D*, densidad (PL m<sup>-2</sup>).

*PPE*, producción en el punto de equilibrio (kg ha<sup>-1</sup>).

*DC*, duración del cultivo (semanas).

*PACI*, porcentaje de aprovechamiento de la capacidad

*U*, utilidad (MX \$).

instalada (%).

*CV*, coeficiente de variación.

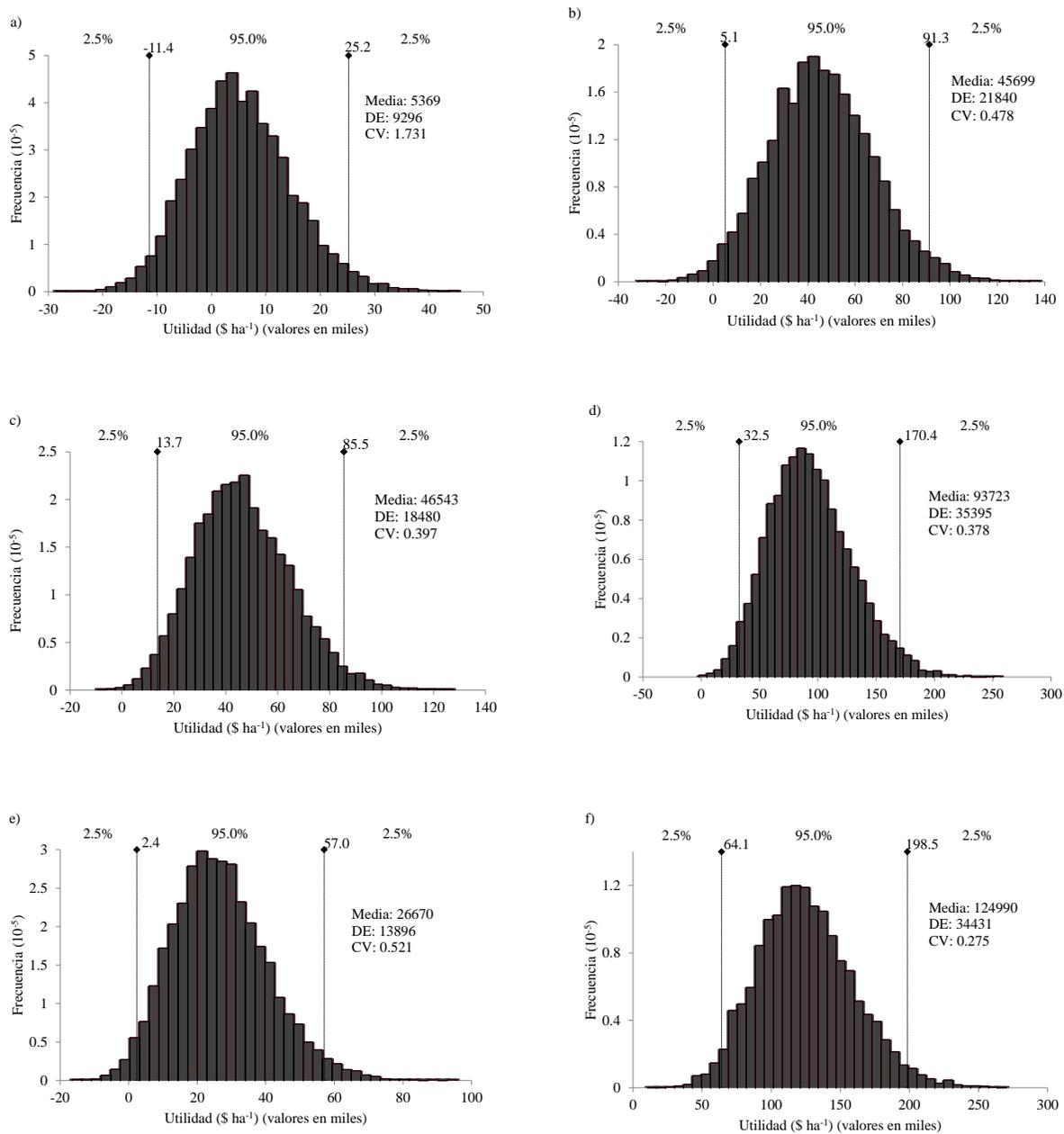


Figura 10. Distribuciones de probabilidad de la utilidad al Nivel 1 y 5 (el peor y el mejor) para los esquemas con una pre-cosecha (a, b), con dos pre-cosechas (c, d) y con tres pre-cosechas (e, f).

El análisis de incertidumbre mostró que cuando se consideran 11, 15 y 16 estanques para cada esquema de producción, el promedio de los coeficientes de variación disminuyeron en comparación con la variabilidad proyectada para un solo estanque para cada esquema. Los coeficientes de variación disminuyeron 69.9 % (Esquema 1), 74.2 % (Esquema 2) y 75.0 % (Esquema 3), (Cuadro 12).

Cuadro 12. Coeficientes de variación (CV) de la utilidad de una granja con uno y con múltiples estanques para los tres esquemas de producción a los diferentes niveles de manejo (N1 a N5).

Nivel de manejo	Esquema 1		Esquema 2		Esquema 3	
	1	11	1	15	1	16
	Estanque CV	Estanques CV	Estanque CV	Estanques CV	Estanque CV	Estanques CV
N1	1.731	0.518	0.397	0.101	0.521	0.131
N2	0.786	0.233	0.375	0.096	0.374	0.093
N3	0.590	0.182	0.356	0.093	0.321	0.081
N4	0.516	0.156	0.363	0.095	0.299	0.075
N5	0.478	0.146	0.378	0.098	0.275	0.068
Promedio	0.820	0.247	0.373	0.096	0.358	0.089

#### 5.1.11. Análisis de sensibilidad

En el esquema 1 y con los niveles de manejo 1 y 5, se observó mayor sensibilidad de la utilidad a los precios del camarón en la cosecha final, a la tasa instantánea de mortalidad ( $z_1$ ) y a los parámetros del FCA; se presentó sensibilidad intermedia al precio de venta del camarón

en la precosecha y al coeficiente de crecimiento ( $k$ ), y la menor sensibilidad fue a los precios del alimento y la postlarva y oxígeno disuelto ( $OD$ ). Al pasar del Esquema 1 al 5 el peso final tiende a ser más importante (Figura 11a y 11b).

En el caso del Esquema 2, se observó mayor sensibilidad al peso final del camarón ( $W_f$ ), a la tasa instantánea de mortalidad de la primera fase ( $z_1$ ), a los parámetros de la ecuación para el cálculo del factor de conversión alimenticia y al coeficiente de crecimiento ( $k$ ). También se observó sensibilidad intermedia a los precios de venta del camarón al momento de la cosecha final y una menor sensibilidad a los precios de venta del camarón al momento de las pre-cosechas (Figura 12a y 12b).

Para el Esquema 3 se encontró que los parámetros más sensibles fueron los mismos que los identificados para el Esquema 2, que se presentó sensibilidad intermedia a la temperatura del agua ( $T$ ), al precio del camarón a la cosecha final y al de la tercera precosecha, y que los menos importantes fueron la tasa de mortalidad de la última fase, el precio del alimento y el precio de venta del camarón de la primera y segunda pre-cosechas, (Figura 13a y 13b).

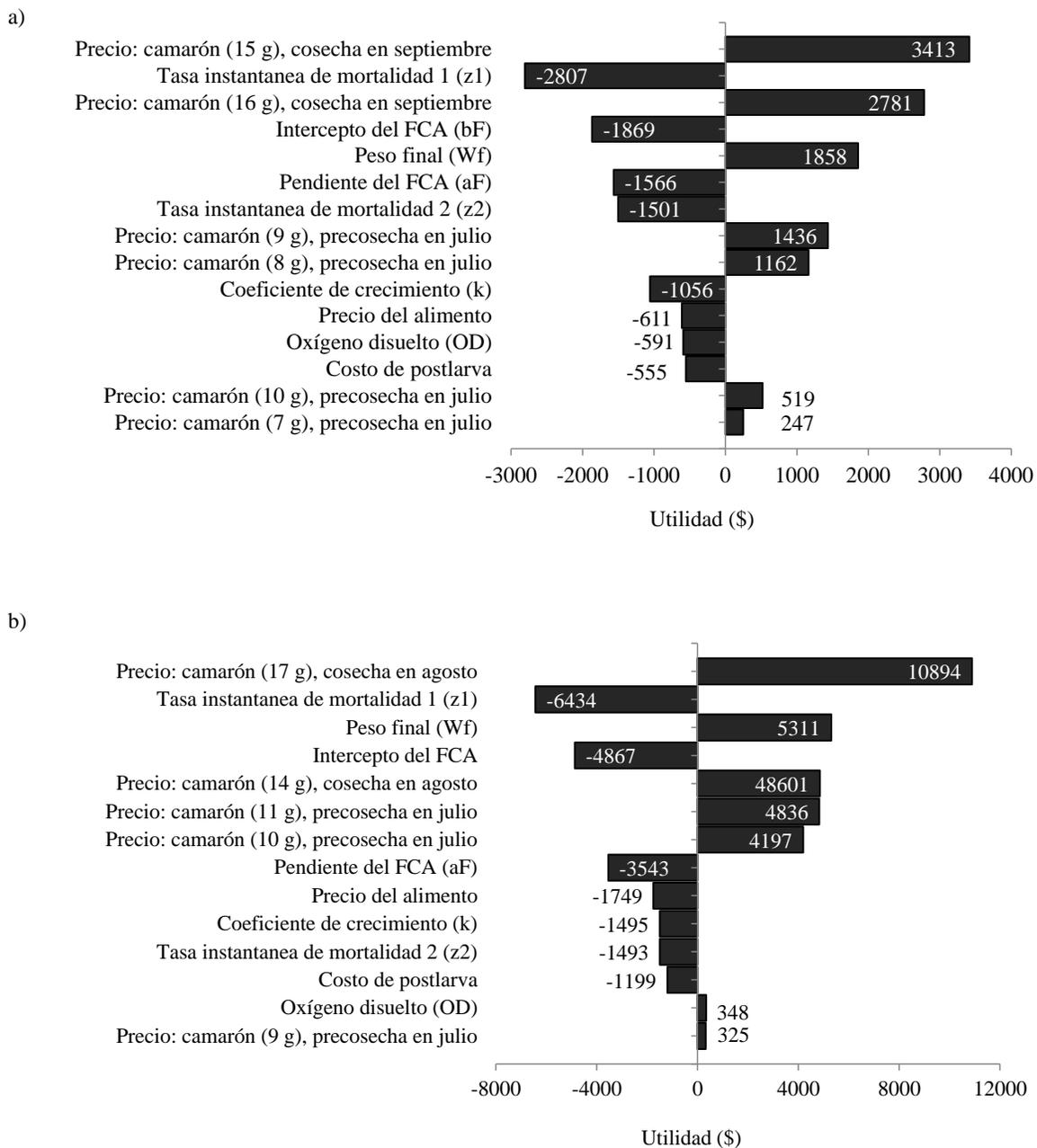


Figura 11. Análisis de sensibilidad de la utilidad del Esquema 1, a las variables de calidad del agua, a los parámetros del modelo de producción, del factor de conversión alimenticia y a los del submodelo económico. Nivel de manejo 1 (a) y Nivel de manejo 5 (b).

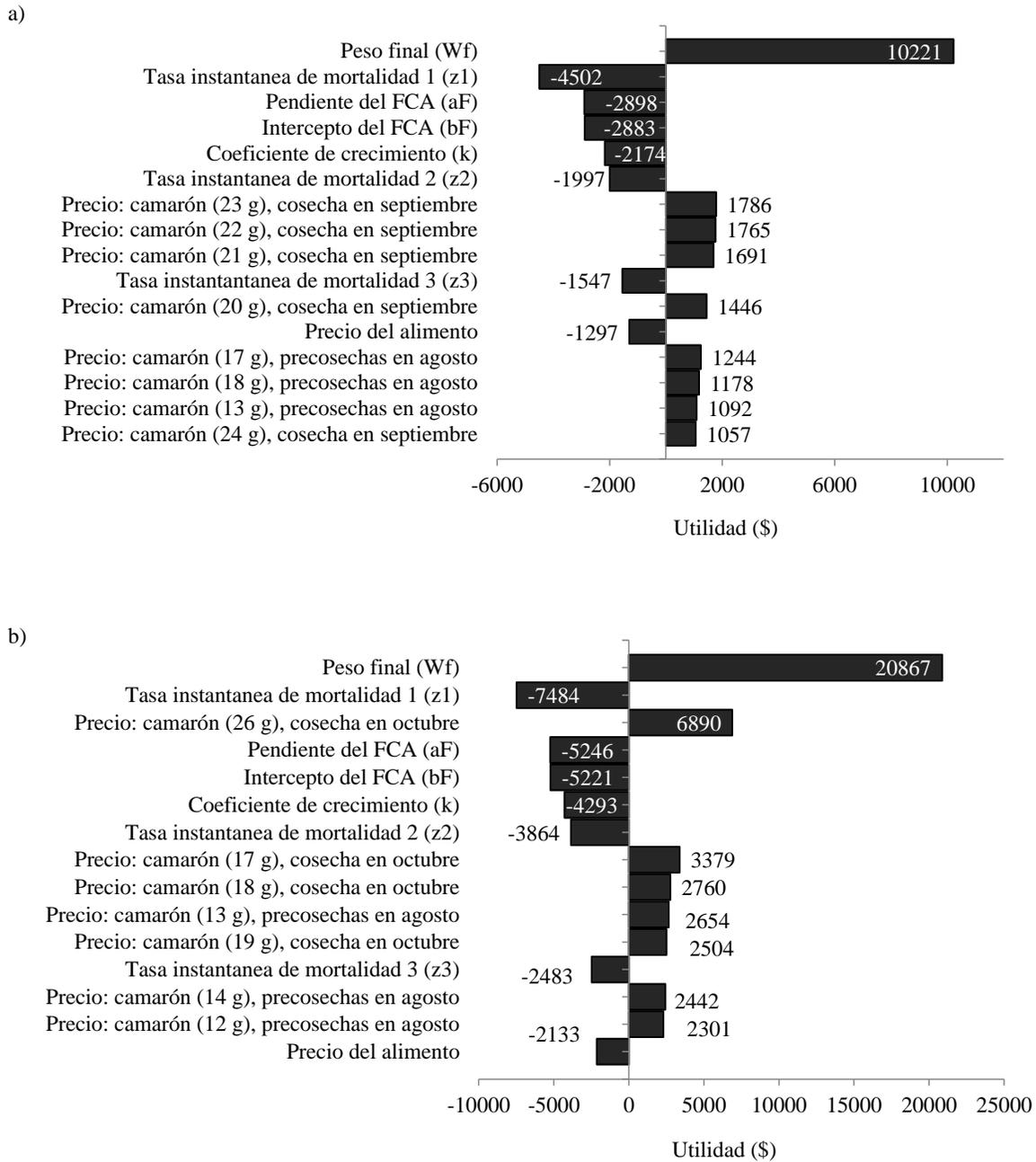


Figura 12. Análisis de sensibilidad de la utilidad del Esquema 2, a las variables de calidad del agua, a los parámetros del modelo de producción, del factor de conversión alimenticia y a los del submodelo económico. Nivel de manejo 1 (a) y Nivel de manejo 5 (b).

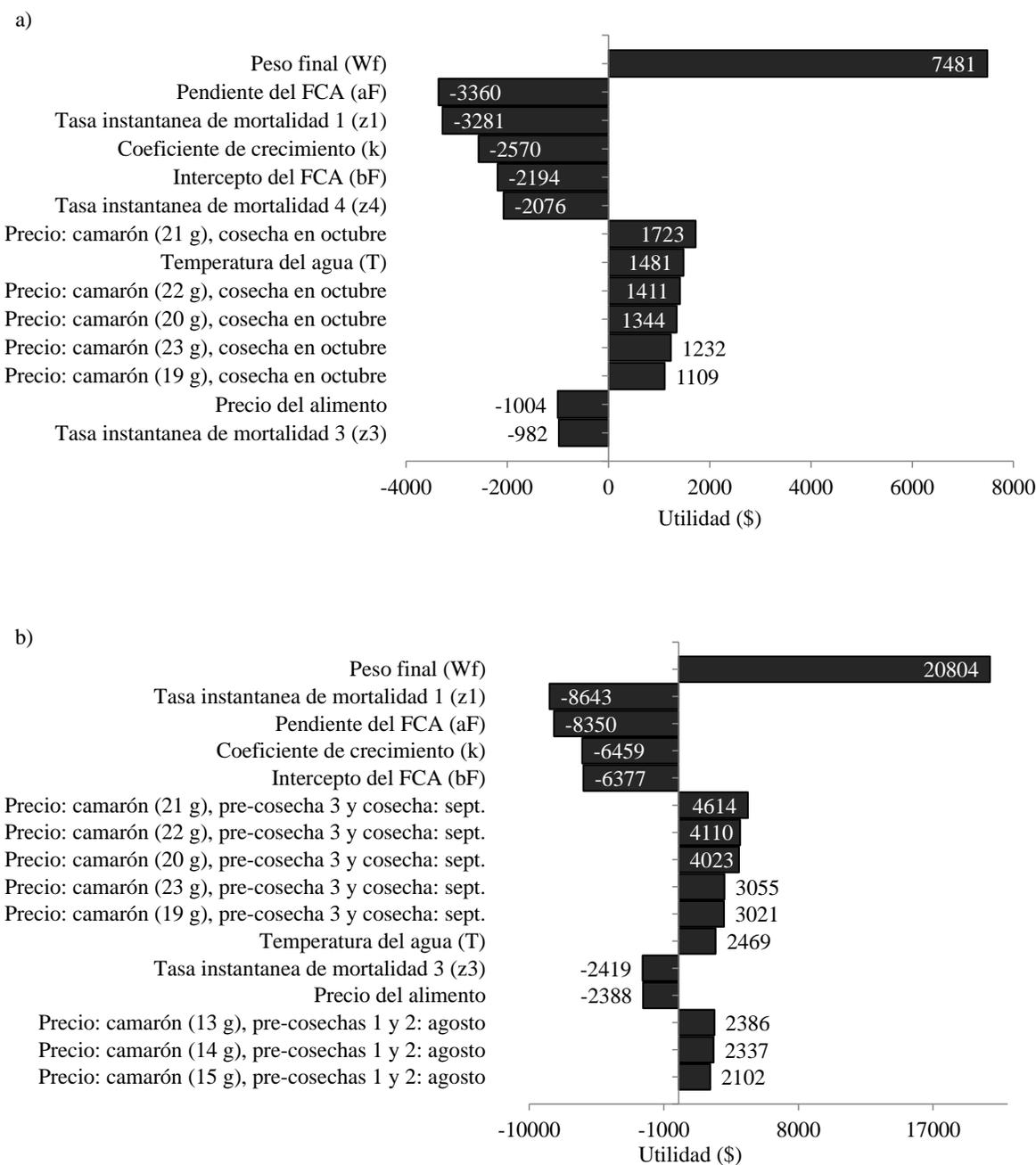


Figura 13. Análisis de sensibilidad de la utilidad del Esquema 3, a las variables de calidad del agua, a los parámetros del modelo de producción, del factor de conversión alimenticia y a los del submodelo económico. Nivel de manejo 1 (a) y Nivel de manejo 5 (b).

## VI. DISCUSIÓN

Los resultados de las pruebas de identidad y de equivalencia indicaron que los sub-modelos biológico y el de manejo y calidad del agua describieron adecuadamente la producción semi-intensiva de camarón cuando se usan programas alternativos de pre-cosechas. Los ajustes satisfactorios de dichos sub-modelos permitieron calcular con buena aproximación la biomasa registrada en la base de datos para los estanques que más se aproximaron a las condiciones simuladas para el peor y mejor nivel de manejo. No obstante, es recomendable que, antes de intentar mejorar la producción sobre la base de estos resultados, se lleven a cabo pruebas experimentales para confirmar las predicciones del modelo.

La curva de crecimiento usada en este estudio ha sido previamente utilizada en modelos de producción para el cálculo de la biomasa de camarón bajo diferentes condiciones de cultivo (Ruiz-Velazco et al. 2010a,b; Hernández-Llamas et al., 2013; Gonzalez-Romero et al., 2014), y ha probado ser adecuada para describir el crecimiento del camarón en condiciones de cultivos intensivos usando esquemas de producción en los cuales se realizan tres pre-cosechas en las condiciones en que se realizan en el estado de Nayarit (Estrada-Pérez et al. 2016).

El modelado de la supervivencia del camarón se basó en el enfoque utilizado por Ruiz-Velazco et al. (2010b), quienes utilizaron una ecuación exponencial para simular un solo evento de mortalidad del camarón causada por el virus del síndrome de la mancha blanca. En esta investigación, las pre-cosechas fueron equivalentes a las pérdidas de población resultantes de la enfermedad, pero en esos casos, la disminución de la población se observa durante varios días, mientras que en las pre-cosechas la disminución de la población es abrupta, ya que la

precosecha se realiza en el transcurso de una sola noche. Estrada-Pérez et al. (2016) usaron el modelo difásico desarrollado por Ruiz-Velazco et al. (2015) para analizar la producción incorporando tres pre-cosechas en condiciones de producción intensiva. A pesar de que el modelo desarrollado por Ruiz-Velazco et al. (2015) también describe caídas abruptas, el modelo utilizado en esta investigación es más simple, desde el punto de vista matemático, y describió y calculó adecuadamente la supervivencia.

Los modelos de regresión lineal múltiple se consideran herramientas predictivas más que explicativas, sin embargo, el sub-modelo biológico junto con el de manejo y calidad del agua, además de mostrar un ajuste adecuado a los datos de producción de la base de datos, también coinciden, en términos generales, con lo reportado por otros autores, en lo relativo a correlaciones que existen entre los parámetros de crecimiento y supervivencia del camarón y variables de manejo y calidad del agua. Sadeh et al. (1986) y Ruiz-Velazco et al. (2013) reportaron un efecto adverso de la densidad de siembra sobre el crecimiento del camarón. En coincidencia con lo señalado por esos autores, en esta investigación se encontró que, en los esquemas de producción 1 y 2, las altas densidades causaron bajo peso final del camarón.

Por otra parte, en el Esquema 3 se encontró un efecto adverso de la densidad de siembra sobre la supervivencia del camarón, aunque no hubo evidencia de dicho efecto en los otros esquemas de producción. Ello puede atribuirse a la mayor amplitud del intervalo de la densidad de siembra registrado en la base de datos para el Esquema 3 (10.3-33.3 PL m<sup>-2</sup>), comparado con los intervalos del Esquema 1 (13.3-33.3 PL m<sup>-2</sup>) y el Esquema 2 (14.3-33.3 PL m<sup>-2</sup>), lo cual permitió que se reflejara la influencia de la densidad de siembra.

El coeficiente de crecimiento ( $k$ ) no tiene una interpretación biológica directa y su función principal es adecuar el ajuste de la ecuación a los datos de crecimiento. Las relaciones estadísticas del coeficiente que pudieron establecerse en este trabajo con la duración del cultivo y el oxígeno disuelto sirven principalmente para el cálculo del coeficiente, más que para fines explicativos sobre el crecimiento del camarón.

El coeficiente  $a_F$  para el cálculo del FCA estima la velocidad con que éste se incrementa en función del tiempo de cultivo y, en el Esquema 1, se encontró que dicha velocidad se incrementa en la medida en que la densidad de siembra también lo hace, indicando una menor eficiencia en el aprovechamiento del alimento cuando el camarón se cultiva a altas densidades. Este resultado coincide con lo referido por Sanchez-Zazueta et al. (2013), quienes encontraron que, en términos generales, el FCA aumenta cuando la densidad de siembra se incrementa. La explicación más probable de esta situación es que el camarón, cuando se cultiva a bajas densidades, puede hacer un mejor aprovechamiento nutricional de la producción natural del estanque, mejorando así el FCA (Zaki et al., 2004; Shakir et al., 2014).

En el Esquema 2 se observó que la velocidad con que se incrementa el FCA fue menor cuando la duración total del cultivo fue mayor. En coincidencia con lo señalado por Hasan et al. (2013), ello puede explicarse considerando que, mientras más se prolongue el cultivo, la mortalidad natural del camarón es mayor, lo que produce una disminución de su densidad poblacional y mayor disponibilidad y aprovechamiento de la productividad natural por parte de la población sobreviviente. En última instancia, ello se ve reflejado en un mayor peso final individual del camarón y en un aprovechamiento más eficiente del total del alimento suministrado.

Con respecto al Esquema 3, a diferencia con lo reportado por Sanchez-Zazueta et al. (2013) quienes no encontraron relación del FCA con la temperatura, aquí se encontró que a temperaturas mayores se tiene un aumento de la eficiencia en el aprovechamiento del alimento proporcionado. Este resultado coincide con lo reportado por Wyban et al., (1995), quienes encontraron que con tallas medias de camarón, los incrementos de temperatura disminuyen el FCA.

En esta investigación se encontró que, en general y de acuerdo con los valores del coeficiente de variación, el Esquema 1 es el más confiable en términos de producción, aunque también es el que implica mayor incertidumbre cuando se evalúa desde el punto de vista económico; el Esquema 2 es el de mayor incertidumbre en términos de producción, pero ofrece un nivel de confianza intermedio en su desempeño económico; y el Esquema 3 ofrece un nivel intermedio de confianza en la producción y es el más confiable desde el punto de vista económico.

Por otra parte, también se observó que, bajo los Esquemas 1 y 3, en la medida en que mejoró el manejo, la confianza en los resultados productivos y económicos también se incrementó; mientras que bajo el Esquema 2 la incertidumbre en la producción y en la relación beneficio-costos se incrementó sistemáticamente. Estas diferencias en la incertidumbre entre los esquemas son, en parte, consecuencia del nivel de control sobre los parámetros de producción ejercidos a través del manejo. En los Esquemas 1 y 3, la incertidumbre se reduce más eficientemente porque el número de parámetros bajo control es mayor que en el Esquema 2, donde sólo el peso final del camarón se controla mediante el manejo de la densidad de siembra. Esto no implica que el Esquema 2 sea necesariamente más incierto que los otros, sino

que con el nivel actual del conocimiento de este esquema de pre-cosechas, la base de datos sólo permite detectar un solo control sobre la producción. Es probable que un tamaño de muestra mayor del Esquema 2 pudiera servir para detectar y establecer más controles.

El Esquema 2 mostró un incremento en la confianza de obtener las utilidades esperadas a medida que se mejoró el manejo hasta el Nivel 3, a partir del cual la mejoría del manejo se tradujo en mayor incertidumbre. Ello se explica considerando que durante los primeros tres niveles de manejo, la confianza que progresivamente se gana en la obtención de la utilidad es más que suficiente para compensar la confianza que se pierde en producir los rendimientos en biomasa correspondientes. No obstante, del nivel 4 en adelante, la tasa con que se incrementan los valores medios de la utilidad no es suficiente para compensar la tasa con la que se incrementa la variabilidad, lo que produce un incremento progresivo del coeficiente de variación y de la incertidumbre.

Los peores resultados productivos y económicos que se obtienen con el Esquema 1 son consecuencia de que los productores seleccionan, con base en su experiencia, los estanques con pobre desempeño productivo para llevar a cabo dicho Esquema. Normalmente, en dichos estanques se presentan mayores mortalidades y, para minimizar el riesgo de pérdidas económicas, los granjeros los utilizan para llevar a cabo ciclos de producción cortos que sólo les permite realizar una pre-cosecha. La supervivencia significativamente menor que se observó para el Esquema 1, confirma esta decisión de manejo por parte de los productores.

Con base en los resultados mencionados anteriormente puede afirmarse que la hipótesis establecida para este trabajo de investigación es correcta, ya que el esquema de tres pre-cosechas rinde mayores utilidades y relaciones beneficio-costos que los otros esquemas.

Además, con dicho esquema se tiene menor incertidumbre en obtener los resultados económicos esperados. Así, resulta recomendable que, en la medida de lo posible, se realicen tres cosechas, pues con ello se obtiene la mayor rentabilidad al mismo tiempo que la menor incertidumbre.

Tal recomendación puede hacerse en forma directa, en tanto que con ella se maximizan los beneficios esperados y la confianza en obtenerlos. No obstante, pueden presentarse casos particulares que resulten conflictivos, como lo que ocurre entre los niveles de manejo 3 y 5 del Esquema 2, pues con el primero de ellos se disminuye la incertidumbre, mientras que con el segundo se obtienen las mayores utilidades. 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 (Clamen 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.

Una situación conflictiva similar se presenta en el mismo Esquema 3, en tanto que con el nivel de manejo 5 se maximizan las utilidades, pero con el nivel 3 se obtienen los mayores rendimientos por peso invertido, según lo indica el correspondiente valor de la relación beneficio-costos. La selección del nivel a manejar dependerá, entonces, de las preferencias del productor por alguno de los indicadores económicos.

Los valores de la producción en el punto de equilibrio (PPE) y el porcentaje de aprovechamiento de la capacidad instalada (PACI), indicaron que fue mejor el Esquema 3 con el mejor nivel de manejo (Nivel 5), estableciéndose que es necesario producir al menos 627 kg

ha<sup>-1</sup> para no tener pérdidas (16.60 % de la capacidad instalada). El análisis de un sistema intensivo de *L. vannamei* le permitió a Ruiz-Velazco (2011) establecer que es necesario producir 4 300 kg ha<sup>-1</sup> (43.07 % de la capacidad de la granja) para que no se generen pérdidas. En el mismo sentido, para la producción intensiva de *L. stylirostris*, se requiere que la granja opere al menos a un 53 % de la capacidad instalada para que no se registren pérdidas económicas (Hernandez-Llamas et al., 2004). Lo anterior indica una mayor eficiencia económica de la tecnología de cultivo semi-intensiva de camarón blanco que incorpora el esquema de pre-cosechas, comparada con las de otros cultivos de camarón.

Se observó una disminución de la incertidumbre de la utilidad al aumentar la cantidad de estanques de la granja. La razón por la que la incertidumbre es menor cuando se emplea un mayor número de estanques consiste en que, si por cuestiones aleatorias se obtienen resultados pobres en algunos de los estanques, ello se puede compensar con buenos resultados que, también por azar, son posibles de obtener en otros estanques, lo que produce que, en promedio, se reduzca la incertidumbre cuando se le compara con el comportamiento aleatorio de un solo estanque. De acuerdo con el teorema del límite central de la estadística, se espera que ocurra una disminución de la variabilidad de la media al aumentar el tamaño de la muestra (el número de estanques, en este caso) (Vose, 2001).

El análisis de sensibilidad de la utilidad indicó que, en términos generales, los parámetros que producen mayor incertidumbre en las utilidades en los tres esquemas de producción y para los niveles extremos de manejo resultaron ser el peso final del camarón, su precio en la cosecha final, la tasa instantánea de mortalidad de la fase 1 y los parámetros de la ecuación para el cálculo del factor de conversión alimenticia. Hernandez-Llamas et al. (2004),

Ruiz-Velazco (2011) y Hernández-Llamas et al. (2013), quienes trabajaron con cultivos intensivos con *L. stylirostris* y *L. vannamei*, respectivamente, destacaron al peso final del camarón como una de las variables más importantes que afectan los indicadores económicos. Asimismo, Hatch et al. (1987), Hernández-Llamas et al. (2004), Sanchez-Zazueta y Martínez-Cordero (2009), Ruiz-Velazco (2011), Hernández-Llamas y Zarain-Herzberg (2011), Hernández-Llamas et al. (2013) y Gonzalez-Romero et al. (2014) establecieron que el precio de venta del camarón es una de las variables más sensibles a los indicadores económicos en cultivos de camarón. En general, se recomienda que los factores que generan mayor incertidumbre se midan con tamaños de muestra mayores a los empleados tradicionalmente, con el fin de mejorar la exactitud y la precisión de sus estimaciones.

## VII. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados para el presente trabajo se cumplieron satisfactoriamente, ya que se desarrolló un modelo bioeconómico que permitió analizar la producción semi-intensiva de camarón *Litopenaeus vannamei* para las condiciones del estado de Nayarit. Así mismo se analizó la utilidad económica y la incertidumbre utilizando esquemas de producción en los cuales se realizan hasta tres pre-cosechas, se propusieron esquemas de manejo que permiten incrementar los rendimientos económicos, disminuir la incertidumbre y se identificaron, mediante análisis de sensibilidad, los factores que más influyen en la incertidumbre de obtener los beneficios económicos que se esperan.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Adams, C.M., Griffin, W.L., Nichols, P. y Bricks, R.W. 1980. Application of a bio-economic-engineering model for shrimp mariculture systems. *Southern Journal of Agricultural Economics* 12:135-141.
- Allen, P.G., Botsford, L.W., Schurr, A.M. y Johnston, W.E. 1984. *Bioeconomics of Aquaculture*. New York, NY: Elsevier Science Publishers.
- Ayyub, B.M. 2014. *Risk analysis in engineering and economics*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Brummett, R.E. 2002. Comparison of African tilapia partial harvesting systems. *Aquaculture* 214:103–114.
- CESANAY. 2016. Comité Estatal de Sanidad Acuícola del Estado de Nayarit, A. C. Disponible en: <http://cesanay.org/cesanay/produccion-camaron/> (revisado el 26 de diciembre de 2016).
- Chow, S.C. y Liu, J.P. 2004. *Design and analysis of clinical trials*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Clark, C.W. 1974. *Mathematical Bioeconomics. The Optimal Management of Renewable Resources*. John Wiley & Sonso, New York. 313p.
- Clemen, R. y Reilly, T. 2014. *Making Hard Decisions with Decision Tools: An Introduction to Decision Analysis*. Southwestern, Cengage Learning, Mason, OH.
- CNA (Carta Nacional Acuícola). 2012. *Diario Oficial de la Federación*.
- CONAPESCA. 2013. *Anuario estadístico de Acuicultura y Pesca*. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca.

Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>.

Engle, C. 2010. *Aquaculture Economics and Financing*. Willey-Blackwell, Ames, IA.

FAO. 2016. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos*. Roma. 224 pp.

Forsberg, O.I. 1999. Optimal harvesting of farmed Atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest operation restrictions. *Aquaculture Economics & Management* 3:143–158.

Estrada-Pérez, A., Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernández-Llamas, A., Zavala-Leal, I. y Martínez-Cárdenas, L. 2016. Deterministic and stochastic models for analysis of partial harvesting strategies and improvement of intensive commercial production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquacultural Engineering* 70:56-62.

Franco, A.R., Ferreira, J.G. y Nobre, A.M. 2006. Development of a growth model for penaeid shrimp. *Aquaculture* 259:268–277.

Gonzalez-Romero, M. A., Hernandez-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J. M. J., Plascencia-Cuevas, T. N. y Nieto-Navarro, J. T. 2014. Stochastic bio-economic optimization of pond size for intensive commercial production of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 433:496–503.

<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.07.010>

Griffin, W.L., Hanson J.S., Brick, R.W. y Johns, M.A. 1981. Bioeconomic modeling with stochastic elements in shrimp culture. *Journal of the World Mariculture Society*. 12:94-103.

- Hasan, B.M.A., Guha, B., Datta, S. y Saha, S. 2013. Assessment of optimum stocking density for sustainable production of *Penaeus monodon* Fabricius in a semi-intensive farm of West Bengal, India. *World Journal of Fish and Marine Sciences* 5(2):159-168.
- Hatch, U., Sindelar, S., Rouse, D. y Perez, H. 1987. Demonstrating the use of risk programming for aquacultural farm management: the case of penaeid shrimp in Panama. *Journal of the World Aquaculture Society* 18:260-269
- Hauck, W.W. y Anderson, S. 1986. A proposal for interpreting and reporting negative studies. *Statistics in Medicine* 5:203–209.
- Hernández-Llamas, A. y Magallón-Barajas, F.J. 1991. Análisis bioeconómico del cultivo del camarón azul (*Penaeus stylirostris*) con fertilizantes orgánicos y alimentación balanceada. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 6(2):267-281.
- Hernandez-Llamas, A., Gonzalez-Becerril, A, Hernandez-Vazquez, S y Escutia-Zuñiga, S. 2004. Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson). *Aquaculture Research* 35:103-111.
- Hernandez-Llamas, A. y Zarain-Herzberg, M. 2011. Bioeconomic modeling and risk analysis of raising shrimp *Litopenaeus vannamei* in floating cages in northwestern Mexico: assessment of hurricane hazard, stochastic variability of shrimp and feed prices, and zootechnical parameters. *Aquaculture* 314:261–268.
- Hernández-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J.M.J. y Gomez-Muñoz, V.M. 2013. Economic risk associated with white spot disease and stochastic variability in economic, zootechnical and water quality parameters for intensive production of *Litopenaeus vannamei*. *Reviews in Aquaculture* 4:1-11.

- Llorente, I. y Luna, L. (2016). Bioeconomic modelling in aquaculture: an overview of the literature. *Aquaculture International* 24:931-948.
- Martínez, J.A. y Seijo, J.C. 2001. Economics of risk and uncertainty of alternative water exchange and aeration rates in semi-intensive shrimp culture systems. *Aquaculture Economics & Management* 5:129-146.
- Poole, R.W. 1974. *An Introduction to Quantitative Ecology*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernandez-Llamas, A. y Gomez-Muñoz, V.M. 2010a. Management of stocking density, pond size, starting time of aeration, and duration of cultivation for intensive commercial production of shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural Engineering* 43:114-119.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.08.002>
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernandez-Llamas, A., Gomez-Muñoz, V.M. y Magallon, F.J. 2010b. Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease. *Aquaculture* 300:113-119.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.12.027>
- Ruiz-Velazco A., J.M.J. 2011. Modelo bioeconómico para el análisis del riesgo del cultivo intensivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Tesis doctoral. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B.C.S.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Estrada-Pérez, M., Hernández-Llamas, A., Nieto-Navarro, J.T. y Peña-Messina, E. 2013. Stock model and multivariate analysis for prediction of semi-

- intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variables: A stochastic approach. *Aquacultural Engineering* 56:34-41.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.003>
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernandez-Llamas, A. y Gomez-Muñoz, V.M. 2015. A continuous diphasic model for prediction of survival of cultivated populations when affected by disease: The case of shrimp and white spot disease. *Aquaculture Research* 46(12): 3020–3027.  
<https://doi.org/10.1111/are.2015.46.issue-12>
- Sadeh, A., Pardy, C.R., Griffin, W. y Lawrence, A.L. 1986. Uncertainty consideration resulting from temperature variation on growth of *Penaeus stylirostris* in ponds. *The Texas Journal of Science*. 38 (2):159-172.
- Sanchez-Zazueta, E. y Martinez-Cordero, F.J. 2009. Economic risk assessment of a semi-intensive shrimp farm in Sinaloa, Mexico. *Aquaculture Economics & Management* 13:312-327.
- Sanchez-Zazueta, E., Hernández, J.M. y Martinez-Cordero, J. 2013. Stocking density and date decisions in semi-intensive shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) farming: a bioeconomic approach. *Aquaculture Research* 44:574-587.
- Shakir, C., Lipton, A.P., Manilal, A., Sugathan, S. y Selvin, J. 2014. Effect of stoking density on the survival rate and growth performance in *Penaeus monodon*. *Journal of Basic & Applied Sciences* 10:231-238.
- Valderrama, D. y Engle, C.R. 2002. Economic optimization of shrimp farming in Honduras. *Journal of the World Aquaculture Society* 33(4):398-409.

- Vose D. 2001. Risk Analysis. A Quantitative Guide. 2nd Ed., John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex. 752 p.
- Wyban, J., Walsh, W.A. y Godin, D.M. 1995. Temperature effects on growth, feeding rate and feed conversion of the Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). Aquaculture 138:267-279.
- Yu, R. y Leung, P.S., 2006. Optimal partial harvesting schedule for aquaculture operations. Marine Resource Economics 21 (3):301-315.
- Yu, R., Leung, P. y Bienfang, P. 2009. Modeling partial harvesting in intensive shrimp culture: a network-flow approach. European Journal of Operational Research 193:262-271.
- Zaki, M.A., Nour, A.A., Abdel-Rahim, M.M. y Srour, T.M. 2004. Effect of stocking density on survival, growth, feed utilization and production of marine shrimp *Penaeus semisulcatus* in earthen ponds. Egyptian Journal of aquatic Research 30:429-442.
- Zar, J.H. 2010. Biostatistical Analysis, 5th Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 960p.

## ***CURRICULUM VITAE***

### **DATOS PERSONALES**

Diciembre de 2017

**Nombre:** MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ ROMERO

**Lugar y fecha de nacimiento:** Tuxpan, Nayarit; 29/Septiembre/1973

**Correo electrónico:** bioglez@hotmail.com

### **FORMACIÓN ACADÉMICA**

**Maestría en Ciencias Pesqueras**, Universidad Autónoma de Nayarit. Fecha de obtención de grado (mención honorífica): Maestro en Ciencias Pesqueras, 12/Nov/2013. Tesis: Modelo bioeconómico para el diseño óptimo de granjas para la producción comercial intensiva de camarón blanco *Litopenaeus vannamei*: dimensión de los estanques.

- Artículo publicado: Stochastic bio-economic optimization of pond size for intensive commercial production of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*.

**Licenciatura en Biología**. Universidad Autónoma de Nayarit. Fecha de titulación: Biólogo, 14/Septiembre/2010. Opción de titulación: Examen general de egreso (EGELBio CENEVAL): Testimonio de desempeño sobresaliente.

### **Publicaciones producto de la tesis doctoral**

- Assessing uncertainty of semi-intensive production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using partial harvesting programs.
- Modelo de producción para el cultivo semi-intensivo de camarón *Litopenaeus vannamei* con el esquema de una precosecha.