

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT  
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



**BIOECONOMÍA DEL CULTIVO SEMI-INTENSIVO DE *Litopenaeus (Penaeus) vannamei* AFECTADO POR LA NECROSIS AGUDA DEL HEPATOPÁNCREAS:  
IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE FACTORES DE RIESGO.**

**M.C. NALLELY ESTRADA PÉREZ**

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

Xalisco, Nayarit. Marzo, 2020



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT  
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS**

Xalisco, Nayarit; 25 de febrero de 2020.

**M.C. GLORIA MACHAIN IBARRA  
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
NIVEL SUPERIOR Y POSGRADO  
P R E S E N T E.**

Con base al oficio de fecha 16 de diciembre de 2019, enviado por los CC. Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velazco Arce, Dr. Alfredo Hernández Llamas, Dr. Francisco Javier Valdez González, Dra. Viridiana Peraza Gómez y Dr. Juan Manuel Pacheco Vega, donde se indica que el trabajo de tesis cumple con lo establecido en forma y contenido, y debido a que ha finalizado con los demás requisitos que establece nuestra institución, se autoriza a la **M.C. Nallely Estrada Pérez**, continúe con los trámites necesarios para la presentación del examen de grado de Doctorado en Ciencias Biológico Agropecuarias en el Área de Ciencias Pesqueras.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
*"Por lo Nuestro a lo Universal"*



Dr. Juan Diego García Paredes  
Coordinador del Posgrado



C.c.p.- Expediente

Amefm

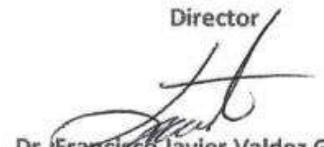
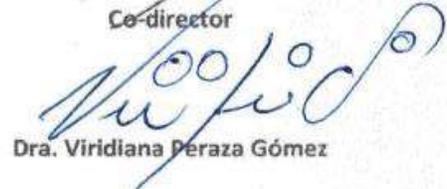
Unidad Académica de Agricultura, Carretera Tepic-Compostela Km. 9, C.P. 63780, Xalisco, Nayarit. Tels. (311)2-11-01-28 y 2-11-11-63 Posgrado (CBAP) 2-11-24 78.

Xalisco, Nayarit; 16 de diciembre de 2019

DR. J. DIEGO GARCÍA PAREDES  
COORDINADOR DEL POSGRADO (CBAP)  
PRESENTE

Los suscritos integrantes del Cuerpo Tutorial para asesorar la Tesis titulada: **Bioeconomía del cultivo semi-intensivo de *Litopenaeus (Penaeus) vannamei* afectado por la necrosis aguda del hepatopáncreas: identificación y evaluación de factores de riesgo**; que presenta la M. en C. Nallely Estrada Pérez para obtener el Grado de Doctora en Ciencias con opción terminal en Ciencias Pesqueras, damos nuestra aprobación para que continúe con los trámites correspondientes para la obtención de su grado.

ATENTAMENTE

 Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velasco Arce Director	 Dr. Alfredo Hernández Llamas Co-director
 Dr. Francisco Javier Valdez González Asesor	 Dra. Viridiana Peraza Gómez Asesora
 Dr. Juan Manuel Pacheco Vega Asesor	

## DEDICATORIAS

A Jah Dios, por la oportunidad, por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres, quienes depositaron su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento, que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, por lo que representan para mí y por ser parte importante de mi familia.

A mis sobrinos, mis bebés Emmanuel y Gonzalo que me alegran mis días aunque tenga todo el trabajo del mundo.

A mi abuelita quien siempre la llevaré presente con cada uno sus consejos.

Esto es posible gracias a ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a mis formadores, Dr. Alfredo Hernández Llamas y el Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velazco Arce, personas de gran preparación quienes se han esforzado por ayudarme a llegar a esta etapa importante de mi formación profesional.

Sencillo no ha sido el proceso, pero gracias a las ganas y paciencia para transmitirme sus conocimientos y dedicación que los ha regido, he logrado importantes objetivos como el culminar mi tesis con éxito.

A mi director Dr. Javier Marcial de Jesús Ruiz Velazco Arce por permitirme seguir participando en otra de sus investigaciones, por creer en mí siempre y darme su valioso tiempo, motivación, enseñanzas y consejos en un marco de confianza, respeto, afecto y amistad, y sobre todo de apoyo incondicional.

A mi codirector Dr. Alfredo Hernández Llamas, por su generosidad al brindarme a recurrir a su capacidad y experiencia, siempre al pendiente en cualquier momento con sus atenciones. Además de quien aprendí lo que significa ser un investigador y a motivarme a seguir luchando por mis objetivos.

Al comité tutorial Dr. Juan Manuel Pacheco Vega, Dr. Francisco Javier Valdez González y Dra. Viridiana Peraza Gómez, por sus críticas y aportaciones en cada evaluación, gracias a ello me han ayudado a cumplir mis objetivos.

A Don Roberto Watson Pérez<sup>†</sup> destacado productor y pionero de la acuicultura moderna, que en su momento, nos dejó ingresar a su granja, dando su apoyo incondicional para proporcionarnos lo necesario para llevar a cabo este trabajo de tesis.

Al biólogo Orlando Obeso por la valiosa información, experiencia y disponibilidad proporcionada en cualquier momento del día a un sinnúmero de cuestionamientos.

Al CONACYT institución que ha hecho posible la realización de este trabajo.

Al coordinador del posgrado de Ciencias Biológicas Agropecuarias y Pesqueras,  
Dr. Juan Diego García Paredes por su disponibilidad y ayuda en los diferentes rubros.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General	4
2.1.1 Objetivos Específicos	4
2.2 Hipótesis	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 Bioeconomía	5
3.2 Necrosis Aguda del Hepatopáncreas o síndrome de mortalidad temprana (EMS)	7
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	12
4.1 Generación de base de datos	12
4.2 Monitoreo de la calidad del agua, parámetros de producción de camarón, AHPND y poblaciones bacterianas	15
4.3 Control de la AHPND, de poblaciones de mejillones y de la productividad de los estanques	16
4.4 Modelo bioeconómico	17
4.4.1 Sub-modelo biológico	17
4.4.1.1 Análisis estadístico de la producción biológica	19
4.4.2 Sub-modelos tecnológicos	20
4.4.3 Sub-modelos de variables calidad del agua y de manejo	21
4.4.4 Sub-modelo económico	23
4.4.5 Variabilidad de la producción	25
4.4.6 Análisis de riesgo económico	26
4.4.7 Análisis de sensibilidad	27
V. RESULTADOS	28
5.1 Modelo biológico y análisis de la producción	28
5.2 Análisis de la variabilidad de la producción	36

5.3	Análisis de sensibilidad de la producción	38
5.4	Sub-modelos tecnológicos	41
5.5	Análisis de riesgo económico	45
5.6	Análisis de sensibilidad de la utilidad (o pérdida)	50
VI.	DISCUSIÓN	55
VII.	CONCLUSIONES	68
VIII.	REFERENCIAS O LITERATURA CITADA	69

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1. Estudios que abordan temas relacionados con la enfermedad de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas (AHPND) y <i>Vibrio parahaemolyticus</i> (Vp) en especies de camarón desde 2014 hasta la fecha (los estudios están ordenados cronológicamente).	8
Tabla 2. Valores medios ( $\pm$ DE) de las variables de manejo, calidad del agua del estanque y producción del cultivo semi-intensivo de camarón durante los ciclos de producción analizados. Las postlarvas se obtuvieron de los laboratorios "Acuacultura Dos Mil" (2013-2015) y "Aquapacific" (2016).	12
Tabla 3. Productos preventivos y correctivos utilizados para el control de la AHPND, las poblaciones de mejillones y la productividad primaria del estanque.	15
Tabla 4. Lista de precios por mes y talla del kilogramo ( $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de camarón en Sinaloa, México.	23
Tabla 5. Valores de los parámetros de costos.	24
Tabla 6. Tiempos en que ocurrieron las mortalidades masivas de camarón causadas por la AHPND (MT). Se indican el peso individual medio del camarón y el porcentaje de casos (estanques) correspondientes.	28
Tabla 7. Correlaciones significativas entre los parámetros del sub-modelo biológico, las variables de calidad del agua y la duración del cultivo.	30
Tabla 8. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo biológico en función de las variables de calidad del agua, el tamaño del estanque y la duración del cultivo. Los valores bajos de $k$ indican un rápido crecimiento.	32

Tabla 9. Resultados del análisis de sensibilidad de la producción a la variabilidad estocástica de los parámetros del sub-modelo biológico y de variables de calidad del agua para los diferentes ciclos de producción. Los parámetros y variables se encuentran enlistados en orden de importancia de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión estandarizado (CR).	38
Tabla 10. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo del alimento acumulado en función de las variables de calidad del agua, el tamaño del estanque, la duración del cultivo y la densidad.	41
Tabla 11. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo de recambio de agua en función de las variables de calidad del agua, el tamaño del estanque y densidad	43
Tabla 12. Resultados del análisis de sensibilidad de la utilidad (o pérdida) a la variabilidad estocástica de los parámetros del modelo bioeconómico y de las variables de calidad del agua para los diferentes escenarios de severidad de la AHPND. Los parámetros y variables se encuentran enlistados en orden de importancia de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión estandarizado (CR).	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Ejemplos de los ajustes de las ecuaciones de crecimiento (a) y supervivencia (b). Las flechas indican el momento en que se presenta la mortalidad por la enfermedad.	29
Figura 2. Resultados de ANOVA para la comparación de los valores medios de los parámetros del sub-modelo biológico, las variables de calidad del agua y la duración del cultivo.	31
Figura 3. Regresiones lineales simples y pruebas <i>t</i> que indican que los valores de las pendientes no difieren significativamente de 1 y que el sub-modelo biológico y las ecuaciones de regresión en la Tabla 8 predicen adecuadamente la biomasa de camarón.	34
Figura 4. Dinámica de la producción de camarón predicha utilizando el sub-modelo biológico y las ecuaciones de regresión de la Tabla 8. Las flechas muestran los tiempos en que se presentan pérdidas de producción causadas por la AHPND.	35
Figura 5. Distribuciones de probabilidad de la producción. Se indican los intervalos de 95% de confianza de la producción.	36
Figura 6. Producción obtenible (a) e incertidumbre asociada (b) para los distintos ciclos cuando se considera la variabilidad estocástica de los parámetros del sub-modelo biológico y de las variables de calidad del agua.	37
Figura 7. Ejemplos de resultados del ajuste de las ecuaciones para el cálculo del alimento acumulado (a) y de recambio de agua acumulado (b).	40
Figura 8. Regresiones lineales simples y pruebas <i>t</i> que indican que los valores de pendiente no difieren significativamente de 1 y que el modelo tecnológico y las ecuaciones de regresión de la Tabla 10 predicen adecuadamente el alimento acumulado al tiempo de la cosecha (AA).	42

Figura 9. Regresiones lineales simples y pruebas t que indican que los valores de pendiente no difieren significativamente de 1 y que el modelo tecnológico y las ecuaciones de regresión en la Tabla 11 predicen adecuadamente el recambio de agua acumulado al tiempo de la cosecha ( <i>RA</i> ).	44
Figura 10. Desempeño económico proyectado, en función del tiempo de cultivo, para los diferentes escenarios correspondientes a los ciclos de producción.	46
Figura 11. Distribuciones de probabilidad de la utilidad (o pérdidas) para diferentes escenarios de severidad de la AHPND correspondientes a los diferentes ciclos de producción y a las semanas en que se presenta la mayor utilidad (o menor pérdida) en cada caso. Se indican los intervalos de 95 % de confianza de las utilidades o pérdidas.	47
Figura 12. Riesgo económico asociado a diferentes escenarios de severidad de la AHPND correspondientes a los diferentes escenarios de producción.	48
Figura 13. Relación entre las utilidades (a), la probabilidad de pérdida (b) y la producción promedio de camarón obtenida durante los siete ciclos de producción.	49
Figura 14. Relaciones entre la utilidad (o pérdida) (a) y la probabilidad de pérdidas (b) y la mortalidad causada por la enfermedad para los diferentes escenarios de producción.	52
Figura 15. Relaciones entre la probabilidad de pérdidas (a) y el rendimiento (o pérdida) por unidad de riesgo (RPUR) (b) considerando los resultados promedio obtenidos en granjas constituidas por diferente número de estanques en los distintos escenarios de severidad de la AHPND.	53

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y/O ABREVIACIONES

$b_t$	Biomasa en el tiempo
$w_t$	Peso individual de los organismos en el tiempo
$n_t$	Número de organismos sobrevivientes al tiempo $t$ .
$w_i$	Peso inicial
$w_f$	Peso final
$k$	Se refiere a la velocidad a la cual el peso cambia de su valor inicial a su valor final
$c$	Tiempo de duración del cultivo
$N_0$	Número de individuos al momento de la siembra
$z$	Tasa instantánea de mortalidad.
$MT$	Momento en que ocurrió la mortalidad masiva por la enfermedad
$m$	Porcentaje de organismos que mueren por la enfermedad.
$AA_t$	Alimento acumulado en función del tiempo
$A_f$	Alimento acumulado al final del cultivo
$d$	Parámetro de ajuste para el cálculo del alimento
$b$	Parámetro de ajuste para el cálculo del alimento
$RA_t$	Número de horas acumuladas a diferentes tiempos durante las cuales se efectuó el recambio
$a_R$	Pendiente del modelo de recambio
$b_R$	Intercepto del modelo de recambio
$Q$	Valor genérico que adoptan los parámetros de los submodelos
$e$	Subíndice de valores estocásticos
$T$	Temperatura

<i>S</i>	Salinidad
<i>TR</i>	Transparencia
<i>OD</i>	Oxígeno disuelto
<i>BA</i>	Bacterias amarillas
<i>BV</i>	Bacterias verdes
<i>D</i>	Densidad de siembra
<i>TE</i>	Tamaño de los estanques
<i>DC</i>	Duración del cultivo
$U_t$	Utilidad en el tiempo
$I_t$	Ingresos totales en el tiempo
$C_t$	Costos de producción del cultivo en el tiempo.
$B/C_t$	Relación beneficio-costos en el tiempo
$PC_t$	Precio comercial del camarón en el tiempo
<i>CA</i>	Costo del alimento
<i>CPL</i>	Costo de postlarvas
<i>CV</i>	Coefficiente de variación
<i>RPUR</i>	Rendimiento (o pérdidas) por unidad de riesgo
<i>CR</i>	Coefficiente de regresión estandarizado

## RESUMEN

Se construyó un modelo bioeconómico para evaluar el impacto de la necrosis aguda del hepatopáncreas en los resultados económicos de la producción de *Litopenaeus* (*Penaeus*) *vannamei*, teniendo en cuenta siete escenarios de gravedad de la enfermedad, utilizando datos de una granja camaronera de Sinaloa, México de 2013 a 2016. Los peores resultados se obtuvieron cuando la gravedad era extrema, con una pérdida media de \$ -14,013 ha<sup>-1</sup>, una relación beneficio/costo de 0.52 y una probabilidad de tener pérdidas en 95.7 % de los estanques. Los mejores resultados se proyectaron para el escenario menos severo con un ingreso neto promedio de \$ 12,881 ha<sup>-1</sup>, una relación beneficio/costo de 1.25, y una probabilidad de pérdida en 27.9 % de los estanques. En la peor situación, se estimó que una granja integrada por al menos diez estanques se enfrentaba a una certeza de pérdida, en promedio, del 100 %. En la situación más favorable, una granja que utiliza al menos 20 estanques se tiene la certeza del 100 % de, en promedio, no tener pérdidas. Para situaciones en las que la gravedad era intermedia, el aumento del tamaño de la granja de uno a 60 estanques podría reducir la probabilidad de pérdida del 51 % al 32 %, y del 44 % al 4 %. Un análisis de sensibilidad confirmó que la mortalidad por enfermedad era el factor más crítico que afectaba al riesgo económico y que la elevada salinidad y la escasa productividad de los estanques afectaban negativamente a la producción y a los resultados económicos. En conclusión, la enfermedad tiene un efecto profundo y perjudicial en los resultados económicos, que pueden variar de catastróficos a moderadamente aceptables. Además, la modelización bioeconómica es útil para la evaluación de riesgos y el análisis de situaciones complejas.

## ABSTRACT

A bioeconomic model was prepared to assess the impact of the acute hepatopancreatic necrosis disease on the economic performance of *Litopenaeus (Penaeus) vannamei* production, considering seven scenarios of disease severity, using data from a shrimp farm in Sinaloa, Mexico from 2013 to 2016. The worst results were obtained when severity was extreme with a mean loss of \$ -14,013 ha<sup>-1</sup>, a benefit/cost ratio of 0.52, and a probability of having losses in 95.7 % of the ponds. The best results were projected for the less severe scenario yielding mean net revenues of \$ 12,881 ha<sup>-1</sup>, a benefit/cost ratio of 1.25, and a loss probability in 27.9 % of the ponds. Under the worst situation, a farm integrated by at least ten ponds was estimated to face 100 % certainty of losing on average. In the most favorable situation, a farm using at least 20 ponds was 100 % confident of not losing on average. For situations when the severity was intermediate, increasing the farm size from one to 60 ponds could reduce loss probability from 51 % to 32 %, and from 44 % to 4 %. A sensitivity analysis confirmed that disease mortality was the most critical factor affecting economic risk and that high salinity and poor pond productivity negatively affected shrimp production and economic outcomes. To conclude, the disease has a profound and harmful effect on economic performance where the results could range from catastrophic to moderately acceptable. Furthermore, bioeconomic modeling is useful for risk assessment and analysis of complex situations.

## I. INTRODUCCIÓN

La producción pesquera mundial alcanzó un máximo de aproximadamente 171 millones de toneladas en 2016, de las cuales la acuicultura representó un 47 % del total (FAO, 2018). En México, el camarón es el producto más importante en términos de valor económico con una tasa media de crecimiento anual de producción en los últimos 10 años de 1.67 %, y, además, ocupa el primer lugar de las especies pesqueras comercializadas a nivel internacional (CONAPESCA, 2017).

El volumen de camarón cultivado que se produce en el litoral del Pacífico Mexicano, representa aproximadamente el 89 % del volumen nacional, y los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit, destacan con el 82 % del total (CONAPESCA, 2017). De 2010 a 2013, la producción acuícola nacional experimentó una reducción anual de 3.5 %, debido a que las granjas camaronícolas se han visto afectadas por enfermedades como el Síndrome de la Mortalidad Temprana (EMS, por sus siglas en inglés), también conocido como Enfermedad de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas (AHPND, por sus siglas en inglés) y el Virus del Síndrome de la Mancha Blanca (WSSV, por sus siglas en inglés), para las cuales no hay tratamiento efectivo (CEDRSSA, 2015).

La AHPND es una enfermedad emergente del camarón que, de acuerdo con Shinn *et al.*, (2018), empezó a ocasionar pérdidas económicas significativas entre los productores de camarón de China (US\$ 11.0 mil millones de 2009 a 2016), Vietnam (US\$ 2.5 mil millones de 2010 a 2016), Malasia (US\$ 1.2 mil millones de 2010 a 2016), Tailandia (US\$ 7.9 mil millones de 2010 a 2016) y México (US\$ 0.7 mil millones de 2012 a 2016). En el noroeste de México, se reportaron pérdidas de hasta el 65% de la producción de camarón blanco *Litopenaeus (Penaeus) vannamei* (*L. vannamei* en lo sucesivo) en 2013, en comparación con la producción obtenida en 2011, cuando aún no se había detectado la enfermedad (The Fish Site, 2013). En el estado de Sinaloa, la producción de camarón fue de 44,337 t en 2012 y de 18,193 t en 2013, año en que se detectaron y notificaron los primeros brotes; a partir de entonces, la producción se

ha recuperado sistemáticamente pasando de 25,502 t en 2014 a 74,449 t en 2018 (CESASIN, 2019).

La bioeconomía acuícola es una interdisciplina que aporta elementos para la toma de decisiones, ya que permite, entre otras cosas, cuantificar con base en probabilidades y diferentes escenarios, cuál sería el posible efecto de un fenómeno adverso como la aparición de enfermedades (Almendárez-Hernández, 2015). Van Gigch (1987) define el riesgo como el conocimiento del valor de los posibles resultados de un evento y de sus probabilidades relativas y su análisis constituye una herramienta para la toma de decisiones. Aun cuando el análisis de riesgo es muy útil para la industria camaronera, los trabajos que se llevan a cabo son escasos (Llorente y Luna, 2016).

A pesar de que desde las primeras etapas de la presencia de la enfermedad se estableció la necesidad de realizar investigaciones sobre factores de riesgo y de su impacto económico (NACA, 2012), ambos aspectos no se han atendido con el rigor que se requiere. Sólo se presentan estimaciones de pérdidas económicas globales a nivel país, pero no se investiga a nivel de unidades de producción individuales.

Específicamente, no existen registros de antecedentes de investigaciones que, de manera explícita y específica, aborden el problema de analizar y evaluar el riesgo de pérdidas económicas en el cultivo de camarón asociadas a la enfermedad de la AHPND, actuando en conjunto con otros factores de riesgo. Más aún, a pesar de la importancia de la AHPND, las investigaciones dirigidas a establecer posibles relaciones entre la enfermedad y la calidad del agua de los estanques son muy escasas.

Dada la problemática en la producción de camarón cultivado antes señalada, para este trabajo de investigación se desarrolló un modelo bioeconómico que incorpora elementos estocásticos con el fin de identificar, analizar y evaluar la variabilidad de la producción y el riesgo asociado a pérdidas económicas de *L. vannamei* por efecto de

la AHPND, así como a variaciones de los precios del camarón, de costos de su producción y de parámetros de calidad del agua de los estanques para su cultivo.

## II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.1 *Objetivo general*

Evaluar la variabilidad y el riesgo económico de la producción semi-intensiva del camarón *L. vannamei* afectada por la Enfermedad de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas.

#### 2.1.1 *Objetivos específicos*

2.1.1.1 Establecer relaciones entre el crecimiento del camarón e indicadores de severidad de la AHPND con variables de calidad del agua y de manejo.

2.1.1.2 Construir un modelo bioeconómico estocástico para el análisis de escenarios de producción del cultivo de camarón *L. vannamei* afectado por diferentes grados de severidad de la AHPND.

2.1.1.3 Identificar y cuantificar los factores que afectan tanto a la producción como al riesgo económico mediante análisis de sensibilidad.

### 2.2 HIPÓTESIS

Si se conocen las probabilidades de ocurrencia de determinados factores que influyen en el comportamiento aleatorio de indicadores del cultivo de camarón cuando se encuentra afectado por la AHPND, entonces debe ser posible la estimación, tanto de la probabilidad de obtención de pérdidas económicas, como del riesgo productivo y económico asociado a cada uno de dichos factores.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Bioeconomía

El análisis bioeconómico en acuicultura surge como respuesta a la necesidad de integrar factores económicos, biológicos, técnicos y ambientales para estudiar el proceso de creación de valor dentro de las empresas y mejorar su eficiencia (Allen *et al.*, 1984). Básicamente, los modelos bioeconómicos consisten en un sub-modelo biológico que está interrelacionado con un sub-modelo 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, 2013). Por otra parte, otros factores usualmente considerados son las variables ambientales, regulaciones de política y capacidades de producción.

Al principio, la falta de investigaciones previas sobre la acuicultura y las dificultades para acceder a los datos reales de producción que facilitarían la investigación empírica, llevaron a que la mayor parte de los primeros trabajos sobre modelos bioeconómicos se basaran en modelos teóricos. Karp *et al.* (1986) y Leung y Shang (1989) figuran entre los primeros autores que utilizaron modelos bioeconómicos para la producción acuícola, al considerar el problema de determinar la cosecha óptima y el tiempo de siembra en el cultivo de camarón.

Bjørndal (1988) desarrolló el primer modelo teórico para la cosecha óptima en la acuicultura, que se basó en la literatura bioeconómica de las ciencias forestales. Posteriormente, Arnason (1992), Heaps (1993, 1995), Hean (1994) y Mistiaen y Strand (1999) ampliaron el modelo de Bjørndal para tener en cuenta los efectos de la alimentación, el crecimiento dependiente de la densidad, los costos y el precio de mercado, respectivamente. Con el tiempo, aparecieron los primeros estudios empíricos, los cuales se hicieron cada vez más frecuentes. En la actualidad, la mayoría de estos estudios empíricos son los que se aplican en la modelización bioeconómica

en acuicultura, y sólo algunos autores, desarrollan modelos teóricos (Llorente y Luna, 2016).

La revisión de la literatura muestra que las pesquerías siguen siendo el área principal en la que se aplican modelos bioeconómicos. Sin embargo, el número de estudios que utilizan modelos bioeconómicos en la acuicultura, ha aumentado significativamente con respecto a la década anterior. La creciente importancia de esta área de conocimiento, no sólo se confirma a través de una mayor cantidad de investigaciones, sino también a través de la creciente variedad de especies, lugares y aplicaciones (Llorente y Luna, 2016).

Hoy en día, es difícil proporcionar una definición clara de lo que se puede llamar modelizado bioeconómico en la acuicultura. Sin embargo, Llorente y Luna (2016) identifican los modelos bioeconómicos como aquellos estudios teóricos y empíricos que desarrollan o utilizan un modelo matemático que considera las interacciones entre factores biológicos, ambientales y económicos para resolver un problema complejo, orientado hacia la maximización del desempeño económico en acuicultura, ya sea por simulación u optimización, independientemente de la metodología y el software utilizado.

De acuerdo con Llorente y Luna (2016), se han referido trabajos bioeconómicos en aproximadamente 57 artículos, y en particular, para el cultivo de camarón, las investigaciones han sido dirigidas hacia el manejo (Martínez-Cordero y Leung, 2004; Yu y Leung, 2005, 2006, 2009; Yu, *et al.*, 2006, 2009; Araneda *et al.*, 2011; Sanchez-Zazueta *et al.*, 2013b), a la factibilidad económica (Keyset *et al.*, 2004) y a la evaluación y manejo del riesgo (Seijo, 2004; Hernandez-Llamas y Zarain-Herzberg, 2011; Sánchez-Zazueta *et al.*, 2013a; Villanueva *et al.*, 2013; Gonzalez-Romero *et al.*, 2014; Hernández-Llamas *et al.*, 2013, 2015, 2016).

De acuerdo con Llorente y Luna (2016), el enfoque menos desarrollado, pero uno de los más relevantes desde el punto de vista empresarial, es el manejo de riesgo. Hasta la fecha, esta línea de investigación se ha desarrollado casi en su totalidad en

México y se ha aplicado al cultivo de camarón en diferentes sistemas. Estos estudios abordan la cuestión relevante de cómo la incertidumbre y el riesgo afectan el proceso de decisión y el desempeño económico en la camaronicultura, aunque las fuentes de riesgo y las formas de medir el desempeño económico difieren entre ellos. Los resultados de dichos estudios destacan la importancia de manejar la incertidumbre y el riesgo en la gestión empresarial, lo que ayudaría a las compañías financieras y de seguros a manejar el riesgo que asumen en sus transacciones con las empresas acuícolas, y les permitiría ofrecer mejores condiciones a los acuicultores (Llorente y Luna, 2016).

### 3.2 *Necrosis Aguda del Hepatopáncreas o síndrome de mortalidad temprana (EMS).*

La Enfermedad de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas, o síndrome de mortalidad temprana, ha estado causando severas pérdidas de producción en las granjas camaroneras de todo el mundo (Boonyawiwat *et al.*, 2016). La enfermedad se notificó por primera vez en 2009 en China y, desde entonces, se ha propagado a Vietnam, Malasia, Tailandia y Filipinas (Joshi *et al.*, 2014; Nunan *et al.*, 2014). A partir del 2013, la enfermedad también afectó a las granjas camaroneras de América Central y del Sur, México y los Estados Unidos (Soto-Rodriguez *et al.*, 2015; Restrepo *et al.*, 2018; Dhar *et al.*, 2019), donde se produce el camarón blanco (*L. vannamei*). El patógeno inicialmente detectado es una cepa de *Vibrio parahaemolyticus* (Tran *et al.*, 2013) que provoca mortalidades masivas en las granjas camaroneras.

La literatura sobre la AHPND es abundante. A partir de la revisión preparada para esta investigación, se encontraron estudios que utilizaban una amplia variedad de disciplinas y enfoques (en la Tabla 1 se presentan ejemplos representativos de tales estudios). Hasta donde se sabe, los trabajos de Boyd y Phu (2018) y Kua *et al.* (2018) han sido los únicos que persiguen el objetivo de establecer posibles relaciones entre la AHPND y la calidad del agua de los estanques.

Tabla 1. Estudios que abordan temas relacionados con la enfermedad de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas (AHPND) y *Vibrio parahaemolyticus* (*Vp*) en especies de camarón desde 2014 hasta la fecha (los estudios están ordenados cronológicamente).

Descripción	Referencia
La combinación de fago y lisozima mostraron mejor actividad contra el <i>Vp</i> que el fago solo. (Terapia de fagos)	Mateus <i>et al.</i> (2014)
La <i>Vp</i> está asociada con brotes de mortalidad en los estanques de cultivo, y las pruebas indican que los brotes se debieron a vibriosis en lugar de a la AHPND. (Vibriosis y AHPND)	Kumar <i>et al.</i> (2014)
El polisacárido fucoidan de las algas marinas marrones <i>Sargassum wightii</i> mejoró la inmunidad y la resistencia a la infección por <i>Vp</i> . (Inmunoestimulación)	Sivagnanave-Imurugan <i>et al.</i> (2014)
Se desarrolló un análisis qPCR de alta sensibilidad para detectar AHPND- patogénico <i>Vp</i> en muestras de agua y camarón. (Detección de <i>Vp</i> )	Han <i>et al.</i> (2015)
El AHPND es causado por cepas de <i>Vp</i> que producen la toxina PirAB <sup>VP</sup> . La toxina Pir B <sup>VP</sup> sola puede ser suficiente para causar daño celular. (Virulencia <i>Vp</i> )	Lai <i>et al.</i> (2015)
El <i>Aloe vera</i> mostró propiedades antivirales y antibacterianas contra el WSSV y <i>V. parahaemolyticus</i> . (Inmunoestimulación)	Trejo-Flores <i>et al.</i> (2016)
El <i>Vp</i> es el principal responsable de la mortalidad después de la co-infección con el WSSV. (Virulencia <i>Vp</i> )	Rubio-Castro <i>et al.</i> (2016)
La densidad de <i>Vp</i> disminuyó significativamente después de 8 h de cocultivo con <i>Lactobacillus pentosus</i> (HC-2), y excluye el patógeno en el intestino del camarón. (Probióticos)	Sha <i>et al.</i> (2016)

Tabla 1. Continuación.

---

La dieta suplementada con galactanos sulfatados mejora la actividad inmunológica y la protección contra la infección por <i>Vp</i> . (Expresión inmune)	Rudtanatip <i>et al.</i> (2017)
La catecolamina induce virulencia en <i>V. parahaemolyticus</i> , y el pretratamiento con el antagonista LED209 neutralizó este efecto. (Virulencia <i>Vp</i> )	Suong <i>et al.</i> (2017)
Las placas biológicas pueden utilizarse como método de identificación bacteriana por las propiedades metabólicas distintivas de <i>V. parahaemolyticus</i> . (Detección de <i>Vp</i> )	Williams <i>et al.</i> (2017)
Desarrollo de anticuerpos monoclonales específicos para la detección directa de toxinas Tox A y Tox B producidas por <i>Vp</i> en los tejidos del camarón. (Detección de <i>Vp</i> )	Wangman <i>et al.</i> (2017)
La expresión de la ácido graso sintasa juega un papel importante en la inmunidad antibacteriana durante la infección. (Respuesta inmune)	Zuo <i>et al.</i> (2017)
Un análisis qPCR combinado con separación inmunomagnética (IMS) es un método rápido y efectivo para la detección de <i>Vp</i> AHPND en muestras de agua y camarón. (Detección de <i>Vp</i> )	Lun <i>et al.</i> (2018)
El producto vegetal fermentado eleva la respuesta inmune, aumenta la expresión de los genes relacionados con el sistema inmunológico y la resistencia a las enfermedades en los camarones. (Inmunoestimulantes)	Elshopakey <i>et al.</i> (2018)
La alimentación continua y alternada de <i>Syzygium cumini</i> de la hoja en polvo protege al huésped eficazmente contra las infecciones de <i>Vp</i> . (Inmunoestimulantes)	Prabu <i>et al.</i> (2018)
Toxinas producidas por <i>Vp</i> son detectadas en otras especies de <i>Vibrio</i> , como <i>V. campbellii</i> . (Detección de <i>Vp</i> )	Wangman <i>et al.</i> (2018)

---

Tabla 1. Continuación

---

Dos cepas de <i>Pseudoalteromonas spp.</i> aisladas del intestino del camarón son efectivas contra pruebas experimentales con <i>Vp</i> cuando cualquiera de las dos cepas se aplicaron solas, no combinadas. (Probióticos)	Wang <i>et al.</i> (2018)
Las nanopartículas de plata sintetizadas con <i>Cymodocea serrulata</i> demostraron su eficacia contra las infecciones experimentales por <i>Vp</i> . (Inmunoestimulación)	RathnaKumari <i>et al.</i> (2018)
Los perfiles transcriptómicos de los hemocitos indicaron que cinco genes jugaron un papel esencial en la inmunidad antibacteriana y en funciones específicas contra los patógenos. (Inmunidad)	Qin <i>et al.</i> (2018)
El suplemento prebiótico de $\beta$ -1,4 manobiosa mejoró la respuesta inmunitaria y la resistencia contra la infección por <i>Vp</i> . (Prebióticos)	Elshopakey <i>et al.</i> (2018)
Diferencias de expresión génica en genes inmunológicos después de una infección con <i>Vp</i> y toxinas <i>Vp</i> . (Respuesta inmune)	Maralit <i>et al.</i> (2018)
El biofloc y el agua acondicionada para el cultivo de tilapia proporcionaron cierta protección contra el AHPND. (Biocontrol)	Sajali <i>et al.</i> (2019)
Los extractos de jengibre inhiben la formación de biopelícula y mejoran la resistencia a la infección por <i>Vp</i> . (Aditivos para alimentos)	Soowannayan <i>et al.</i> (2019)
La proteína de choque térmico inyectada ( <i>LvHSP70</i> ) indujo la expresión de varios genes relacionados con el sistema inmunológico y aumentó la tasa de supervivencia después de la infección por <i>Vp</i> . (Respuesta inmune)	Junprung <i>et al.</i> (2019)

---

Tabla 1. Continuación

---

Dos cepas de <i>Pseudoalteromonas spp.</i> aisladas del intestino del camarón son efectivas contra pruebas experimentales con <i>Vp</i> cuando cualquiera de las dos cepas se aplicaron solas, no combinadas. (Probióticos)	Wang <i>et al.</i> (2018)
Se reportaron toxinas Pir AB <sup>VP</sup> de cepas de <i>Vp</i> que causan AHPND en otras especies de <i>Vibrio</i> como <i>V. campbelli</i> , <i>V. harveyi</i> , y <i>V. owensii</i> . (Toxinas de <i>Vibrio</i> )	Prachumwat <i>et al.</i> (2019)
Se ha identificado que las especies No- <i>Vp</i> portadoras de PVA1 son plásmidos que codifican las toxinas binarias Pir AB <sup>VP</sup> , lo que causa gran preocupación en la industria de la acuicultura. (Vibrio virulencia)	Devadas <i>et al.</i> (2019)

---

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Generación de base de datos

Se obtuvieron datos correspondientes a siete ciclos (entre 2013 y 2016) de producción de una granja camaronera que opera en el estado de Sinaloa, México. La granja no detectó ni reportó la presencia de la AHPND antes de esos ciclos. Los datos originales contenían 348 casos (estanques), que fueron diagnosticados como infectados por *V. parahaemolyticus*-AHPND (es decir, 100% de prevalencia). Seis casos (1.7%) fueron excluidos del análisis porque fueron diezmados muy temprano, lo que provocó el colapso total de las poblaciones de camarón y excluyó la posibilidad de cosecharlos.

Los datos fueron procesados para generar una base de datos que incluye las siguientes variables: tamaño del estanque, densidad de población, duración del cultivo, temperatura del agua del estanque, salinidad, transparencia, oxígeno disuelto, poblaciones bacterianas, peso y supervivencia de los camarones y rendimiento de los camarones en la cosecha. Los valores medios de las variables analizadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores medios ( $\pm$  DE) de las variables de manejo, calidad del agua del estanque y producción del cultivo semi-intensivo de camarón durante los ciclos de producción analizados. Las postlarvas se obtuvieron de los laboratorios "Acuacultura Dos Mil" (2013-2015) y "Aquapacific" (2016).

Variable	Ciclo						
	2013-I	2013-II	2014-I	2014-II	2014-III	2015	2016
Casos (estanques)	58	44	53	55	34	53	45
Periodo	Junio- Agosto	Septiembre- Noviembre	Marzo- Junio	Julio- Octubre	Noviembre- Abril	Agosto- Diciembre	Agosto- Diciembre
Tamaño de estanque (ha)	4.2 $\pm$ 2.1	4.4 $\pm$ 2.0	4.2 $\pm$ 2.2	4.1 $\pm$ 2.1	4.0 $\pm$ 2.1	4.3 $\pm$ 2.1	4.4 $\pm$ 2.2
Densidad (postlarvas m <sup>-2</sup> )	11 $\pm$ 1.5	8.0 $\pm$ 0.0	10 $\pm$ 0.0	10 $\pm$ 0.0	10 $\pm$ 0.0	10 $\pm$ 0.0	10 $\pm$ 0.0
Duración del cultivo (semanas)	9.6 $\pm$ 0.6	10.95 $\pm$ 0.2	10.4 $\pm$ 1.4	10.2 $\pm$ 1.3	17.7 $\pm$ 1.7	17.7 $\pm$ 1.1	16 $\pm$ 1.0
Temperatura (°C)	31.6 $\pm$ 0.5	31.2 $\pm$ 0.5	29.7 $\pm$ 0.6	32.4 $\pm$ 0.5	24.7 $\pm$ 0.4	31.3 $\pm$ 0.6	30.9 $\pm$ 0.5
Salinidad (g L <sup>-1</sup> )	44.0 $\pm$ 2.1	31.9 $\pm$ 1.5	47.3 $\pm$ 2.2	29.6 $\pm$ 1.8	28.4 $\pm$ 3.1	33.8 $\pm$ 1.6	30.0 $\pm$ 1.8

Tabla 2. Continuación

Transparencia (cm)	59.2 ±11.3	93.0 ± 25.2	81.9 ±13.7	81.9 ±24.6	85.2 ± 21.7	54.4 ± 18.1	62.5±18.6
Oxígeno Disuelto (mg L <sup>-1</sup> )	6.6 ± 0.4	6.1 ± 0.4	6.6 ± 0.3	6.0 ± 0.4	6.9 ± 0.4	6.4 ± 0.4	6.1 ± 0.5
Bacterias amarillas (UFC mL <sup>-1</sup> )	325 ± 270	183 ± 283	537 ± 282	283 ± 388	611 ± 477	280 ± 228	229 ± 222
Bacterias verdes (UFC mL <sup>-1</sup> )	556 ± 350	405 ± 459	312 ± 397	256 ± 421	154 ± 173	241 ± 184	503 ± 302
Peso individual (g)	14.6 ± 2.7	18.6 ± 2.0	14.9 ± 2.6	12.2 ± 2.6	11.3 ± 2.0	24.7 ± 3.5	16.7 ± 2.1
Supervivencia (%)	34.3 ±16.6	13.8 ± 6.8	15.6 ±12.4	26.5 ±12.6	45.9 ± 11.3	34.7 ± 9.5	49.7 ± 11.4
Rendimientos (kg ha <sup>-1</sup> )	493.8±217	198.5±85	222.8±166	316±155.6	516±138.9	849±237.5	824±202.7

#### 4.2 Monitoreo de la calidad del agua, parámetros de producción de camarón, AHPND y poblaciones bacterianas.

El monitoreo de la calidad del agua correspondió a las prácticas habituales de la producción comercial de camarón. La temperatura del agua del estanque y el oxígeno disuelto se midieron diariamente (06:00 y 18:00 h) con oxímetros (Modelo 55, YSI, Yellow Springs, OH) mientras que la salinidad y la transparencia se midieron semanalmente con refractómetros (Modelo SR6, VEE-GEE, Kirkland, WA USA) y discos Secchi. En lo sucesivo se referirá una "productividad" baja o alta, indicada por una transparencia alta o baja por el método del disco Secchi. El peso de los camarones fue medido semanalmente utilizando balanzas digitales con precisión de 0.01 y 0.1 g (Modelo SI-132, EXCELL, New Taipei City, Taiwan). La supervivencia de los camarones se estimó utilizando atarrayas de 2 m de radio.

Antes de la siembra, se analizaron muestras de 20-30 postlarvas para detectar la posible presencia de *V. parahaemolyticus*-AHPND. Las postlarvas fueron fijadas en una solución al 96 % de etanol y enviadas al laboratorio del Comité Estatal de Sanidad Acuícola de Sinaloa (CESASIN: Comité Estatal de Sanidad Acuícola de Sinaloa, A.C.) donde se utilizó un "kit" ems2 IQ2000 (GeneReach, Taichung, Taiwán) y un Sistema de Detección de PCR en Tiempo Real CFX96 (Bio-Rad, Hercules, CA, EUA) para su análisis.

Cada doce días, se realizaron análisis bacteriológicos del agua de los estanques, sedimentos y hepatopáncreas y muestras de hemolinfa de diez camarones que presentaban signos clínicos. Para el cultivo bacteriano se empleó agar de tiosulfato, citrato, sales biliares y sacarosa (TCBS), y los resultados del análisis se expresaron como el número de unidades formadoras de colonias (UFC) de bacterias amarillas o verdes (Soto Rodríguez *et al.*, 2015). El análisis microscópico se realizó en las branquias de camarón, hepatopáncreas e intestino utilizando un microscopio Lx 400 (Labomed, Inc., Culver City, CA, EUA). Para la confirmación del diagnóstico, personal capacitado de CESASIN recolectó muestras de hepatopáncreas de cinco

camarones (juveniles o adultos), mismas que fueron fijadas en una solución al 96 % de etanol y enviadas al laboratorio antes mencionado para el análisis de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

#### 4.3 Control de la AHPND, de poblaciones de mejillones y de la productividad de los estanques.

Además de la presencia de la AHPND, durante el período analizado se observaron abundantes poblaciones de mejillones (*Mytella strigata*) en los estanques, lo que afectó negativamente a las poblaciones planctónicas y a la productividad primaria. Los productos utilizados para prevenir y corregir estos problemas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Productos preventivos y correctivos utilizados para el control de la AHPND, las poblaciones de mejillones y la productividad primaria del estanque.

Ciclos de producción	Producto	Cantidades	Frecuencia
2013-I-II	Probiótico (no comercial)	200-300 L ha <sup>-1</sup>	Semanalmente
2013-I-II, y 2014-I-II-III	Planta de Neem ( <i>Azadirachta indica</i> ) (no comercial)	4-6 L por 25 kg de alimento	Diario
2013-I-II y 2014-I	Ácido paracético	0.024 L ha <sup>-1</sup>	Diario
Todos	Q-IV Desinfectante (DESPPO Laboratorio)	500-1000 ml ha <sup>-1</sup>	Semanalmente
Todos	Fertilizante Nutrilake (SMQ) Fertilizante Bayfolan (BAYER)	10-20 kg ha <sup>-1</sup> 1 L ha <sup>-1</sup>	Cuando la transparencia está entre los 70-120 cm; diariamente.

Tabla 3. Continuación

2014-I-II	Calibrin Z, control de toxinas bacterianas EMS (AMLAN International)	1 g por kg de alimento	Diario
2014-I-II	Epicin G2, tratamiento biológico para Acuicultura (Epicore Bio Networks Inc).	1-4 g por kg de alimento	Diario
2015	Minerales SIO PLUS (MoreLess)	5 g por kg de alimento	Diario
2015 y 2016	Antibióticos (oxitetraciclina and enrofloxacina)	1 g por kg de alimento	Cada dos semanas
2015 y 2016	Sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> )	3-6 kg ha <sup>-1</sup>	Variable, dependiente de la abundancia de mejillones.

#### 4.4 Modelo bioeconómico

El modelo bioeconómico se integró por cuatro sub-modelos: un sub-modelo biológico (o de “stock”), sub-modelos tecnológicos (de alimento acumulado y de recambio de agua), sub-modelos de variables de calidad del agua y de manejo y un sub-modelo económico.

##### 4.4.1 Sub-modelo biológico

Se utilizó un modelo de “stock”, o de “inventario”, para el análisis de la dinámica de la producción de camarón durante cada ciclo de producción. Para ese fin, la biomasa de camarón por hectárea al tiempo  $t$  ( $b_t$ ) se predijo como:

$$b_t = w_t n_t \quad (1)$$

donde  $w_t$  es el peso promedio individual de los camarones y  $n_t$  es el número de camarones sobrevivientes.

El crecimiento del camarón se predijo con la curva de crecimiento propuesta por Ruiz-Velazco *et al.* (2010b):

$$w_t = w_i + (w_f + w_i) \left( \frac{1-k^t}{1-k^c} \right)^3 \quad (2)$$

donde  $w_t$  es el peso individual medio pronosticado después de  $t$  unidades de tiempo,  $w_i$  es el peso inicial,  $w_f$  es el peso final,  $k$  es un coeficiente de crecimiento y  $c$  es el número de unidades de tiempo en el momento de la cosecha. Los procedimientos de regresión no lineal disponibles en STATA 10 (Stata Corp, College Station, TX) se utilizaron para ajustar la ecuación de crecimiento a todos y cada uno de los casos contenidos en la base de datos, y la significación se estableció en  $P < 0.05$  para el ANOVA de la regresión.

La supervivencia de los camarones se modelizó considerando dos fases; una fase inicial antes de que la enfermedad comenzara a causar una mortalidad masiva de camarones, y una segunda fase cuando la supervivencia se estabilizó después de que la mortalidad masiva terminó. La mortalidad masiva ocurrió muy rápidamente (durante una semana) en todos los casos.

En este estudio, se utilizó la ecuación propuesta por Ruiz-Velazco *et al.* (2010b) para predecir la supervivencia del camarón *L. vannamei* cuando es afectado por la enfermedad del virus del síndrome de la mancha blanca (WSSV):

$$n_t = N_0 \exp(-Z_1 t), \text{ si } t \leq MT \quad (3)$$

ó

$$n_t = (N_0 \exp(-Z_1 MT) - m) * \exp(-Z_2(t - MT - 1)), \text{ si } t > MT \quad (4)$$

donde  $n_t$  es el número de sobrevivientes (como porcentaje),  $N_0$  es la población inicial,  $Z_1$  es la tasa de mortalidad instantánea durante la primera fase,  $MT$  es el momento en que ocurrió la mortalidad masiva de la enfermedad,  $m$  es la mortalidad masiva causada por la enfermedad (expresada como porcentaje de la población de camarón; en lo sucesivo, “la mortalidad”), y  $Z_2$  es la tasa de mortalidad instantánea después de que terminó la mortalidad.

Para cada caso en la base de datos, se estimaron los valores de las tasas de mortalidad instantáneas correspondientes a cada fase utilizando:

$$Z = [-\ln(n_f/N_0)]/t_f \quad (5)$$

Donde  $Z$  es  $Z_1$  o  $Z_2$ ,  $n_f$  y  $N_0$  son las poblaciones al final y al comienzo de cada fase y  $t_f$  es la duración de la fase. El resto de los parámetros se estimaron directamente utilizando los valores registrados para cada caso en la base de datos. Los parámetros  $MT$ ,  $m$  y  $Z_2$  se consideraron indicadores de la severidad de la enfermedad; es decir, los aumentos en  $m$  y  $Z_2$  fueron indicativos de mayores pérdidas en la producción y de efectos más severos de la enfermedad mientras que, como se verá posteriormente, los valores bajos de  $MT$  correspondieron a mortalidades tempranas severas. Cabe señalar que estos parámetros se usaron como indicativos del daño general de la población de camarones en un contexto de modelizado, y que no existe la intención de proponerlos en un sentido epidemiológico formal.

#### 4.4.1.1 *Análisis estadístico de la producción biológica.*

Como primer paso, se realizó un análisis descriptivo para determinar los momentos durante los ciclos de producción en que ocurrieron las mortalidades masivas, así como el tamaño correspondiente del camarón (en gramos) y el porcentaje de casos. Posteriormente, se realizó un análisis de correlación para el período 2013-

2016 (es decir, todos los ciclos de producción y casos) para detectar posibles asociaciones entre las estimaciones de los parámetros del sub-modelo biológico, las variables de calidad del agua, la densidad de siembra, la duración del cultivo y el tamaño del estanque. Después de detectar parámetros y variables que se encontraron correlacionadas significativamente, se realizaron ANOVAs de una vía para definir posibles diferencias en sus valores entre los ciclos de producción. Los porcentajes fueron transformados a valores de arcoseno previamente al ANOVA. Las pruebas de Kolgomorov-Smirnov y Levene sirvieron para evaluar la normalidad y homogeneidad de las varianzas. La prueba post hoc de Tukey se utilizó para separar las diferencias entre los ciclos después de que el ANOVA general mostró significación. Para los análisis se utilizó Statistica 7.0 (Stat-Soft, Tulsa, OK, USA), estableciendo la significación en  $P < 0.05$ .

#### 4.4.2 Sub-modelos tecnológicos

Se construyeron dos sub-modelos en función del tiempo, uno para el alimento acumulado y otro para el recambio de agua.

La ecuación logística (Ratkowsky, 1990) se utilizó para calcular la cantidad de alimento acumulado ( $AA_t$ ) proporcionado hasta el tiempo ( $t$ ):

$$AA_t = \frac{A_F}{1+e^{d(b-t)}} \quad (6)$$

donde  $A_F$  es el alimento acumulado al final del cultivo y  $d$  y  $b$  son parámetros de ajuste. La estimación de los parámetros se realizó para cada caso de la base de datos mediante análisis de regresión no lineal disponible en STATA 10 (Stata Corp, College Station, TX), y la significación se estableció en  $P < 0.05$  para el ANOVA de la regresión.

El recambio de aguase calculó como el número de horas acumuladas a diferentes tiempos durante las cuales se efectuó el recambio ( $RA_t$ ) utilizando la ecuación lineal:

$$RA_t = a_R t + b_R \quad (7)$$

donde  $a_R$  es el número de horas de recambio de agua por unidad de tiempo (semana) y  $b_R$  es el coeficiente de regresión, mismos que se estimaron, para todos los casos, mediante regresión lineal simple disponible en STATA 10 (Stata Corp, College Station, TX). La significación se estableció en  $P < 0.05$  para el ANOVA de la regresión.

#### 4.4.3 Sub-modelos de variables calidad del agua y de manejo

Para cada ciclo de producción se realizó un análisis de regresión múltiple para predecir (con excepción de  $w_i$ ,  $N_0$  y  $A_0$ ) los valores de los parámetros de los sub-modelos biológico y tecnológicos ( $Q$ ) en función de la temperatura del agua del estanque ( $T$ ), la salinidad ( $S$ ), la transparencia ( $TR$ ), oxígeno disuelto ( $OD$ ), poblaciones bacterianas amarillas y verdes ( $BA$  y  $BV$ ), densidad de siembra ( $D$ ), duración del cultivo ( $DC$ ) y tamaño del estanque ( $TE$ ). Formalmente:

$$Q = a_0 + a_1T + a_2S + a_3TR + a_4OD + a_5BA + a_6BV + a_7D + a_8DC + a_9TE \quad (8)$$

donde  $a_0$ - $a_9$  son los coeficientes de regresión. Para el ajuste de la ecuación a los valores de los parámetros de la ecuación de crecimiento del sub-modelo biológico y a los parámetros de los sub-modelos tecnológicos, se usaron los valores medios de las variables de calidad del agua registrados a lo largo de los ciclos de cultivo. Para la ecuación de mortalidad del sub-modelo biológico, se utilizaron valores medios de las variables, ya sea durante la primera fase del período de cultivo ( $T_1$ ,  $S_1$ ,  $TR_1$ ,  $OD_1$ ,  $BA_1$ ,  $BV_1$ ), o durante la segunda ( $T_2$ ,  $S_2$ ,  $TR_2$ ,  $OD_2$ ,  $BA_2$ ,  $BV_2$ ). Para el análisis de regresión se utilizó el procedimiento “backward-stepwise” en STATA 10 (Stata Corp, College Station, TX). Este procedimiento maneja automáticamente la colinealidad de acuerdo con los métodos descritos en Rencher (2002). La significación para la aceptación o rechazo de las variables independientes se estableció en  $P < 0.049$  y  $P < 0.05$ , respectivamente.

Posteriormente, el componente estocástico en los valores de cada uno de los parámetros  $Q$ , se incluyeron modificando el valor determinista de  $Q$  que se predice con la ecuación anterior, mediante:

$$Q_e = Q + r \quad (9)$$

donde  $Q_e$  es el valor estocástico que puede adquirir el parámetro, y  $r$  es el valor residual calculado a partir de una distribución normal ajustada a los valores residuales resultantes de la regresión múltiple correspondiente. Adicionalmente, se ajustaron distribuciones normales o empíricas, según el caso, a los valores contenidos en la base de datos de las variables de calidad del agua que resultaron significativas en las regresiones. A los parámetros cuyas regresiones lineales múltiples no resultaron significativas se les ajustaron distribuciones de probabilidad empíricas utilizando los valores originales de la base de datos.

La capacidad predictiva del sub-modelo biológico y de las ecuaciones de regresión múltiple obtenidas para cada ciclo de producción se evaluó siguiendo la metodología de Estrada-Perez *et al.* (2018). De acuerdo con este método, los coeficientes estimados a partir del análisis de regresión múltiple se usaron para predecir la biomasa cosechada para cada ciclo, misma que se comparó con la biomasa de camarón "observada" al tiempo de la cosecha correspondiente en la base de datos. Posteriormente y según Poole (1974) y Franco *et al.* (2006), se realizó un análisis de regresión lineal simple entre la biomasa "observada" y la predicha, situando la intercepción en cero. La capacidad de predicción se consideró aceptable después de que una prueba  $t$  indicara que la pendiente de regresión no difería significativamente de uno. Para la evaluación de la capacidad predictiva de los sub-modelos tecnológicos se siguió la misma metodología.

#### 4.4.4 Sub-modelo económico

Con el sub-modelo económico se proyectaron la utilidad (o pérdida) en el tiempo ( $U_t$ ) (en pesos mexicanos) y la relación beneficio/costo  $BC_t$  sobre los costos de producción. Para efecto del análisis se utilizaron valores de costos y precios actualizados, considerando las condiciones correspondientes a los diferentes ciclos de producción, como representativas de diferentes escenarios de severidad de la enfermedad, posibles de ocurrir en eventos futuros.

La utilidad se calculó como:

$$U_t = I_t - C_t \quad (10)$$

donde  $I_t$  son los ingresos totales en el tiempo y  $C_t$  son los costos de producción del cultivo en el tiempo.

La relación beneficio/costo estuvo dada por:

$$B/C_t = I_t/C_t \quad (11)$$

A su vez, los ingresos se calcularon de acuerdo con:

$$I_t = b_t PC_t \quad (12)$$

donde  $b_t$  es la biomasa del camarón en el tiempo y  $PC_t$  es el precio comercial del camarón.

En las Tablas 4 y 5 se presentan los precios del camarón y los costos de producción utilizados para el análisis. Para la incorporación de elementos estocásticos se usaron distribuciones normales ajustadas a los precios históricos (anuales) del alimento balanceado y del camarón; para los costos de la postlarva se incorporó utilizando distribuciones normales de errores residuales resultantes de la adaptación de una reparametrización de la ecuación logística (Ratkowsky, 1990) a los precios de la postlarva (*CPL*) de 2010 a 2018:

$$CPL_t = \frac{CPL_0 + (CPL_F - CPL_0)}{1 + e^{d(b-t)}} \quad (13)$$

donde  $CPL_0$  es el precio de la postlarva en 2010,  $CPL_F$  es el precio en 2018,  $d$  y  $b$  son los parámetros de ajuste,  $t$  es el tiempo en años.

Tabla 4. Lista de precios por mes y talla del kilogramo ( $\$ \cdot \text{kg}^{-1}$ ) de camarón en Sinaloa, México (Fuente: J. Naranjo, comunicación personal).

Talla (g)	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
7	60	58	57	57	57	58	58	58	58	58	62	62
8	64	62	60	60	58	58	60	58	58	58	58	63
9	67	65	63	63	60	59	59	59	60	59	61	62
10	68	66	64	64	61	60	61	60	60	60	65	65
11	70	68	66	66	63	61	63	64	61	61	61	66
12	71	69	67	67	64	64	65	62	62	62	67	67
13	73	71	69	69	66	63	66	63	63	63	66	67
14	74	72	70	70	67	64	66	64	64	64	67	69
15	75	73	72	71	70	65	66	70	70	70	75	80
16	77	75	73	73	70	67	66	66	66	66	76	71
17	79	77	77	77	72	72	72	67	67	72	77	72
18	81	79	78	77	74	73	73	68	68	73	78	78
19	83	81	79	79	76	74	74	69	69	74	79	79
20	85	82	80	80	77	74	72	70	70	75	75	80
21	87	84	82	82	79	76	76	72	71	76	76	81
22	88	86	84	84	81	78	77	73	74	78	80	84
23	90	87	85	85	82	79	78	74	73	79	81	83
24	91	89	87	87	84	81	79	75	74	80	82	84
25	92	90	88	88	85	82	80	76	76	81	83	85

Tabla 5. Valores de los parámetros de costos.

Parámetro	Costo (\$)
Alimento balanceado (\$ kg <sup>-1</sup> )	17
Postlarvas (\$ millar)	95
Electricidad (\$ kwh <sup>-1</sup> )	2.87
Nutrilake (\$ kg <sup>-1</sup> )	19
Bayfolan (\$ L <sup>-1</sup> )	120
Antibióticos (\$ kg <sup>-1</sup> )	1,740
Calibrin Z(\$ kg <sup>-1</sup> )	108
Epicin G2 (\$ kg <sup>-1</sup> )	1,171
Sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> ) (\$ kg <sup>-1</sup> )	74
Ácido Peracético (\$ L <sup>-1</sup> )	105
Desinfectante acuoso Q-IV (\$ L <sup>-1</sup> )	125
Minerales SIO PLUS(\$ kg <sup>-1</sup> )	100
Mano de obra (\$ ha <sup>-1</sup> semana <sup>-1</sup> )	255
Cosecha (\$·kg/camarón)	1

#### 4.4.5 Variabilidad de la producción

Se analizó la variabilidad infiriendo distribuciones de probabilidad de los rendimientos de producción a partir de valores estocásticos de los parámetros del sub-modelo biológico que resultaron relacionados significativamente con las variables de calidad del agua y de manejo, así como de valores estocásticos de las variables de calidad del agua que resultaron significativas. Las distribuciones de probabilidad de la producción, se generaron mediante la técnica de simulación Montecarlo disponible en @Risk 5.5, tomando en cuenta las correlaciones significativas que existieron entre los valores estocásticos de los parámetros del sub-modelo biológico.

El efecto de la AHPND y de las variables de calidad de agua en la incertidumbre de los rendimientos de producción, se evaluó mediante el coeficiente de variación (CV; Mun, 2006) para cada ciclo de producción, calculado como:  $CV = \text{desviación estándar} / \text{media}$ , y donde valores altos de CV indican mayor incertidumbre (Ayyub, 2014).

#### *4.4.6 Análisis de riesgo económico*

Se proyectó el riesgo económico asociado a los posibles escenarios de severidad de la enfermedad que se presentaron en la granja objeto de estudio, siguiendo la misma metodología que para el análisis de la variabilidad en la producción y utilizando, además, los sub-modelos tecnológicos y económico.

Se generaron distribuciones de probabilidad de la utilidad (o pérdida) utilizando, como indicadores de riesgo, la probabilidad de pérdidas económicas y el inverso del coeficiente de variación, el cual se calcula como la razón de la media entre la desviación estándar y que, de acuerdo con Mun (2006), se interpreta como el rendimiento (o pérdida) obtenido por unidad de riesgo (RPUR), donde un mayor valor del indicador significa menor incertidumbre de obtenerlas utilidades que se proyectan, mientras que un alto valor negativo implica mayor certidumbre de obtener las pérdidas proyectadas.

A partir de las distribuciones de probabilidad de la utilidad (o pérdida) se estimó la probabilidad de obtener pérdidas, misma que se interpreta como el porcentaje de casos (estanques) de la granja que enfrentan el riesgo de presentarlas. En tal sentido, en el contexto de este trabajo, la probabilidad de pérdida es equivalente al porcentaje de casos que se estima que las presentan. Adicionalmente, utilizando dichas distribuciones se analizó la variabilidad del valor promedio de la utilidad (o pérdida) en función del número de estanques que constituyen la granja, con el fin de estimar el riesgo que enfrenta la misma (como un todo) considerando su comportamiento promedio.

#### *4.4.7 Análisis de sensibilidad*

Se analizó la sensibilidad de los rendimientos de producción a la variabilidad aleatoria en los parámetros de los sub-modelos biológicos y de variables de calidad de agua y de manejo en los diferentes ciclos de producción. Para el análisis se utilizó el método de regresión múltiple disponible en @Risk 5.0. En este método, los valores absolutos de los coeficientes calculados para cada variable cuantifican la sensibilidad de la variable de salida. Un valor absoluto alto de un coeficiente de regresión indica una alta importancia de la variable correspondiente.

Al igual que en el análisis de sensibilidad en la producción, también se analizó la sensibilidad de los rendimientos económicos a la variabilidad aleatoria en los parámetros del modelo bioeconómico.

## V. RESULTADOS

### 5.1. *Modelo biológico y análisis de la producción*

En la Tabla 6 se presentan los tiempos en que ocurrieron las mortalidades masivas de camarón, su peso individual medio y el porcentaje de casos afectados por la AHPND. De los ciclos 2013-I al 2014-I, las mortalidades de camarón causadas por la enfermedad ocurrieron a partir de los 21 días (1.3-2.5 g de peso promedio del camarón), pero desde el ciclo 2014-II hasta el 2016 hubo una clara tendencia a ocurrir más tarde (28 a 49 días; 3.4-3.9 g de peso promedio del camarón) y, en casos extremos, hasta 63 días (8.6 g de peso promedio del camarón). En 2013-I y II, las mortalidades ocurrieron durante períodos relativamente cortos (de 21 a 35 días), mientras que en 2015 y 2016 se presentaron durante períodos más prolongados (de 28 a 56 días y de 35 a 63 días). No se observó un patrón claro a que el número máximo de casos afectados ocurriera al principio, a mediados o al final de los períodos en que ocurrieron los brotes.

Tabla 6. Tiempos en que ocurrieron las mortalidades masivas de camarón causadas por la AHPND (MT). Se indican el peso individual medio del camarón y el porcentaje de casos (estanques) correspondientes.

MT (días)	Ciclos													
	2013-I		2013-II		2014-I		2014-II		2014-III		2015		2016	
	Peso (g)	Casos (%)												
21	1.3	2	2.5	5	1.6	6								
28	3.4	24	3.2	91	2.0	55	3.9	30			3.4	9		
35	5.0	74	5.3	4	3.3	19	4.4	20			5.6	17	4.6	2
42					4.5	7	6.2	50			6.6	15	5.0	16
49					5.2	13			3.7	71	7.7	15	6.1	49
56									4.0	29	9.9	44	7.1	24
63													8.6	9

Se obtuvieron resultados significativos, en términos del ANOVA del análisis de regresión, cuando se ajustó la curva de crecimiento (Ecuación 2) a los conjuntos de datos correspondientes a todos los casos, mostrando flexibilidad para describir los diferentes tipos de curvas observadas en la base de datos (Fig. 1a). Por otro lado, las curvas de supervivencia indicaron que la mortalidad por la enfermedad se produjo una vez y de forma abrupta durante el período de cultivo. El modelo de supervivencia (Ecuaciones 3 y 4) describió adecuadamente la mortalidad cuando ésta apareció temprano, a mediados o al final del período de cultivo (Fig. 1b).

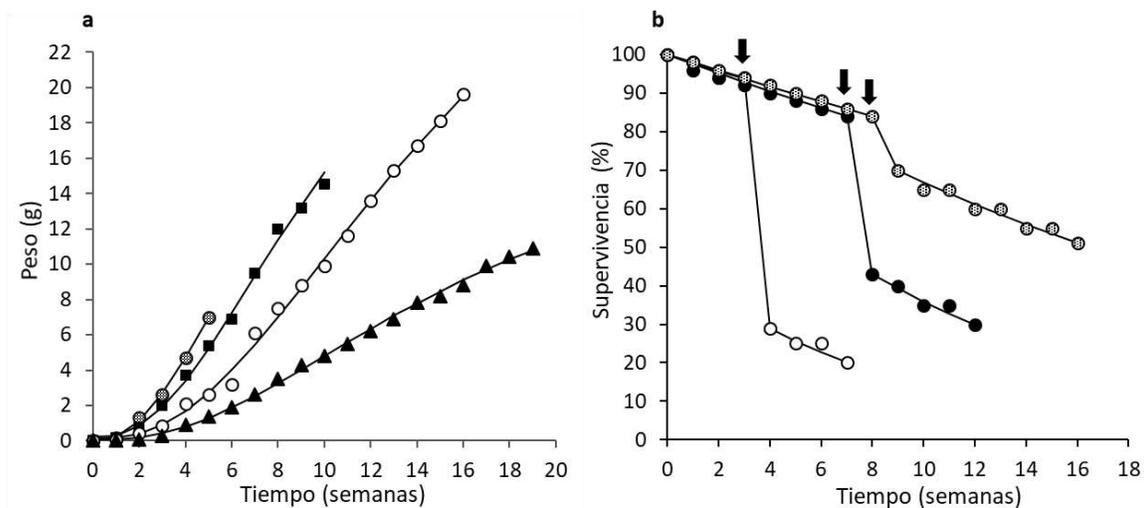


Figura 1. Ejemplos de los ajustes de las ecuaciones de crecimiento (a) y supervivencia (b). Las flechas indican el momento en que se presenta la mortalidad por la enfermedad.

En general, de los años 2013 a 2016, se observaron correlaciones significativas entre los parámetros del sub-modelo biológico, las variables de calidad del agua y la duración del cultivo (Tabla 7). Los tamaños finales más grandes de los camarones se asociaron con periodos de cultivos más largos, una alta productividad de los estanques y altos niveles de oxígeno disuelto durante la segunda fase de cultivo. Las ocurrencias tempranas de las mortalidades se correlacionaron con altas salinidades del agua de los estanques y baja productividad de los mismos durante la primera fase. Las

mortalidades más severas se observaron cuando ocurrieron tempranamente y fueron precedidas por altas salinidades y bajas productividades de los estanques. En la segunda fase, posteriormente a la ocurrencia de mortalidades masivas severas, se observaron altas tasas de mortalidad, que a su vez se correlacionaron con una alta salinidad y una escasa productividad. La mayor duración del cultivo se asoció a un mayor tamaño final de los camarones y a situaciones en las que la severidad de la enfermedad fue menor.

Tabla 7. Correlaciones significativas entre los parámetros del sub-modelo biológico, las variables de calidad del agua y la duración del cultivo.

Parámetro	Parámetro o variable							
	<i>MT</i>	<i>Z<sub>2</sub></i>	<i>S<sub>1</sub></i>	<i>TR<sub>1</sub></i>	<i>S<sub>2</sub></i>	<i>TR<sub>2</sub></i>	<i>OD<sub>2</sub></i>	<i>DC</i>
<i>W<sub>f</sub></i>						-0.27	0.28	0.39
<i>MT</i>			-0.40	-0.24				0.75
<i>m</i>	-0.68	0.34	0.35	0.32				-0.61
<i>Z<sub>2</sub></i>					0.34	0.21		-0.19

*MT*, tiempo en que aparece la mortalidad masiva; *Z<sub>2</sub>*, tasa de mortalidad durante la segunda fase de cultivo; *S<sub>1</sub>*, y *TR<sub>1</sub>*, salinidad y transparencia en la primera fase; *S<sub>2</sub>*, *TR<sub>2</sub>* y *OD<sub>2</sub>* salinidad, transparencia y oxígeno disuelto en la segunda fase; *DC*, duración del cultivo; *m*, mortalidad por enfermedad.

Los resultados del ANOVA mostraron diferencias significativas entre los ciclos de producción en términos de los parámetros y variables mostrados en la Tabla 7 (Fig. 2). El tamaño final de los camarones mostró una tendencia a ser mayor en los últimos ciclos de producción. Por otro lado, la severidad de la enfermedad, como lo indica la ocurrencia temprana de mortalidades masivas y las altas tasas de mortalidad durante la segunda fase de cultivo, tendieron a aumentar de 2013-I hasta 2014-I; posteriormente a dicho periodo, la severidad de la AHPND disminuyó. La salinidad mostró una tendencia general decreciente, mientras que la productividad de los

estanques, después de disminuir en un periodo inicial, mejoró significativamente durante los ciclos de producción de 2014-II a 2016. No se observó un patrón claro para el oxígeno disuelto, mientras que la duración del cultivo fue significativamente mayor en los últimos tres ciclos de producción.

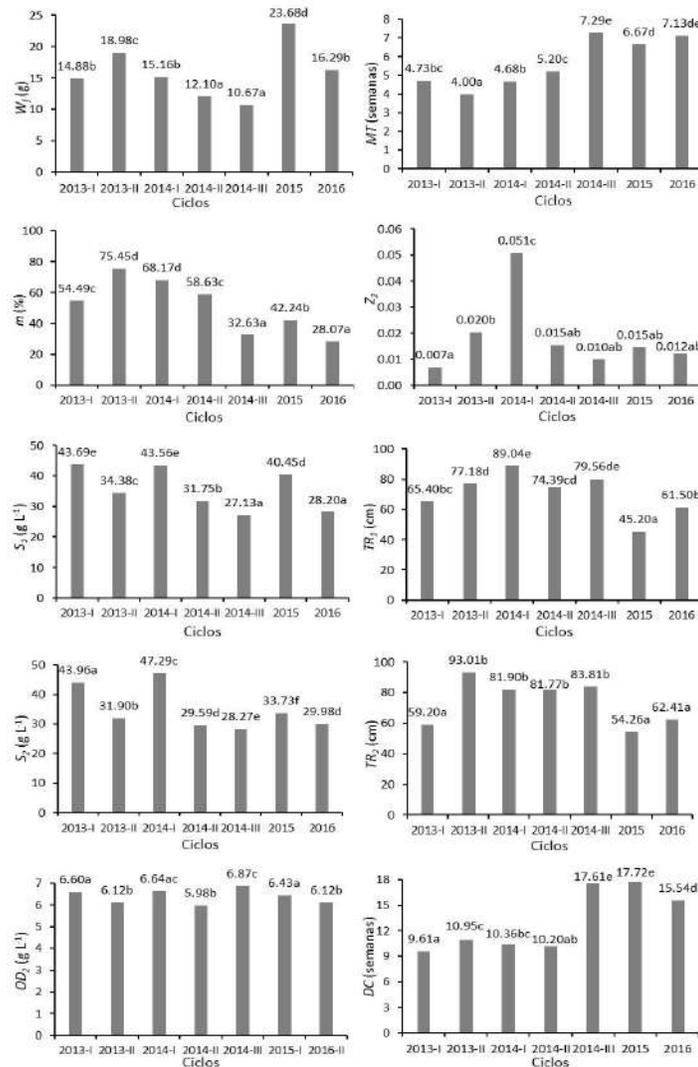


Figura 2. Resultados de ANOVA para la comparación de los valores medios de los parámetros del sub-modelo biológico, las variables de calidad del agua y la duración del cultivo. Los valores que comparten al menos una letra no son significativamente diferentes.  $W_i$ , peso final;  $MT$ , tiempo en que ocurre la mortalidad masiva por enfermedad;  $m$ , mortalidad por enfermedad;  $Z_2$ , tasa de mortalidad durante la segunda fase de cultivo;  $S_1$ ,  $TR_1$ , salinidad y transparencia en la primera fase;  $S_2$ ,  $TR_2$  y  $OD_2$ , salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la segunda fase;  $DC$ , duración del cultivo.

Las ecuaciones resultantes de los análisis de regresión múltiple para la construcción de los sub-modelos de variables calidad del agua y de manejo mostraron que, dependiendo del ciclo de producción, la temperatura del agua del estanque, la salinidad, la transparencia, el tamaño del estanque, el oxígeno disuelto y la duración del cultivo, fueron variables significativas para la predicción de los valores de los parámetros del sub-modelo biológico (Tabla 8). Los resultados de la prueba *t* para evaluar el desempeño del sub-modelo biológico y las ecuaciones de regresión múltiple para la predicción de la biomasa de camarón observada, mostraron que las predicciones son aceptables para todos los ciclos de producción, considerando que la prueba *t* indicó que las pendientes de regresión no diferían significativamente de uno (Fig. 3).

Tabla 8. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo biológico en función de las variables de calidad del agua, el tamaño del estanque y la duración del cultivo. Los valores bajos de *k* indican un rápido crecimiento.

Ciclo	Ecuación
2013-I	$W_f = -3.891098 + 2.833025 OD_2$ $k = 1.322013 - 0.0254928 T_2 + 0.0059719 S_2 + 0.0015178 TR_2$ $Z_1 = 0.0231005 - 0.0000796 T_1 - 0.0000654 OD_1 + 0.0000142 TE + 0.000082 DC$ $MT = 15.84102 - 0.4592067 T_1 + 0.3387886 DC$ $m = -79.6588 + 3.082007 S_1$ $Z_2 = -0.0843574 + 0.0003275 TR_2 + 0.0019701 S_2$
2013-II	$W_f = -48.8431 + 1.809478 T_2 + 1.856487 OD_2$ $k = 0.539523 + 0.0110979 S_2$ $Z_1 = 0.0207881 + 1.29e-06 TR_1 - 9.47e-06 TE$ $MT = 10.53346 - 0.2002277 T_1 - 0.0544241 TE$ $m = 14.18015 + 1.782489 S_1$ $Z_2 = -0.1876897 + 0.0071657 S_2$

Tabla 8. Continuación

---

2014-I	$W_f = 4.178912 + 0.8506192 DC + 0.5218114 TE$ $k = 0.5439327 + 0.0080142 S_2$ $Z_1 = 0.0182804 + 0.0000368 S_1 + 0.0001082 DC$ $MT = -0.5891419 - 0.1079488 TE + 0.5520113 DC$ $m = 92.06849 - 4.975419 DC + 2.345112 PS + 0.2007135 TR_1$
2014-II	$W_f = 9.253715 + 1.540737 DC - 0.4350934 S_2$ $k = 1.05907 - 0.0402236 OD_2 + 0.0063682 TE$ $Z_1 = 0.0288252 - 0.0003739 OD_1 - 0.0001634 T_1$ $MT = 28.12675 - 0.4838215 T_1 - 0.2243571 S_1$ $m = 53.10636 - 1.57046 TE + 0.1690941 TR_1$
2014-III	$W_f = 1.478547 - 0.0335632 TR_2 + 0.6833215 DC$ $k = 0.6272619 + 0.0006228 TR_2 + 0.0114272 DC$ $Z_1 = 0.0251201 + 8.61e-06 TE - 0.000016 DC$ $MT = 4.798603 - 0.0861162 TE + 0.1603386 DC$
2015	$W_f = -6.163559 - 0.048953 TR_2 + 1.834208 DC$ $k = 0.7145074 + 0.0088441 DC$ $Z_1 = 0.0338128 - 0.0003794 T_1$ $MT = 57.71292 - 1.569281 T_1$ $m = -24.71881 + 1.660137 S_1$
2016	$W_f = -0.8571667 + 1.105264 DC$ $k = 0.7998828 + 0.0045527 DC$ $m = 5.574075 + 0.2555831 TR_1 + 1.206005 TE$

---

$W_f$ , peso final;  $k$ , coeficiente de crecimiento;  $Z_1$  y  $Z_2$ , tasas de mortalidad durante la primera y segunda fase de cultivo;  $m$ , mortalidad por la enfermedad;  $MT$ , tiempo en que ocurrió la mortalidad masiva por la enfermedad;  $TE$ , tamaño del estanque;  $DC$ , duración del cultivo;  $T_1$ ,  $S_1$ ,  $TR_1$  y  $OD_1$ , temperatura, salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la primera fase de cultivo;  $T_2$ ,  $S_2$ ,  $TR_2$  y  $OD_2$ , temperatura, salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la segunda fase.

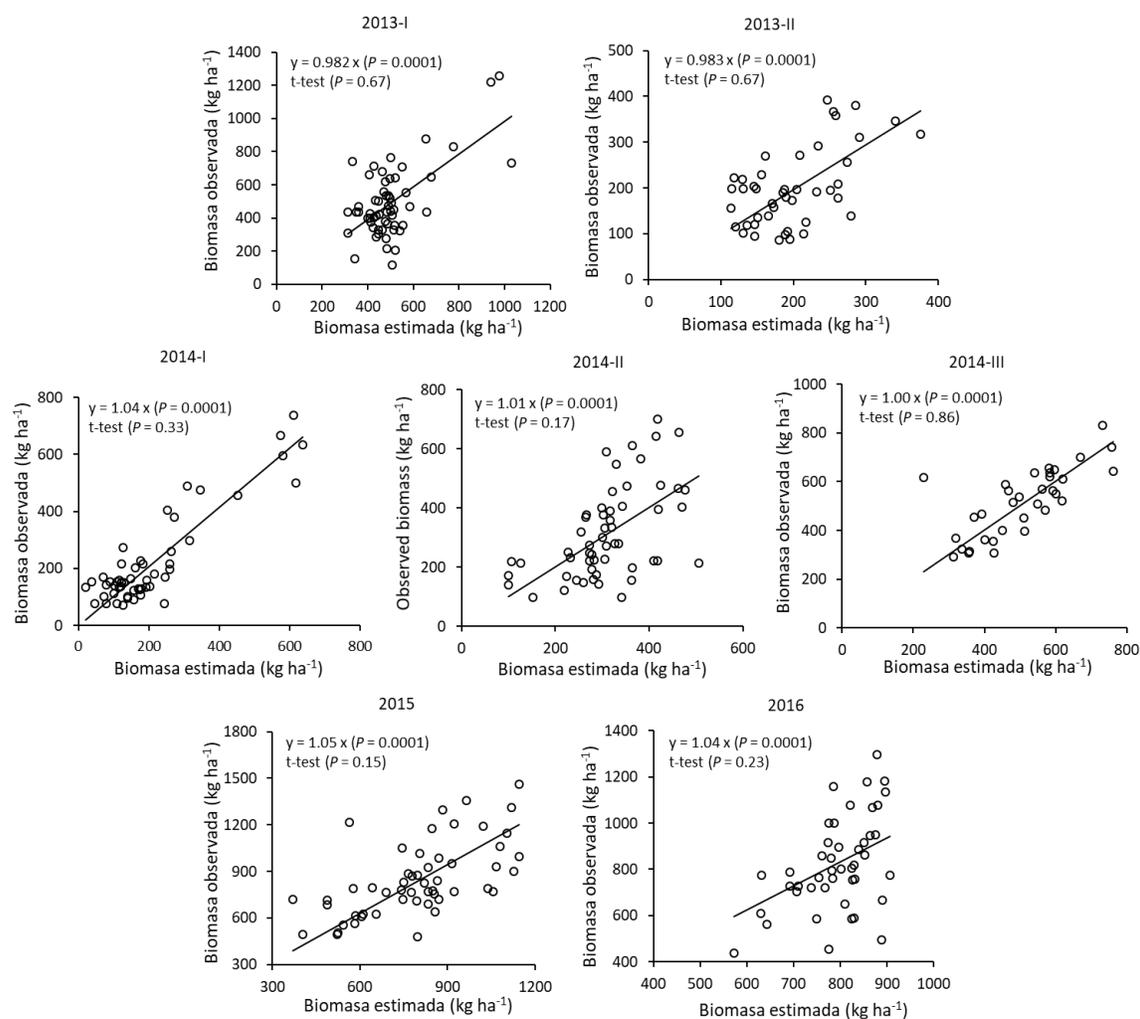


Figura 3. Regresiones lineales simples y pruebas *t* que indican que los valores de las pendientes no difieren significativamente de 1 y que el sub-modelo biológico y las ecuaciones de regresión en la Tabla 8 predicen adecuadamente la biomasa de camarón.

Los resultados obtenidos con el análisis dinámico del sub-modelo biológico se muestran en la Figura 4, e indican que el efecto más perjudicial de la AHPND se observó en 2013-II, cuando la producción se redujo de 502 kg ha<sup>-1</sup> (en 2013-I) a 197 kg ha<sup>-1</sup>. Después de eso, las pérdidas derivadas de la enfermedad disminuyeron progresivamente, y la producción de camarón aumentó hasta alcanzar su máximo en 2015 (812 kg ha<sup>-1</sup>). El alto rendimiento obtenido en 2014-III, fue consecuencia de un largo período de cultivo en condiciones invernales. La dinámica de producción durante

2015 y 2016 fue muy similar, particularmente durante la segunda fase de cría, lo que indica la estabilización de las condiciones operativas de la granja. La principal causa de la diferencia en la producción final entre 2015 y 2016 fue un período de cultivo más prolongado (aproximadamente dos semanas) en 2015. Las diferencias entre las biomazas promedio observadas en la base de datos (Tabla 2) y las calculadas con el sub-modelo biológico al tiempo de cosecha (Fig. 4) fueron pequeñas, oscilando entre 0.76 % - 7.2 % (media = 3.1 %).

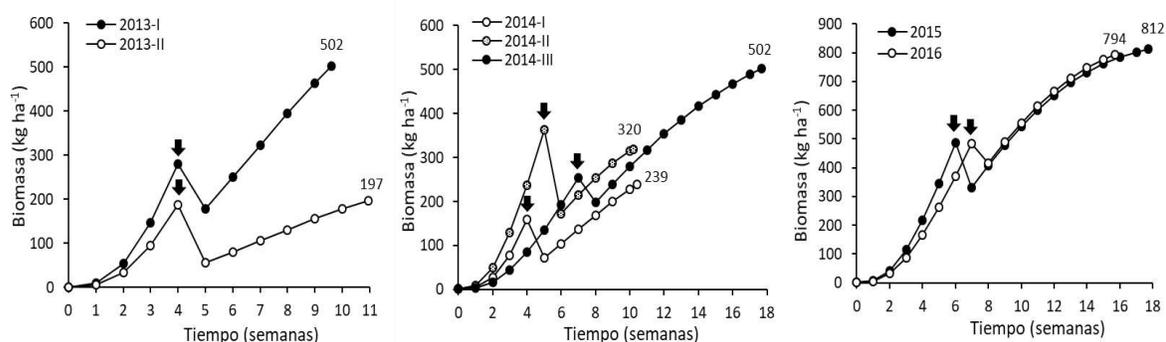


Figura 4. Dinámica de la producción de camarón predicha utilizando el sub-modelo biológico y las ecuaciones de regresión de la Tabla 8. Las flechas muestran los tiempos en que se presentan pérdidas de producción causadas por la AHPND.

## 5.2 *Análisis de la variabilidad de la producción*

En la Figura 5, se presentan las distribuciones de probabilidad de la producción de camarón afectada por la AHPND, e inferidas a partir de las variaciones estocásticas de los parámetros del sub-modelo biológico y de las variables de calidad del agua para los tiempos en que se efectuaron las cosechas; mientras que en la Figura 6 se presentan los valores promedio, de desviación estándar y del coeficiente de variación de la producción para los diferentes ciclos.

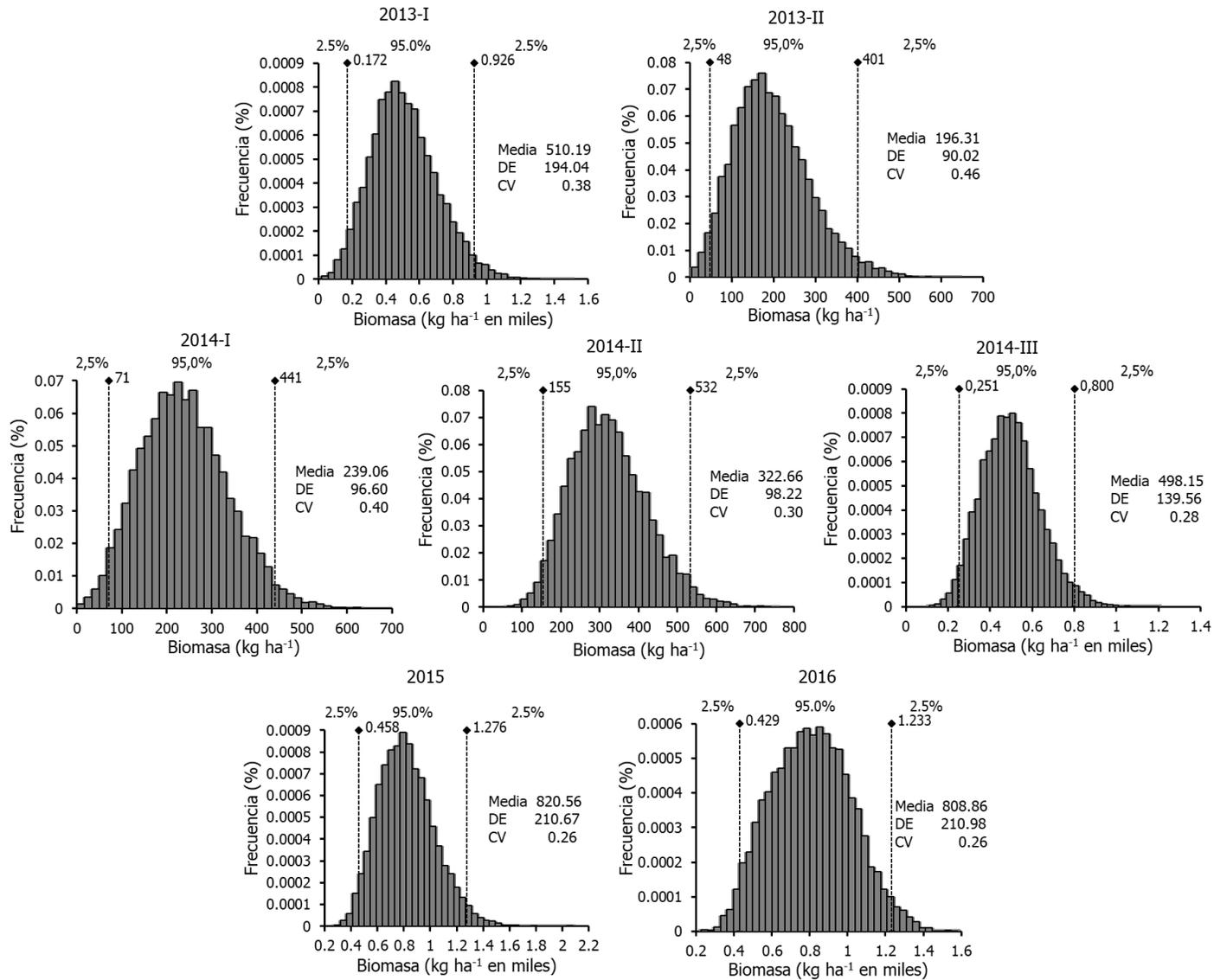


Figura 5. Distribuciones de probabilidad de la producción. Se indican los intervalos de 95 % de confianza de la producción.

De acuerdo con esos resultados, la variabilidad de la producción disminuyó conforme pasaron los ciclos, a medida que mejoraron progresivamente las condiciones de la granja. De acuerdo con los valores del coeficiente de variación, la mayor incertidumbre en la producción se presentó en el ciclo 2013-II, mientras que la menor incertidumbre ocurrió cuando la enfermedad fue menos severa (2015 y 2016).

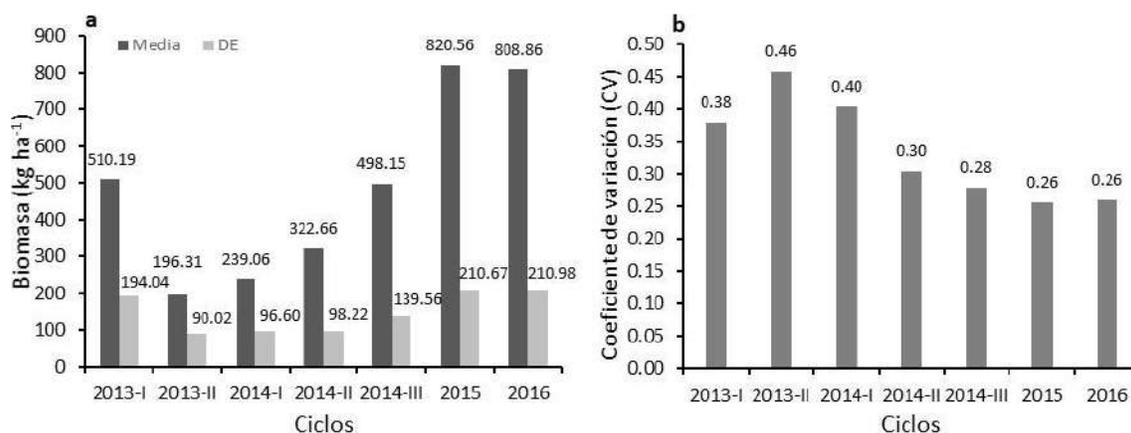


Figura 6. Producción obtenible (a) e incertidumbre asociada (b) para los distintos ciclos cuando se considera la variabilidad estocástica de los parámetros del sub-modelo biológico y de las variables de calidad del agua. DE es la desviación estándar.

### 5.3 Análisis de sensibilidad de la producción

Los resultados del análisis de sensibilidad de la producción a la variabilidad estocástica de los parámetros del sub-modelo biológico y de las variables de calidad del agua se muestran en la Tabla 9. De acuerdo con los resultados, en todos los ciclos la variabilidad de la producción estuvo principalmente determinada por la variabilidad de la mortalidad masiva causada por la AHPND ( $m_e$ ). Las variaciones del peso final del camarón ( $W_{fe}$ ) tuvieron una importancia alta en casi todos los ciclos, seguida por las de la tasa instantánea de mortalidad posterior a la mortalidad masiva ( $Z_{2e}$ ). No obstante, cuando mejoraron las condiciones de la granja en los ciclos 2015 y 2016, dicha tasa de mortalidad desplazó en importancia al peso final de los camarones. El tiempo en que ocurrió la mortalidad masiva por la enfermedad

( $TM_e$ ) tuvo su mayor importancia en los ciclos más afectados por la enfermedad, pasando a tener relevancia casi nula en los ciclos en que disminuyó la severidad de la misma.

En el caso de las variables de calidad del agua, se encontró que la salinidad durante la primera fase del cultivo ( $S_1$ ), fue la más importante, particularmente durante los ciclos en que la enfermedad fue más severa y que, en los siguientes ciclos, en la mayoría de los casos es desplazada por la transparencia antes y después de que ocurriera la mortalidad masiva ( $TR_1$ ,  $TR_2$ ). El resto de las variables tuvieron importancia media o baja.

Tabla 9. Resultados del análisis de sensibilidad de la producción a la variabilidad estocástica de los parámetros del sub-modelo biológico y de variables de calidad del agua para los diferentes ciclos de producción. Los parámetros y variables se encuentran enlistados en orden de importancia de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión estandarizado (CR). Los factores de riesgo presentan coeficientes negativos.

2013-I		2013-II	
Parámetro	CR	Parámetro	CR
$m_e$	-0.96	$m_e$	-0.70
$W_{fe}$	0.53	$S_{1e}$	-0.57
$S_{1e}$	-0.40	$Z_{2e}$	-0.29
$MT_e$	-0.26	$W_{fe}$	0.19
$Z_{1e}$	0.26	$S_{2e}$	-0.12
$OD_{2e}$	0.19	$T_{2e}$	0.09
$K_e$	-0.17	$OD_{2e}$	0.07
$Z_{2e}$	-0.04	$MT_e$	-0.04
$S_{2e}$	-0.04	$T_{1e}$	0.01
$TR_{2e}$	-0.03	$TR_{1e}$	0.00
$T_{1e}$	0.02		

Tabla 9. Continuación

2014-I		2014-II		2014-III	
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
$m_e$	-0.84	$m_e$	-0.63	$m_e$	-0.75
$MT_e$	0.58	$W_{fe}$	0.53	$W_{fe}$	0.47
$Z_{1e}$	0.45	$TR_{1e}$	-0.36	$Z_{2e}$	-0.38
$Z_{2e}$	-0.39	$Z_{2e}$	-0.31	$TR_{2e}$	-0.21
$TR_{1e}$	-0.30	$S_{2e}$	-0.22	$MT_e$	-0.04
$W_{fe}$	-0.07	$S_{1e}$	0.06		
$S_{1e}$	0.01	$MT_e$	-0.05		
$S_2$	0.01	$T_{1e}$	0.02		
$K_e$	-0.01	$Z_{1e}$	-0.01		
		$OD_{1e}$	0.01		
		$OD_{2e}$	0.00		
2015			2016		
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
$m_e$	-0.82	$m_e$	-0.58		
$Z_{2e}$	-0.53	$Z_{2e}$	-0.58		
$W_{fe}$	0.42	$W_{fe}$	0.44		
$S_{1e}$	-0.26	$TR_{1e}$	-0.29		
$TR_2$	-0.12	$Z_{1e}$	-0.17		
$MT_e$	-0.09	$MT_e$	-0.02		
$T_{1e}$	0.05				

$W_{fe}$ , peso final;  $k_e$ , coeficiente de crecimiento;  $Z_{1e}$  y  $Z_{2e}$ , tasas de mortalidad durante la primera y segunda fase de cultivo;  $m_e$ , mortalidad por la enfermedad;  $MT_e$ , tiempo en que ocurrió la mortalidad masiva por la enfermedad;  $T_{1e}$ ,  $S_{1e}$ ,  $TR_{1e}$  y  $OD_{1e}$ , temperatura, salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la primera fase de cultivo;  $T_{2e}$ ,  $S_{2e}$ ,  $TR_{2e}$  y  $OD_{2e}$ , temperatura, salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la segunda fase. El subíndice e indica que corresponden a valores estocásticos.

#### 5.4 Sub-modelos tecnológicos

Se obtuvieron resultados significativos ( $P < 0.05$ ), en términos del análisis de varianza de regresión, cuando se ajustaron las ecuaciones 6 y 7 correspondientes al alimento acumulado y al número de horas acumuladas de recambio de agua en función del tiempo (Fig. 7).

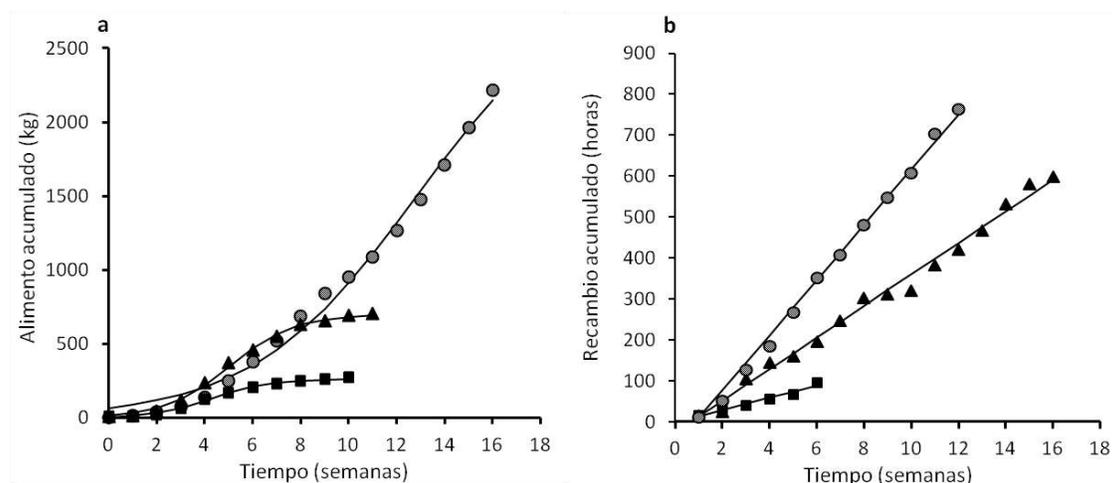


Figura 7. Ejemplos de resultados del ajuste de las ecuaciones para el cálculo del alimento acumulado (a) y de recambio de agua acumulado (b).

Las ecuaciones resultantes de los análisis de regresión múltiple para la construcción de los sub-modelos de variables calidad del agua y de manejo indicaron que, dependiendo del ciclo de producción, el alimento acumulado final ( $A_F$ ) se relacionó positivamente con la densidad, la duración del cultivo y transparencia, y en forma negativa, con la salinidad y tamaño del estanque (Tabla 10). Además, los parámetros  $d$  y  $b$  se relacionaron de manera significativa con las variables de calidad del agua antes señaladas, además de la temperatura. La capacidad predictiva del sub-modelo fue satisfactoria para todos los ciclos de producción, según lo indicaron los resultados de la regresión lineal simple entre los valores finales observados y estimados del alimento acumulado hasta el tiempo de la cosecha, y las pruebas  $t$ , que indicaron que las pendientes de regresión no difirieron significativamente de uno (Fig. 8).

Tabla 10. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo del alimento acumulado en función de las variables de calidad del agua, el tamaño del estanque, la duración del cultivo y la densidad.

Ciclo	Ecuación
2013-I	$A_F = 2295.061 - 58.52582 S + 91.88913 D$ $d = -0.6578031 + 0.0339504 S$ $b = 3.573792 - 0.1095105 D + 0.2173121 DC$
2013-II	$A_F = 877.1205 - 14.11487 S$ $d = -0.3170282 + 0.0375811 S$ $b = 11.89495 - 0.1457364 T - 0.0928891 S$
2014-I	$A_F = -523.3451 - 52.30312 TE + 113.7177 DC$ $d = 1.339152 + 0.0179261 TE - 0.0631798 DC$ $b = 0.4021841 - 0.1938629 TE + 0.5888535 DC$
2014-II	$A_F = 444.1881 + 0.8788502 TR$ $d = 2.021989 - 0.0425739 DC - 0.0269951 S$ $b = -0.4189724 + 0.188719 DC + 0.0714764 TE + 0.1153468 S$
2014-III	$A_F = 462.1431 + 5.901718 TR$ $d = 0.62704 - 0.0182583 DC$ $b = -1.646307 + 0.7596204 DC$
2015	$A_F = 4281.775 - 79.37898 S$ $d = 0.4450423 - 0.0086219 DC$ $b = 10.9009 + 0.0229308 TR$
2016	$A_F = -371.2636 - 97.64358 TE + 159.8757 DC$ $d = 0.9583601 - 0.0376587 DC$ $b = -1.479635 + 0.7567838 DC$

$A_F$ , es el alimento acumulado al final del cultivo,  $d$  y  $b$  son parámetros de ajuste.  $S$ , salinidad;  $T$ , temperatura y  $TR$ , transparencia.

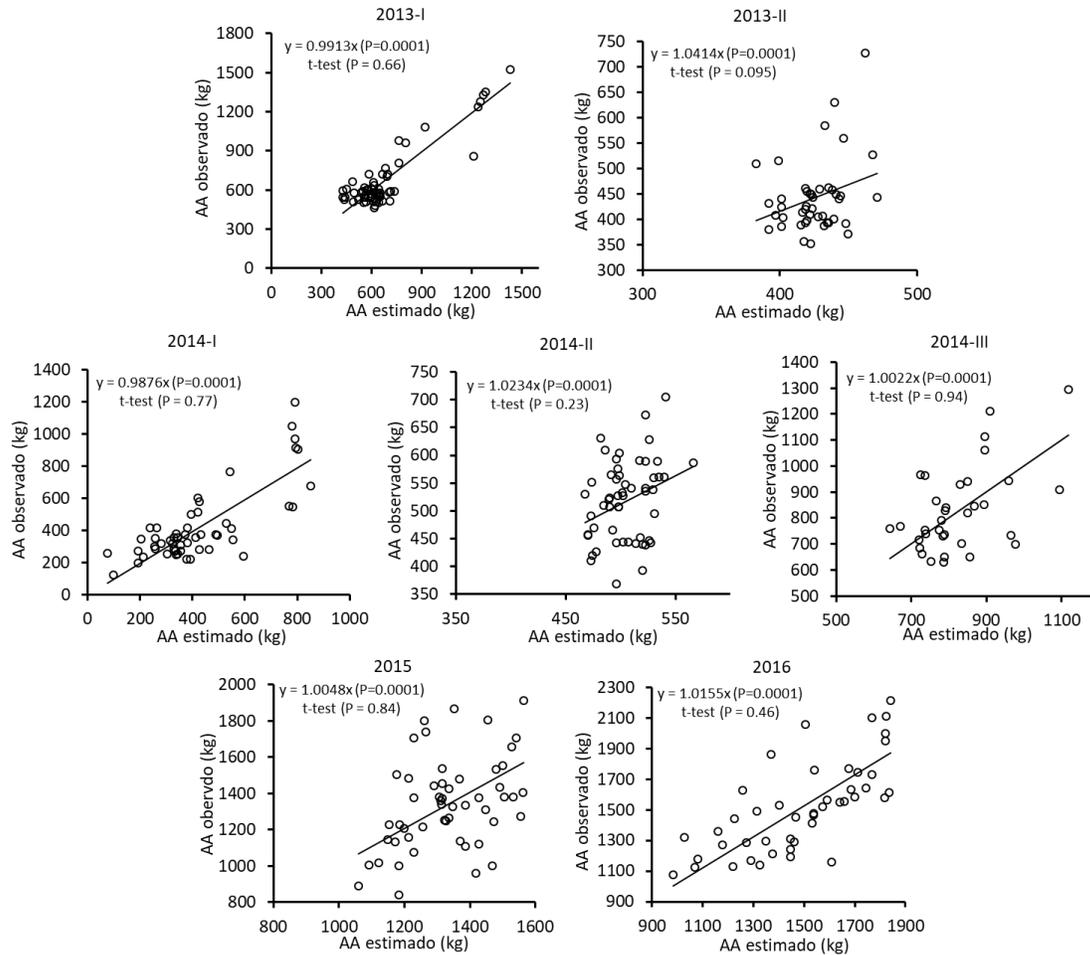


Figura 8. Regresiones lineales simples y pruebas  $t$  que indican que los valores de pendiente no difieren significativamente de 1 y que el modelo tecnológico y las ecuaciones de regresión de la Tabla 10 predicen adecuadamente el alimento acumulado al tiempo de la cosecha (AA).

Las ecuaciones resultantes de los análisis de regresión múltiple para la construcción de los sub-modelos de variables calidad del agua y de manejo mostraron que la pendiente ( $a_R$ ) del modelo que predice el recambio final acumulado se relacionó negativamente con el oxígeno disuelto (71.4 % del total de los ciclos) y la transparencia, además del tamaño del estanque y salinidad (Tabla 11), mientras que el intercepto del modelo ( $b_R$ ), se relacionó de manera inversamente proporcional con el oxígeno disuelto, la transparencia y la salinidad. La capacidad predictiva de los sub-modelos fue satisfactoria para todos los ciclos

de producción, según lo indicaron los resultados del análisis de regresión lineal simple entre los valores estimados y observados, y las pruebas *t*, mismas que indicaron que las pendientes de regresión no difieren significativamente de uno (Fig. 9).

Tabla 11. Ecuaciones resultantes del análisis de regresión múltiple para calcular los parámetros del sub-modelo de recambio de agua en función de las variables de calidad del agua, el tamaño del estanque y densidad.

Ciclo	Ecuación
2013-I	$a_R = 112.1302 - 0.3090207 TR - 14.44929 OD + 3.669975 D$ $b_R = -110.4548 + 10.64226 OD + .4382986 TR$
2013-II	$a_R = 180.6536 - 21.80879 OD - 0.1652459 TR$ $b_R = -291.3553 + 0.2855012 TR + 17.1374 OD + 4.648016 S$
2014-I	$a_R = 34.48101 - 2.842526 TE$ $b_R = -0.3227a_R + 2.2135$
2014-II	$a_R = 202.355 - 15.94107 OD - 2.464952 S$ $b_R = -116.0559 + 17.13514 OD$
2014-III	$a_R = -150.7622 + 10.40 T - 14.01 OD$ $b_R = -0.278a_R + 7.4609$
2015	$a_R = -0.1888 b_R + 26.47$ $b_R = -196.2146 + 4.842226 S$
2016	$a_R = 194.6687 - 0.665961 TR - 16.86748 OD$ $b_R = -333.3693 + 1.09316 TR + 36.44442 OD$

$a_R$  y  $b_R$  son coeficientes de regresión. *TR*, transparencia; *OD*, oxígeno disuelto y *S*, salinidad.

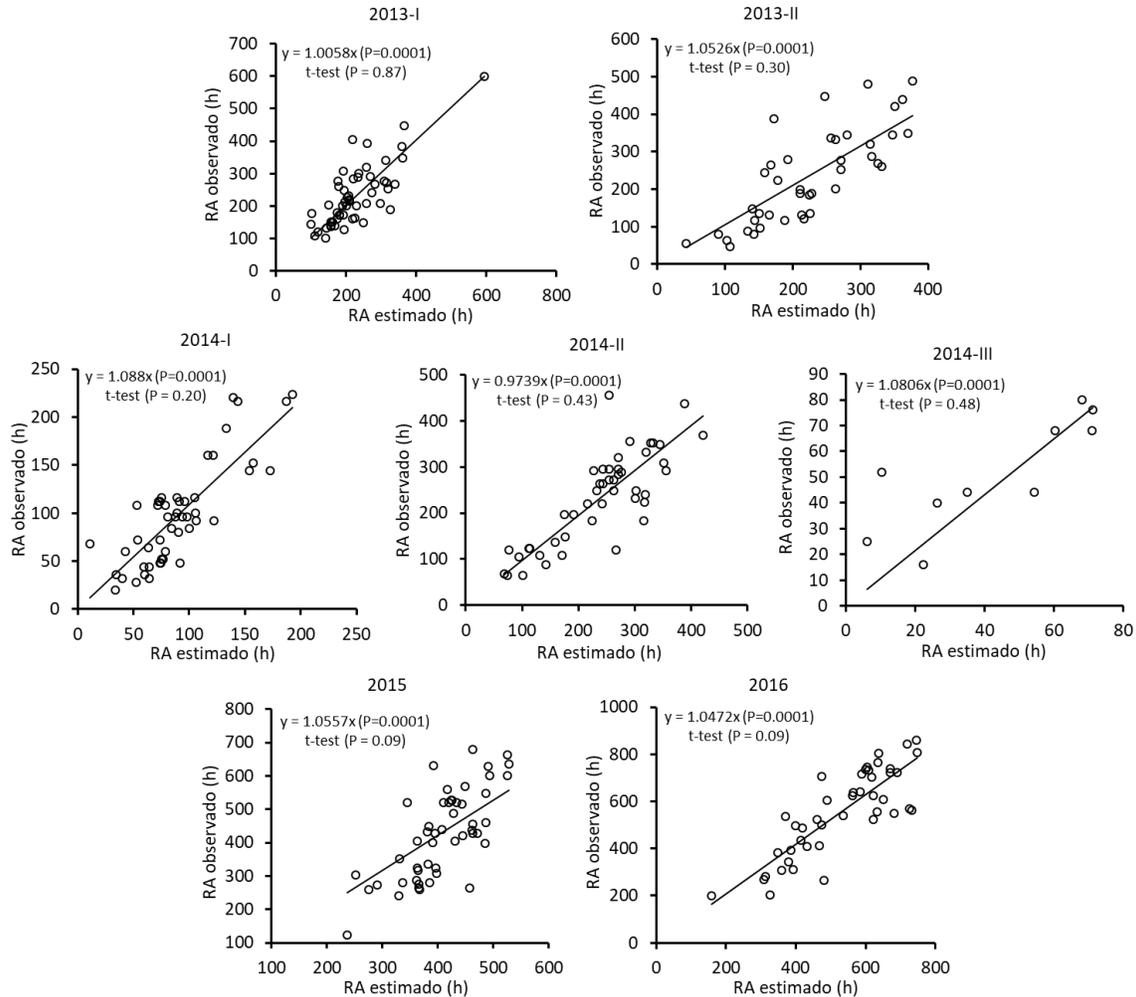


Figura 9. Regresiones lineales simples y pruebas *t* que indican que los valores de pendiente no difieren significativamente de 1 y que el modelo tecnológico y las ecuaciones de regresión en la Tabla 11 predicen adecuadamente el recambio de agua acumulado al tiempo de la cosecha (*RA*).

### 5.5 Análisis de riesgo económico

En la Figura 10 se presentan, en función del tiempo, los valores promedio de costos, ingresos, utilidad (o pérdida), la relación beneficio/costo y la probabilidad de obtener pérdidas para los diferentes escenarios de severidad de la AHPND. El análisis indicó que la severidad tiene un efecto muy notable sobre las proyecciones de utilidades y pérdidas y del beneficio/costo. En los escenarios correspondientes a

los ciclos 2013-I, 2015 y 2016, las mayores utilidades y relaciones beneficio/costo se obtienen al final del cultivo, en tanto que en el resto de los escenarios no se proyectan utilidades para ningún momento del periodo de cultivo, y únicamente son esperables pérdidas económicas.

En la Figura 11 se presentan las distribuciones de probabilidad de la utilidad (o pérdida), inferidas a partir de las variaciones estocásticas de los parámetros del modelo bioeconómico para los distintos escenarios de severidad de la AHPND a los tiempos correspondientes al final del cultivo. Tales distribuciones muestran que los peores resultados se obtienen con el escenario donde la severidad de la enfermedad es más alta (2013-II), con una pérdida media de \$ -14,013 ha<sup>-1</sup> una relación beneficio/costo de 0.52 y una probabilidad de tener pérdidas tan alta como en 95.7 % de los casos (estanques). En contraste, los mejores resultados se proyectan bajo los escenarios correspondientes a 2015 y 2016 donde la severidad de la enfermedad fue menor y se esperan, respectivamente, utilidades medias de \$ 12,881 ha<sup>-1</sup> y \$ 3,947 ha<sup>-1</sup>, relaciones beneficio/costo de 1.25 y 1.08, y probabilidades de registrar pérdidas en 27.9 % y 44.3 % de los casos.

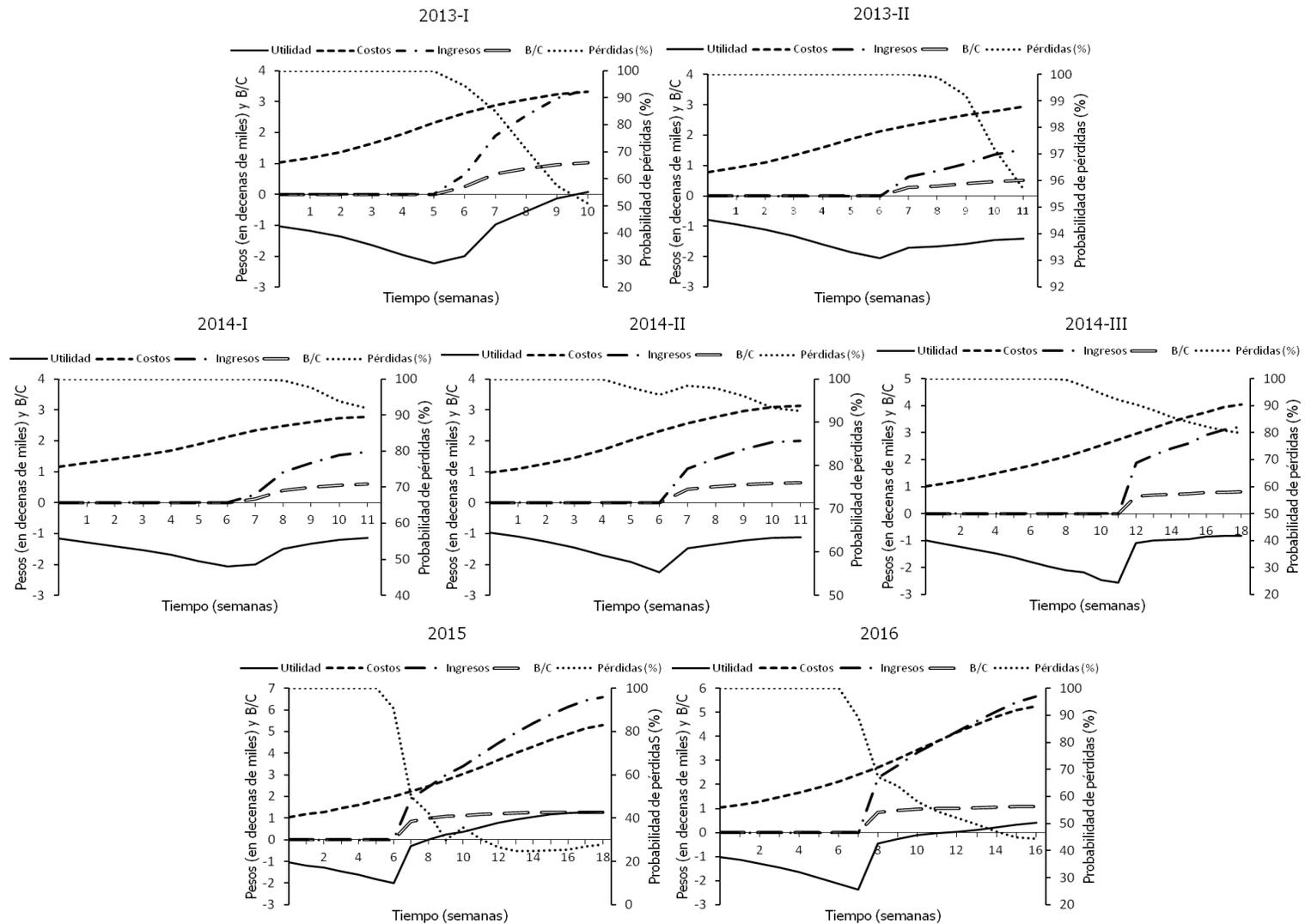


Figura 10. Desempeño económico proyectado, en función del tiempo de cultivo, para los diferentes escenarios correspondientes a los ciclos de producción.

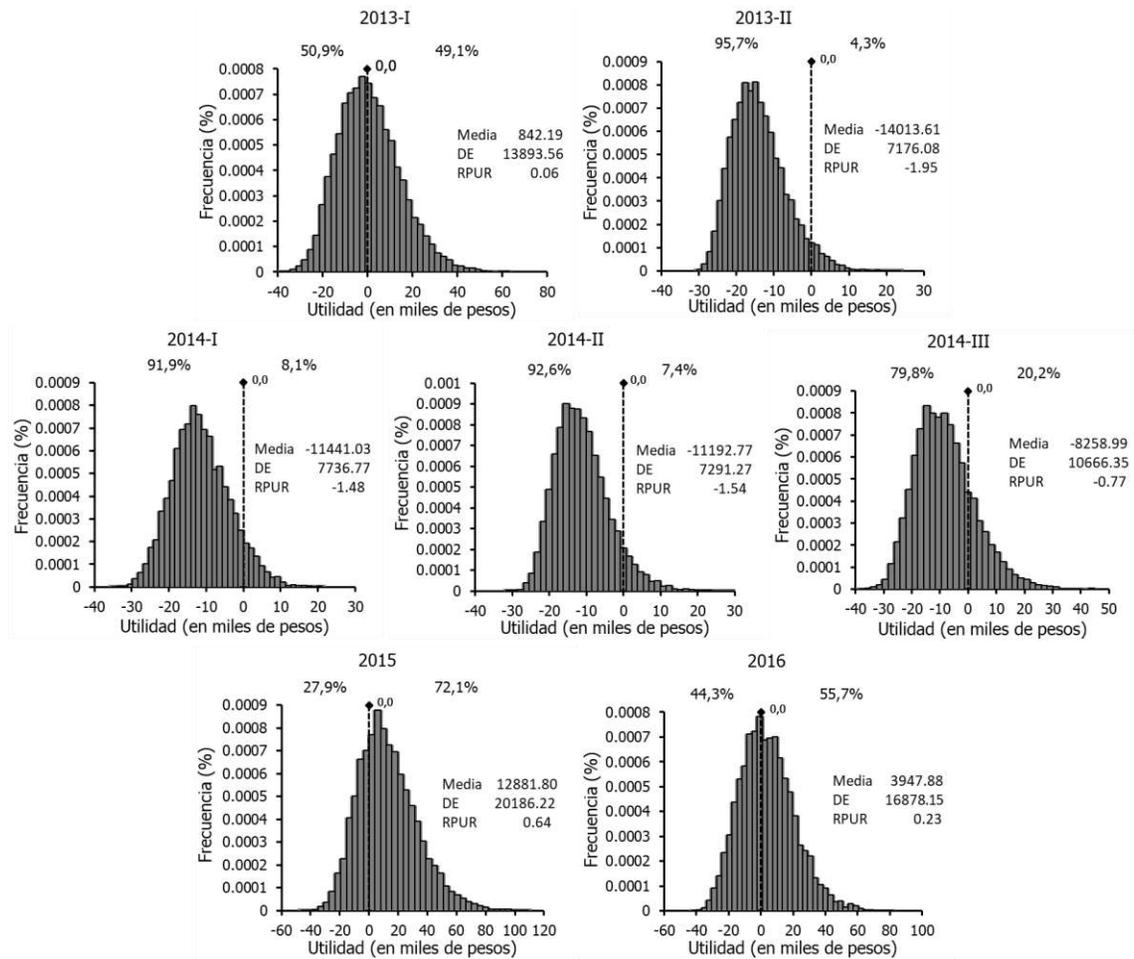


Figura 11. Distribuciones de probabilidad de la utilidad (o pérdidas) para diferentes escenarios de severidad de la AHPND correspondientes a los diferentes ciclos de producción y a las semanas en que se presenta la mayor utilidad (o menor pérdida) en cada caso. En la parte superior de cada distribución se indican los porcentajes de casos que pueden registrar utilidades (a la derecha) y pérdidas (a la izquierda). Los escenarios de los ciclos 2013-II, 2014-I, II y III corresponden a los resultados obtenibles en la última semana del cultivo aunque, ante dichos escenarios, resulta más conveniente abstenerse de llevar a cabo el cultivo.

En la Figura 12 se presentan, en forma resumida, los indicadores de riesgo económico correspondientes a los distintos escenarios de operación, donde se observa que ambos indicadores señalan, consistentemente, que el escenario de mayor riesgo es el asociado al ciclo 2013-II, mientras que el menos riesgoso se asocia a las condiciones representativas del ciclo 2015.

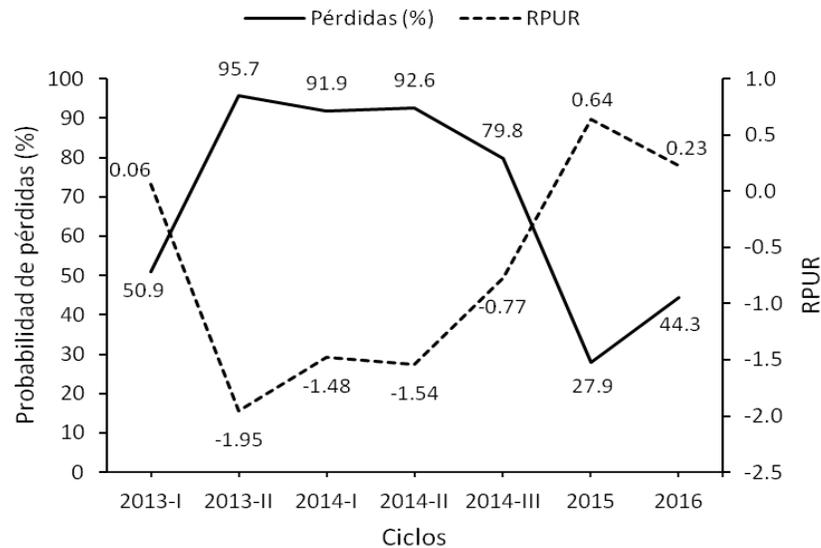


Figura 12. Riesgo económico asociado a diferentes escenarios de severidad de la AHPND correspondientes a los diferentes escenarios de producción. El riesgo se calcula como la probabilidad de pérdidas y el rendimiento (o pérdida) por unidad de riesgo (RPUR).

En general, las utilidades (o pérdidas) así como el riesgo económico se encuentran fuertemente determinados por las pérdidas en la producción asociados a la AHPND. Considerando todos los escenarios, se observan correspondencias sistemáticas y significativas ( $P < 0.05$ ) entre las utilidades (o pérdidas), el riesgo económico y las producciones obtenibles, en la que las ganancias y el porcentaje de casos que presentan pérdidas son, respectivamente, directa e inversamente proporcionales al volumen medio de camarón producido (Figura 13a, b).

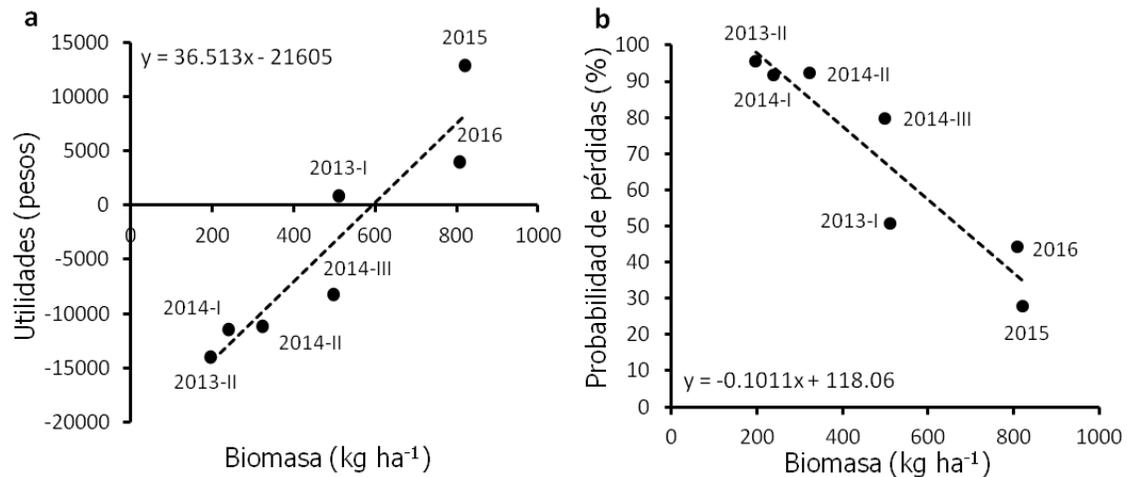


Figura 13. Relación entre las utilidades (a), la probabilidad de pérdida (b) y la producción promedio de camarón obtenida durante los siete ciclos de producción.

### 5.6 Análisis de sensibilidad de la utilidad (o pérdida)

En la tabla 12 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de la utilidad a la variabilidad estocástica de los parámetros del modelo bioeconómico y de las variables de calidad del agua. El análisis muestra que las utilidades fueron más sensibles a variaciones en la mortalidad masiva causada por la enfermedad ( $m_e$ ) y a la talla final que alcanza el camarón al momento de la cosecha ( $W_{fe}$ ), seguidos por la tasa instantánea de mortalidad posterior a la mortalidad masiva ( $Z_{2e}$ ) y al precio del camarón ( $PC_e$ ). También puede observarse que, en escenarios de mayor severidad de la enfermedad (2013-II y 2014-I) y cuando la severidad de la enfermedad disminuye, como en los ciclos 2015 y 2016, dicha tasa de mortalidad desplazó en importancia al precio del camarón. En general, se observó un comportamiento parecido al de los parámetros en el análisis de sensibilidad de la producción, en particular, en relación con la salinidad en la primera fase del cultivo ( $S_{1e}$ ) y la transparencia ( $TR_{1e}$ ,  $TR_{2e}$ ). Además, el alimento final acumulado ( $A_{Fe}$ ) adquiere importancia media en los escenarios correspondientes a los ciclos 2014-I al 2016. El resto de los parámetros tuvieron importancia media o baja.

Tabla 12. Resultados del análisis de sensibilidad de la utilidad (o pérdida) a la variabilidad estocástica de los parámetros del modelo bioeconómico y de las variables de calidad del agua para los diferentes escenarios de severidad de la AHPND. Los parámetros y variables se encuentran enlistados en orden de importancia de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de regresión estandarizado (CR). Los factores de riesgo presentan coeficientes negativos.

2013-I		2013-II	
Parámetro	CR	Parámetro	CR
$m_e$	-0.88	$m_e$	-0.69
$W_{fe}$	0.45	$S_{1e}$	-0.54
$S_{1e}$	-0.37	$Z_{2e}$	-0.28
$PC_e$	0.30	$PC_e$	0.26
$OD_{2e}$	0.20	$W_{fe}$	0.15
$A_{Fe}$	-0.14	$S_{2e}$	-0.12
$S_{Ae}$	0.12	$Z_{1e}$	-0.12
$Z_{2e}$	-0.08	$T_{2e}$	0.09
$CA_e$	-0.06	$OD_{2e}$	0.08
$OD_{Ae}$	0.05	$a_{Re}$	-0.08
$a_{Re}$	-0.04	$CA_e$	-0.06
$S_{2e}$	-0.04	$MT_e$	0.06
$TR_{2e}$	-0.03	$A_{Fe}$	-0.06
$OD_{Re}$	0.03	$OD_{Re}$	0.05
$MT_e$	-0.02	$S_{Ae}$	0.04
$T_{1e}$	0.02	$TR_{Re}$	0.02

2014-I		2014-II		2014-III	
Parámetro	CR	Parámetro	CR	Parámetro	CR
$m_e$	-0.80	$W_{fe}$	0.55	$W_{fe}$	0.56
$Z_{2e}$	-0.33	$m_e$	-0.52	$m_e$	-0.52
$W_{fe}$	0.31	$PC_e$	0.34	$PC_e$	0.37
$A_{Fe}$	-0.30	$TR_{1e}$	-0.30	$Z_{2e}$	-0.32
$d_e$	-0.30	$Z_{2e}$	-0.26	$TR_{2e}$	-0.25

Tabla 12. Continuación

$TR_{1e}$	-0.29	$S_{2e}$	-0.23	$A_{Fe}$	-0.24
$PC_e$	0.26	$A_{Fe}$	-0.16	$TR_{Ae}$	-0.18
$a_{Re}$	-0.07	$CA_e$	-0.08	$CA_e$	-0.09
$CA_e$	-0.05	$a_{Re}$	-0.08	$b_e$	0.09
$MT_e$	-0.03	$S_{1e}$	0.05	$OD_{Re}$	0.04
$CPL_e$	-0.01	$OD_{Re}$	0.05	$MT_e$	-0.03
$K_e$	0.01	$S_{Re}$	0.05	$a_{Re}$	-0.03
		$TR_{Ae}$	-0.05	$d_e$	-0.02
		$MT_e$	-0.05	$CPL_e$	-0.01
		$T_{1e}$	0.02		
		$S_{Ae}$	0.02		
	2015		2016		
	Parámetro	CR	Parámetro	CR	
	$m_e$	-0.68	$W_{fe}$	0.51	
	$W_{fe}$	0.50	$Z_{2e}$	-0.45	
	$Z_{2e}$	-0.43	$m_e$	-0.44	
	$PC_e$	0.40	$PC_e$	0.41	
	$A_{Fe}$	-0.23	$A_{Fe}$	-0.27	
	$S_{1e}$	-0.21	$TR_{1e}$	-0.22	
	$TR_{2e}$	-0.12	$Z_{1e}$	-0.13	
	$S_{Ae}$	0.11	$CA_e$	-0.10	
	$CA_e$	-0.08	$TR_{Re}$	0.08	
	$MT_e$	-0.07	$b_e$	0.05	
	$b_e$	0.06	$OD_{Re}$	0.04	
	$T_{1e}$	0.04	$d_e$	-0.03	
	$a_{Re}$	-0.04	$b_{Re}$	-0.01	
	$TR_{Ae}$	0.03	$MT_e$	-0.01	
	$d_e$	-0.03	$a_{Re}$	-0.01	
	$b_{Re}$	-0.02			

Tabla 12. Continuación

$W_{fe}$ , peso final;  $k_e$ , coeficiente de crecimiento;  $Z_{1e}$  y  $Z_{2e}$ , tasas de mortalidad durante la primera y segunda fase de cultivo;  $m_e$ , mortalidad por la enfermedad;  $MT_e$ , tiempo en que ocurrió la mortalidad masiva por la enfermedad;  $T_{1e}$ ,  $S_{1e}$ ,  $TR_{1e}$  y  $DO_{1e}$ , temperatura, salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la primera fase de cultivo;  $T_{2e}$ ,  $S_{2e}$ ,  $TR_{2e}$  y  $DO_{2e}$ , temperatura, salinidad, transparencia y oxígeno disuelto durante la segunda fase;  $A_{Fe}$ , alimento acumulado al final del cultivo;  $b_e$  y  $d_e$ , parámetros de ajuste en el modelo de alimento;  $S_{Ae}$ ,  $TR_{Ae}$  y  $DO_{Ae}$ , salinidad, transparencia y oxígeno disuelto para la predicción de los parámetros del modelo de alimento;  $a_{Re}$ , número de horas de recambio de agua acumuladas por unidad de tiempo y  $b_{Re}$ , parámetro de ajuste en el modelo de recambio de agua;  $S_{Re}$ ,  $TR_{Re}$  y  $DO_{Re}$ , salinidad, transparencia y oxígeno disuelto para la predicción de los parámetros del modelo de recambio de agua;  $PC_e$ , precio de venta del camarón;  $CA_e$ , costo del alimento;  $CPL_e$ , costo de postlarva. Subíndice e indica el valor estocástico de los parámetros.

Considerando la importancia de la mortalidad causada por la AHPND, se establecieron relaciones significativas entre la utilidad (o pérdida) y el porcentaje de mortalidad atribuible a la enfermedad ( $P < 0.05$ ) y la probabilidad de pérdida y la mortalidad por la enfermedad ( $P < 0.05$ ) para los distintos escenarios de producción. En estas relaciones se excluyó el escenario de cultivo invernal (2014-III) por las condiciones atípicas en que se llevó a cabo el cultivo. De acuerdo con los resultados, a medida que la mortalidad provocada por la enfermedad es mayor, se obtienen menores utilidades y un mayor porcentaje de casos que registran pérdidas (Fig.14a, b).

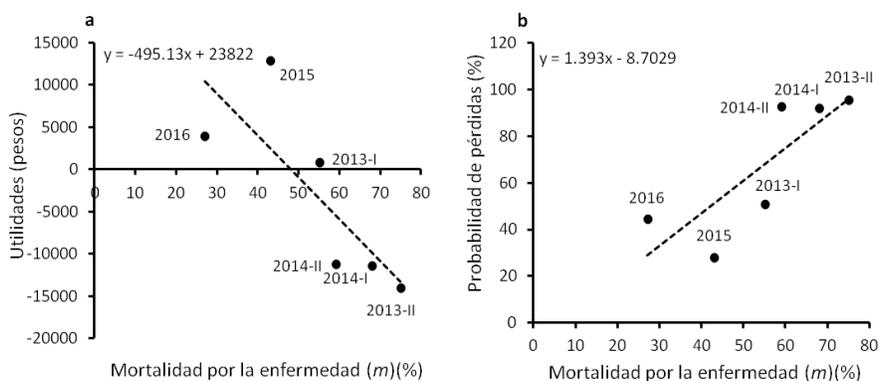


Figura 14. Relaciones entre la utilidad (o pérdida) (a) y la probabilidad de pérdidas (b) y la mortalidad causada por la enfermedad para los diferentes escenarios de producción.

En la Figura 15a, se presentan los resultados de la simulación llevada a cabo para evaluar el riesgo de que, el valor promedio de las utilidades (o pérdidas) correspondientes a granjas constituidas por diferentes cantidades de casos (estanques), presenten pérdidas considerando cada granja como un todo. Los resultados señalan que, en el escenario más favorable (2015), a partir de granjas que integren al menos 20 estanques, se tiene la certeza de que el valor promedio de los rendimientos económicos no corresponderán a pérdidas; mientras que en los escenarios de los ciclos 2013-I y 2016, al incrementarse el tamaño de la granja de uno a 60 estanques, la probabilidad que existe de que en promedio no se registren pérdidas pasa de 51 % a 32 % (2013-I) y de 44 % a 4 % (2016). Para los escenarios correspondientes a las peores condiciones de severidad (2013-II, y 2014-I y II), se proyecta certeza (100 %) de, en promedio, sólo obtener pérdidas a partir de granjas que incorporan al menos 10 estanques; en tanto que, para cultivos invernales (2014-III), se tiene la misma proyección para granjas constituidas por 30 o más estanques.

En términos de RPUR se observa una situación similar en la que, en la medida en que el número de estanques aumenta, el indicador muestra valores crecientes en los escenarios de menor severidad, mientras que en los más adversos el indicador adquiere valores más negativos (Figura 15b).

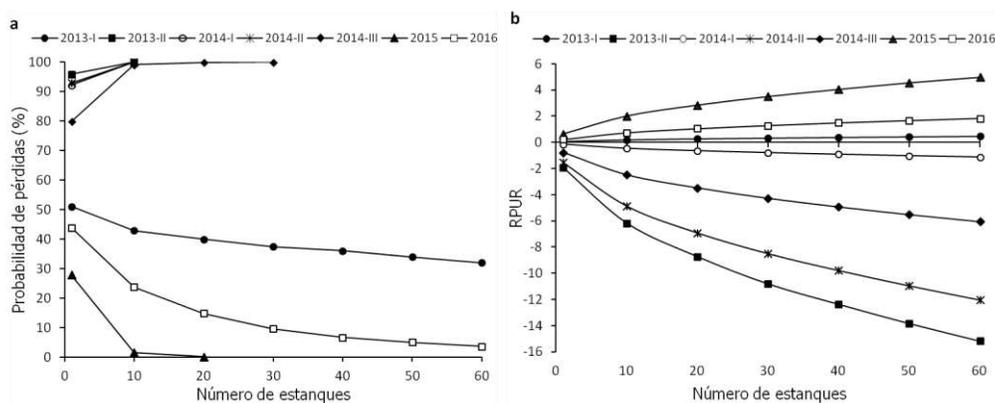


Figura 15. Relaciones entre la probabilidad de pérdidas (a) y el rendimiento (o pérdida) por unidad de riesgo (RPUR) (b) considerando los resultados promedio obtenidos en granjas constituidas por diferente número de estanques en los distintos escenarios de severidad de la AHPND.

## VI. DISCUSIÓN

La mortalidad de camarón causada por la AHPND puede ocurrir durante los primeros 35 días (Joshi *et al.*, 2014), 30-40 días (Varela-Mejias *et al.*, 2017), 20-30 días (Elshopakey *et al.*, 2018), e incluso 46-96 días (de la Peña *et al.*, 2015) produciendo pérdidas tan altas como el 100%. López-León *et al.* (2016) encontraron que los camarones más pequeños son menos resistentes a la infección por *V. parahaemolyticus*. Como se indicó anteriormente, en este estudio se observó un colapso total temprano de las poblaciones de camarón en sólo el 1.7% de los casos contenidos en la base de datos. Por otro lado, el tiempo de ocurrencia de las mortalidades coincidió con informes previos durante los primeros cuatro ciclos de producción, cuando el camarón era relativamente pequeño (1.3-6.2 g); pero en los últimos tres ciclos hubo una tendencia a presentarse más tarde (28-63 días), cuando los camarones pesaron entre 3.4 y 9.9 g, posiblemente fueron más resistentes a la infección y, como se explicará más adelante, la severidad de la enfermedad también disminuyó.

El sub-modelo biológico empleado para el análisis resultó una herramienta útil y confiable para estudiar el impacto del AHPND en la producción de camarón. La curva de crecimiento utilizada para esta investigación (Ecuación 2) se ha empleado en modelos de “stock”, o inventario, para la predicción de la producción de camarón en diferentes condiciones de cultivo (Ruiz-Velazco *et al.*, 2010a, b; Hernandez-Llamas *et al.*, 2013; Gonzalez-Romero *et al.*, 2014; Estrada-Perez *et al.*, 2015) y mostró ser adecuada para describir el crecimiento del camarón cuando estuvo afectado por la AHPND. Por otro lado, la ecuación propuesta por Ruiz-Velazco *et al.* (2010) (Ecuación 3 y 4) para la predicción de la supervivencia de *L. vannamei* cuando se ve afectada por la enfermedad de la mancha blanca, también resultó adecuada para calcular las poblaciones de camarón sobrevivientes cuando se ven afectadas por la AHPND y para medir la severidad de la enfermedad.

Entre 2013-II y 2014-III el peso final del camarón mostró una disminución evidente, pero tendió a aumentar en los últimos dos ciclos de producción, cuando el daño por la enfermedad disminuyó, como lo indica la aparición tardía de bajas mortalidades (Fig. 2). Según los acuicultores, cuando las condiciones de la enfermedad son críticas, se ven obligados a cosechar temprano para evitar pérdidas adicionales, lo que da como resultado una duración corta del cultivo. En contraste, cuando las condiciones son menos severas pueden extender el período de cultivo y obtener mayores tallas finales del camarón, como ocurrió en los ciclos de producción de 2015 y 2016. Debido a tales condiciones, resulta entonces que el tiempo de cosecha está determinado principalmente por el nivel de daño causado por la enfermedad y, en lugar de ser una acción proactiva y planificada, la cosecha es una medida reactiva que responde a una contingencia. Bajo tales circunstancias críticas, no es práctico considerar la duración del cultivo como una variable de manejo (o control).

Como se mencionó anteriormente, luego de una pérdida de producción drástica en 2013 causada por la AHPND, la producción de camarón se ha recuperado sistemáticamente en el estado de Sinaloa (CESASIN, 2019). Lo ocurrido con la producción observada para la granja analizada en este trabajo, coincide con la tendencia señalada para el estado de Sinaloa, es decir, el primer brote de AHPND en la granja se observó en 2013-I, y el daño máximo por la enfermedad ocurrió en 2013-II cuando la mortalidad alcanzó su punto máximo. Después de eso, el daño por la enfermedad disminuyó progresivamente, según lo indicado por los valores decrecientes de la mortalidad y su creciente retardo (Fig. 2).

En el presente trabajo, se encontró evidencia de que la productividad de los estanques tendió a mejorar mientras que la salinidad disminuyó de 2014-II a 2016 (Fig. 2). Además, se encontraron correlaciones significativas entre estas variables y los indicadores de severidad de la enfermedad ( $TM$  y  $m$ , Tabla 7) que indican efectos atenuantes de la alta productividad y de la baja salinidad durante la primera fase de cultivo. Algunas investigaciones han informado sobre mortalidades

secundarias asociadas a la AHPND posteriores a la primera mortalidad (Varela-Mejias *et al.*, 2017). En este estudio, la enfermedad causó una leve mortalidad durante la segunda fase de cultivo (particularmente desde 2014-II a 2016), y no se observaron caídas abruptas de las poblaciones de camarón; en cambio, se registró una mortalidad uniforme durante esta fase y el asumir una tasa de mortalidad constante ( $Z_2$ ) resultó, por lo tanto, adecuado. En este caso, también se encontró evidencia que indica un efecto positivo de la alta productividad y baja salinidad al disminuir la mortalidad por la AHPND durante la segunda fase (Tabla 7).

Se tiene información de que los estanques de camarones infestados por mejillones invasores contienen agua clara, lo que a su vez es perjudicial para la producción de camarón (Aldridge *et al.*, 2008). Esto es un problema común en las granjas camaroneras en México que causa la condición llamada "agua de garrafón". Los estanques analizados en este estudio fueron invadidos por el mejillón nativo *M. Strigata* con densidades de población que variaron aproximadamente entre 20-100 individuos  $m^{-2}$  (Obeso, comunicación personal), produciendo altos valores generales de transparencia. Se ha reportado que el sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ) es efectivo para el control de plagas de bivalvos (Aldridge *et al.*, 2008). En este estudio, la menor transparencia se observó en 2015 (Fig. 2), cuando se empezó a emplear este compuesto para el control de los mejillones. No hay regulaciones en México con respecto al uso de sulfato de cobre en la acuicultura.

Según Aldridge *et al.* (2008), en los estanques infestados por mejillones, los camarones intentan consumir el alimento en el fondo de los estanques, molestando a los mejillones y obligándolos a cerrar sus valvas en las extremidades de los camarones, lo que lleva a estos últimos a adoptar hábitos de consumo pelágico; aumentando así su gasto energético y reduciendo su acceso al alimento. En este estudio, la alta productividad del estanque en aquellos ciclos de producción en que el mejillón no fue tan abundante, posiblemente contribuyó a mejorar la disponibilidad de alimento natural para el camarón, sus condiciones fisiológicas e inmunológicas y, en consecuencia, para mitigar el daño causado por la AHPND. En otras palabras,

la infestación por mejillones puede ser un factor estresante que amplifica el impacto de la enfermedad.

Los análisis estadísticos llevados a cabo para esta investigación, indicaron que la aparición tardía de la enfermedad se correlacionó con menores pérdidas en la producción de camarón (Tabla 2, Fig. 1b). La posible disminución de la virulencia de *V. parahaemolyticus* y el aumento de la resistencia de los camarones de mayor tamaño, pudieran ser la causa de que se retrasara la mortalidad y se redujera la pérdida de población de camarón. Una situación similar refieren Ruiz-Velazco *et al.* (2010b) al analizar el impacto de la enfermedad causada por el virus de la mancha blanca (WSSV) en cultivos de *L. vannamei*. Es en este contexto, el momento en que se produjo la mortalidad masiva por la AHPND se interpreta como un indicador de severidad, donde valores bajos del parámetro generalmente se asocian con un daño considerable. Por otro lado, la tasa de mortalidad estimada para la segunda fase se correlacionó positivamente con la mortalidad masiva anterior, lo que indica, de manera consistente, un efecto más drástico de la enfermedad durante esa fase en estanques donde se observaron mortalidades más cuantiosas.

Las ecuaciones de regresión múltiple que se obtuvieron, en conjunto con el sub-modelo biológico, predijeron adecuadamente los datos de biomasa de camarón contenidos en la base de datos para cada ciclo de producción. Dentro de ciertos límites, el crecimiento del camarón se ve favorecido por el aumento de la temperatura, la baja salinidad, el alto contenido de oxígeno disuelto y la productividad del estanque. Las ecuaciones de regresión que se obtuvieron para el cálculo del peso final del camarón y la constante de crecimiento concuerdan en general con esos hechos (Tabla 8). La duración del cultivo fue una variable incluida con frecuencia en las ecuaciones de regresión, pero, como se explicó anteriormente, esto debe interpretarse con cautela, ya que la decisión sobre el tiempo de cosecha se determinó principalmente por la contingencia causada por la enfermedad. Consiguientemente, la duración del cultivo debe interpretarse como una variable que sólo sirve para la predicción y no como un factor de manejo del cultivo.

Las ecuaciones de regresión obtenidas para el cálculo de los indicadores de severidad de la enfermedad coinciden con los resultados del análisis de correlación general realizado para el período 2013-2016 (Tabla 7). En seis ciclos de producción (86.0 %), el análisis de regresión indicó que la baja productividad o la alta salinidad contribuyeron a explicar significativamente el aumento de la mortalidad causada por la enfermedad (Tabla 8).

No se encontraron investigaciones previas a este estudio en que se informe sobre la relación entre la productividad del estanque y la severidad de la AHPND. A partir de los valores de los coeficientes de las ecuaciones de regresión presentados en la Tabla 8, y manteniendo constantes todas las demás variables independientes, se puede estimar que por cada incremento de 1 cm en la transparencia del agua del estanque, la mortalidad de camarón causada por la enfermedad se agrava entre 0.17 % y 0.25 %. Por otra parte, Panakorn (2012) informó que, en Malasia, *L. vannamei* presentaba mortalidades más tempranas por la AHPND cuando se cultivaba en alta salinidad, en comparación con el camarón cultivado en baja salinidad. El mismo autor indicó que casi la mitad de la producción de *L. vannamei* de China se realizaba en agua dulce y que estas granjas parecían tener mejores resultados que el resto de las granjas cuando fueron afectadas por la AHPND. Sin embargo, Panakorn (2012) no proporciona evidencia cuantitativa que apoye el efecto de la salinidad en la severidad de la enfermedad. Con el presente trabajo se estima, a partir de los coeficientes de regresión en la Tabla 8, que por cada aumento de 1 g L<sup>-1</sup> en la salinidad del agua, la mortalidad por la enfermedad puede aumentar entre 1.7 % y 3.1%.

Estudios previos realizados en cuerpos de aguas naturales han indicado que *V. parahaemolyticus* tolera un amplio rango de temperaturas (7-43 °C; Chamberlain, 2013) y que concentraciones grandes de la bacteria se asocian frecuentemente con altas temperaturas (Cook *et al.*, 2002; Blackwelly Oliver, 2008; Parveen *et al.*, 2008; Julie *et al.*, 2010). De acuerdo con Prachumwat *et al.* (2019), la mortalidad más baja y tardía causada por la AHPND se produce cuando las temperaturas están por debajo de 30-31 °C (Prachumwat *et al.*, 2019). En la presente investigación, se

observó que la mortalidad derivada de la enfermedad durante el ciclo de producción 2014-III fue la más leve, probablemente como consecuencia de la baja temperatura media observada durante las condiciones invernales (24.7 °C), en contraste con 31.3-32.7 °C registrados en el resto de los ciclos. Por otra parte, cabe señalar que, en cuatro ciclos de producción, el momento en que se produjo la mortalidad dependió de la temperatura del agua del estanque durante la primera fase del cultivo. En dichos ciclos se observó que, cuando la temperatura en los estanques fue más alta, la mortalidad ocurrió más temprano, estimándose que, por cada aumento de 1 °C en la temperatura del agua, la ocurrencia de los brotes se adelanta entre 0.2 y 1.57 semanas (Tabla 8).

Boyd y Phu (2018) estudiaron las condiciones de cultivo en estanques de varias especies de camarones en Vietnam y no encontraron diferencias significativas en las variables de calidad del agua entre los estanques que contienen camarones infectados con AHPND y camarones sin AHPND. Kua *et al.* (2018) investigaron las posibles relaciones entre la mortalidad causada por la AHPND y las variables de calidad del agua en Malasia y encontraron que el oxígeno disuelto, la salinidad y el pH estaban dentro de los límites aceptables para el cultivo de camarón, aunque la temperatura y el amonio eran inaceptablemente altos. Los autores atribuyen al estrés causado por los altos niveles de amonio como una posible causa de los brotes de AHPND. La principal diferencia entre los estudios mencionados anteriormente y esta investigación es que dichos estudios se centraron en identificar los factores potenciales que causan la presencia de la enfermedad, mientras que el objetivo de este estudio fue medir la severidad de la misma en función de variables de la calidad del agua. Cabe señalar que no se encontraron antecedentes en la literatura que aborden específicamente el efecto de la calidad del agua del estanque en la severidad de la AHPND.

Según Perez-Enriquez *et al.* (2018), de 1997 a 2009, la mayoría de las granjas de camarón en México dependían en una línea de reproducción llamada "Melagos" importada de Venezuela que tenía un buen rendimiento de crecimiento, pero era altamente susceptible al WSSV causando, de 2010 a 2012, pérdidas

significativas en la producción. Para mitigar los brotes de WSSV, las compañías camaroneras introdujeron nuevos reproductores desde Ecuador y Estados Unidos de América en 2013 y 2015, Nicaragua en 2014 y Colombia en 2015. Debido a los múltiples eventos de importación y la posterior mezcla de reproductores, la estructura genética de las poblaciones de camarones mexicanos cultivados no ha sido bien comprendida (Pérez-Enríquez *et al.*, 2018). Cabe señalar que, en este estudio, además del ciclo de producción de invierno de 2014-III, la menor mortalidad se observó en 2016 (Fig. 2) cuando, como se indica en la Tabla 2, las postlarvas de camarón se obtuvieron de un laboratorio distinto al que proporcionó las postlarvas durante 2013-2015. Ambos laboratorios recibieron las importaciones de reproductores de Ecuador y EUA; sin embargo, no hubo evidencia consistente para atribuir las diferencias en la supervivencia del camarón a las diferencias en las características genéticas de las postlarvas producidas.

Los acuicultores cuentan con pocas herramientas para monitorear la dinámica de las cepas de *V. parahaemolyticus* vinculadas a la AHPND. Al igual que en otras granjas acuícolas, el método TCBS utilizado por la granja objeto de este estudio sirvió para monitorear bacterias amarillas y verdes (Cadiz *et al.*, 2016); sin embargo, no se encontraron correlaciones entre los indicadores de la severidad de la enfermedad y las cantidades de poblaciones bacterianas. A pesar de que *V. parahaemolyticus* puede ser detectado como una colonia verde con el método TCBS (Hasrimi *et al.*, 2018), este resultado podría ser consecuencia de que otras especies de *Vibrio* y no *Vibrio* que también pueden ser identificadas como colonias verdes con TCBS (Pfeffer y Oliver, 2003; Shanmugasundaram *et al.*, 2015), lo que hace que la prueba resulte imprecisa para la detección de *V. parahaemolyticus*.

El AHPND se ha relacionado con una toxina binaria codificada por el plásmido *PirAB<sup>vp</sup>*, que es sintetizada por cepas específicas de *V. parahaemolyticus* (Lai *et al.*, 2015). El Método CHROMagar (CHROMagar™, París, France) es una alternativa para la detección de *V. parahaemolyticus* (Hara-Kudo *et al.*, 2001, Cadiz *et al.*, 2016); sin embargo, se debe tener en cuenta que no todas las cepas de *V. parahaemolyticus* contienen el plásmido relacionado con la AHPND, por lo que el

resultado puede ser incierto. Además, informes recientes han indicado la existencia de otras especies de *Vibrio* portadoras del plásmido relacionado con la AHPND, como *Vibrio owensii*, *Vibrio campbelli*, *Vibrio punensis* y *Vibrio harveyi* (Kondo *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2017; Restrepo *et al.*, 2018; Muthukrishnan *et al.*, 2019).

La detección de los genes relacionados con la toxina *PirAB<sup>Vp</sup>* con el método de PCR depende de si la muestra proviene del agua o del fondo del estanque, de la superficie del cuerpo del camarón, del hepatopáncreas, del estómago o del intestino, ya que la fuente principal de la cepa *Vibrio* relacionada con la AHPND puede localizarse en diferentes lugares bajo diferentes condiciones ambientales (Thompson *et al.*, 2004, Gopal *et al.*, 2005). Por ejemplo, algunos informes han indicado que, en los estanques de tierra, las poblaciones de *Vibrio* son más abundantes en los fondos de los estanques que en la columna de agua (Suárez *et al.*, 2015). Otros estudios indican que las especies de *Vibrio* podrían estar localizadas tanto en forma de biopelícula como en el plancton (Thompson *et al.*, 2004) y, considerando la alta tasa de crecimiento poblacional de la bacteria, la abundancia podría cambiar rápidamente (Noriega-Orozco *et al.*, 2007). Como lo demuestran Devadas *et al.* (2019), existe una necesidad evidente de herramientas específicas y métodos prácticos que ayuden a los productores de camarón a predecir la compleja dinámica de las cepas de *Vibrio* relacionadas con el AHPND.

Los sub-modelos tecnológicos propuestos en este trabajo describieron y predijeron de manera adecuada el alimento acumulado y el recambio de agua correspondientes a las diferentes condiciones de severidad de la AHPND registrada en los ciclos de producción. En general, se observa congruencia en las relaciones establecidas, mediante regresión lineal múltiple, entre el alimento total acumulado ( $A_F$ ) y variables de calidad del agua y de manejo, conforme a lo esperable de una operación de cultivo que responde adecuadamente a las condiciones que se observan en los estanques. Así, en aquellos ciclos en que la salinidad afectó significativamente la mortalidad causada por la enfermedad (2013-I y II y 2015, Tabla 8), dicha variable también se relacionó inversamente con  $A_F$  (Tabla 10),

produciendo una menor acumulación del alimento suministrado al camarón cuando la salinidad es alta. Lo anterior obedece a la necesaria reducción de la cantidad diaria de alimento suministrado como respuesta a que, a salinidades altas, el efecto de la enfermedad es más severo, generando una mayor disminución de la población de camarón y, posteriormente, una menor demanda de alimento. Por otro lado, el aumento de otras variables como la duración del cultivo y la densidad de siembra, producen que se incrementen la biomasa del camarón y la consiguiente demanda por alimento (Tabla 10). En esa misma tabla, también se observa que cuando la transparencia fue alta, la cantidad de alimento fue mayor para compensar la baja productividad de los estanques, mientras que cuando estos últimos fueron más grandes, en algunos ciclos recibieron comparativamente menos alimento. No se tiene identificada claramente la causa de esta última condición. El resto de los parámetros en el sub-modelo ( $d$  y  $b$ ) son coeficientes de ajuste, por lo que las relaciones establecidas entre ellos y las variables de calidad del agua y de manejo sólo son útiles con fines de predicción, ya que no es posible interpretar tales relaciones en términos prácticos.

Por lo que se refiere al sub-modelo para el cálculo de recambio de agua, se puede observar que, en la mayoría de los ciclos, la intensidad del mismo ( $a_R$ ) fue menor cuando la transparencia era baja y el oxígeno disuelto eran altos (Tabla 11), lo cual obedece a la conveniencia de mantener buena productividad en los estanques evitando que el recambio diluya los nutrientes y las comunidades que sirven directa o indirectamente como alimento al camarón. Una situación similar se observa para el oxígeno disuelto, en tanto que mientras éste se mantiene en niveles altos, la necesidad de recambiar el agua es menor. También se observa que, cuando la biomasa de camarón se incrementa como consecuencia del aumento de la densidad de siembra (2013-I), mantener la calidad del agua en límites convenientes demanda un recambio más intenso. También se encontró que en estanques de mayor tamaño el recambio de agua fue menor (2014-I), posiblemente como consecuencia de que los estanques de mayores dimensiones mantienen una calidad del agua más estable que los más pequeños (Brune y Drapcho, 1991) y,

además, porque la aireación natural por el viento fue más eficaz para mantener los niveles adecuados de oxígeno disuelto en los estanques de mayor tamaño que en los más pequeños (Obeso, comunicación personal). El parámetro  $b_R$  es únicamente un coeficiente de ajuste y las relaciones establecidas con las variables de calidad del agua y de manejo únicamente sirven para propósitos predictivos.

Los resultados obtenidos con el análisis de riesgo económico fueron consistentes en tanto que, en general, mayor severidad de la enfermedad implicó pérdidas productivas y económicas más cuantiosas, así como mayor riesgo. En términos de producción, se estima que por cada 100 kg ha<sup>-1</sup> que se pierden, la utilidad disminuye, en promedio, \$ 3,651 ha<sup>-1</sup>, mientras que la probabilidad de registrar pérdidas (el porcentaje de casos que las presentan) se incrementa en 10 % (Fig. 13a, b). Por otro lado, en términos del porcentaje de mortalidad atribuible a la enfermedad, se estima que por cada uno por ciento que aumenta su severidad, las utilidades disminuyen en \$ 495 ha<sup>-1</sup>, en tanto que la probabilidad de obtener pérdidas aumenta en 1.4 % (Fig. 14a, b).

De acuerdo con el análisis, el escenario que implica mayor riesgo corresponde a 2013-II (Fig.10, 11 y 12), donde además se proyecta la mayor mortalidad por la enfermedad (Fig. 2). En contraste, el escenario que implica menor riesgo es el observado para las condiciones del ciclo 2015 (Fig. 10, 11 y 12) en el que, a pesar de que la mortalidad por la enfermedad es mayor que en el escenario 2016, el buen crecimiento del camarón, la extensión de la duración del cultivo y los precios más elevados en el momento de la cosecha, compensan la diferencia en pérdidas por la enfermedad (Fig. 2 y 4). Las utilidades proyectadas para las condiciones del ciclo 2013-I son bajas, acercándose al punto de equilibrio (i.e.  $U_T=0$ , Fig. 11), lo que permite estimar que, para esas condiciones, mortalidades por la enfermedad de hasta aproximadamente 54.5 % (Fig. 2) permiten, en promedio, la generación de utilidades.

Por otra parte, se encontró que, cuando la enfermedad afecta de manera más severa la producción, se presentan mayores pérdidas y probabilidades de obtenerlas (escenarios 2013-II y 2014-I y II). Estrictamente, en dichos escenarios

las menores pérdidas se proyectan para el inicio del cultivo lo que indica que, bajo esas condiciones, es preferible no llevarlo a cabo. Una situación similar se presenta en el escenario correspondiente al ciclo invernal (2014-III) aunque, en ese caso, el pobre desempeño económico se debe, en vez de a la enfermedad, al bajo crecimiento del camarón por las bajas temperaturas (Fig. 2).

El efecto de las mortalidades masivas causadas por la enfermedad en la producción de camarón es evidente (Fig. 4), sin embargo, dichas mortalidades no se reflejan directamente en las curvas de la Figura 10 debido a que, cuando ocurren las mortalidades, el camarón aún no adquiere tallas comercializables. Sin embargo, a partir de que se alcanzan dichas tallas, el efecto de la enfermedad se observa notablemente como curvas que indican pobres ingresos, utilidades (o mayores pérdidas) y mayor probabilidad de pérdidas en los escenarios de mayor severidad de la AHPND, donde las poblaciones de camarones se encuentran más abatidas, como en los casos de los ciclos 2013-II y 2014-I y II.

El único trabajo que utiliza un enfoque bioeconómico para la evaluación de las pérdidas en la producción semi-intensiva de *L. vannamei* afectada por enfermedades, es el realizado Sanchez-Zazueta y Martinez-Cordero (2009); sin embargo, los autores no señalan cuales son las enfermedades analizadas en su estudio. Como se señaló con anterioridad, las estimaciones de pérdidas económicas asociadas a la AHPND se han realizado por regiones o países, pero no existen antecedentes de estimaciones de pérdidas a nivel de granjas de producción individuales. Por tal razón, no es posible discutir los resultados obtenidos en este trabajo en relación con los presentados por otros estudios.

El análisis de sensibilidad realizado en este trabajo mostró que, en general y de forma similar a lo obtenido en términos de producción, la variabilidad de la mortalidad causada por la enfermedad, en conjunto con la de las tallas finales del camarón, son los factores más importantes en la determinación de la variabilidad de las utilidades y, por lo mismo, en el riesgo económico, lo que confirma la influencia que tiene el efecto de la enfermedad sobre el desempeño económico del cultivo.

Por otro lado, cabe destacar que en estudios previos se ha informado que los resultados económicos son altamente sensibles al peso del camarón (Hernandez-Llamas y Magallon-Barajas, 1991; Hernandez-Llamas, *et al.*, 2004, 2013), particularmente como consecuencia del efecto amplificador que tiene la relación entre el precio de venta del camarón y el tamaño del camarón sobre los ingresos calculados (Hernandez-Llamas y Magallon-Barajas, 1991).

El análisis de sensibilidad también indicó que la variabilidad de la tasa de mortalidad durante la segunda fase del cultivo constituyó un factor importante mientras que, entre las variables de calidad del agua, las variabilidades de la salinidad y de la transparencia tuvieron mayor influencia. Los parámetros de los submodelos tecnológicos presentaron importancia media o baja, siendo la variabilidad del alimento total acumulada la más relevante de entre ellos.

El análisis también mostró que la variabilidad del precio del camarón fue el factor más importante entre los parámetros económicos. Análisis de sensibilidad realizados en otros estudios han arrojado un resultado similar (Hernández-Llamas *et al.*, 2013, 2016; González-Romero *et al.*, 2014). La relevancia del precio del camarón para el diseño y programación de los programas de cultivo requiere la implementación de bases de datos detalladas de los precios del camarón a pie de granja y la contabilización de los cambios de precio semanalmente, en lugar de mensualmente.

De acuerdo con el teorema del límite central de la estadística, la varianza de la media poblacional tiende a disminuir a medida que el tamaño de la muestra se incrementa (Vose, 2001). Esa es la razón que permite explicar que, en los escenarios de menor severidad de la AHPND, conforme el número de estanques (tamaño de la muestra) que constituyen la granja va en aumento, la probabilidad de que se registren pérdidas en los valores promedio de los rendimientos económicos disminuye. En otras palabras, en la medida en que el número de estanques es mayor, la posibilidad de que resultados desfavorables tenidos en algunos de ellos se vean compensados por resultados positivos en algunos otros, se incrementa, resultando que, en promedio, la variabilidad (y la probabilidad de pérdida) que como

un todo presenta la granja, disminuye y se agrupa alrededor de un valor medio positivo.

En los escenarios de mayor severidad, en contraste, la probabilidad de obtener pérdidas y el riesgo se incrementan en granjas de mayor tamaño, pues, bajo esas condiciones, en la mayoría de los estanques las condiciones son adversas, y en aquéllos pocos en que se obtienen resultados positivos, los beneficios no alcanzan a compensar las pérdidas que se presentan en la mayoría. Como resultado, se tiene que, en promedio, la variabilidad que presenta la granja como un todo también disminuye, aunque alrededor de un valor promedio negativo. Este resultado refuerza la recomendación de que, en escenarios de tanta severidad de la enfermedad, es preferible no llevar a cabo el cultivo.

## VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten concluir que resultó posible evaluar la variabilidad y el riesgo económico de la producción semi-intensiva del camarón *L. vannamei* afectada por la Enfermedad de la Necrosis Aguda del Hepatopáncreas. Lo anterior, fue consecuencia de que también resultó posible construir un modelo bioeconómico estocástico para el análisis de escenarios afectados por diferentes grados de severidad de la AHPND, así como la realización del análisis de sensibilidad para la identificación y cuantificación de los factores que afectan tanto a la producción como al riesgo económico.

Además, se concluye que la hipótesis establecida para este trabajo es aceptable, en tanto que, a partir de distribuciones de probabilidad de factores que influyen en el cultivo de camarón cuando se encuentra afectado por la AHPND resultó posible estimar, tanto la probabilidad de obtención de pérdidas económicas, como del riesgo productivo y económico asociado a cada uno de dichos factores.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Aldridge, D.C., Salazar, M., Serna, A. and Cock, J. 2008. Density-dependent effects of a new invasive false mussel, *Mytilopsis trautwineana* (Tryon 1866), on shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone 1931), aquaculture in Colombia. *Aquaculture* 281:34-42.
- Allen, P., Botsford, L., Schuur, A. and Johnston, W. 1984. *Bioeconomics of aquaculture, developments in aquaculture and fisheries science*. Elsevier, New York.
- Almendárez-Hernández, L.C. 2015. La bioeconomía acuícola como herramienta para la toma de decisiones empresariales. *Contactos* 98:14-18.
- Araneda, M.E., Hernández, J.M. and Gasca-Leyva, E. 2011. Optimal harvesting time of farmed aquatic populations with nonlinear size-heterogeneous growth. *Natural Resource Modeling* 24:477-513.
- Arnason, R. 1992. Optimal feeding schedules and harvesting time in aquaculture. *Marine Resource Economics* 7:15-35.
- Ayyub, B.M. 2014. *Risk Analysis in Engineering and Economics*, CRC Press, Boca Raton, FL. 603 p.
- Blackwell, K.D. and Oliver, J.D. 2008. The ecology of *Vibrio vulnificus*, *Vibrio cholerae* and *Vibrio parahaemolyticus* in North Carolina estuaries. *Journal of microbiology* 46:1-8.
- Bjørndal, T. 1988. Optimal harvesting of farmed fish. *Marine Resource Economics* 5:139-159.
- Boonyawiwat, V., Patanasatienkulb, T., Kasornchandrak, J., Poolkheta, C., Yaemkasemd, S., Hammell, L., and Davidson, J. 2016. Impact of farm management on expression of early mortality syndrome-acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) on penaeid shrimp farms in Thailand. *Journal of Fish Diseases* 40:649-659.

- Boyd, C. E. and Phu, T. Q. 2018. Environmental Factors and Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) in Shrimp Ponds in Viet Nam: Practices for Reducing Risks. *Asian Fisheries Science* 31S:121-136.
- Brune, D.E. and Drapcho, CM. 1991. Fed pond aquaculture. In: *Aquaculture Systems Engineering* (ed. P.Giovanni). ASAE publication 02-91. American Society of Agricultural Engineers, Davis, USA, p. 15-33.
- Cadiz, R.E., Traifalgar, R.F.M., Sanares, R.C., Andrino-Felarca, K.G.S. and Corre, Jr. V.L. 2016. Comparative efficacies of tilapia green water and biofloc technology (BFT) in suppressing population growth of green *Vibrios* and *Vibrio parahaemolyticus* in the intensive tank culture of *Penaeus vannamei*. *AAFL Bioflux Society* 9:195-203.
- CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria). 2015. Reporte No.26. La Acuicultura. México, D.F. 16 p.
- CESASIN (Comité Estatal de Sanidad Acuícola de Sinaloa, A.C.). 2019. Retrieved from <http://www.cesasin.mx>
- Chamberlain, G. 2013. Report of EMS research process. Annual conference of global aquaculture alliance in 2013, Paris, France.
- Cook, D.W., Bowers, J.C. and Depaola, A. 2002. Density of total and pathogenic (tdh+) *Vibrio parahaemolyticus* in Atlantic and Gulf Coast molluscan shellfish at harvest. *Journal of Food Protection* 65:1873-1880.
- CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca). 2017. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Mazatlán, Sinaloa, México. 293 p.
- de la Peña, L.D., Cabillon, N.A., Catedral, D.D., Amar, E.C., Usero, R.C., Monotilla, W.D., Calpe, A.T., Fernandez, D.D. and Saloma, C.P. 2015. Acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) outbreaks in *Penaeus vannamei* and *P. monodon* cultured in the Philippines. *Diseases of aquatic organisms* 116:251-254.

- Devadas, S., Banerjee, S., Yusoff, F.M., Bhassu, S. and Shariff, M. 2019. Experimental methodologies and diagnostic procedures for acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND). *Aquaculture* 499:389-400.
- Dhar, A.K., Piamsomboon, P., Aranguren Caro, L.F., Kanrar, S., Adami, R. Jr. and Juan, Y.S. 2019. First report of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) occurring in the USA. *Diseases of Aquatic Organisms* 132:241-247.
- Dong, X., Bi, D., Wang, H., Zou, P., Xie, G., Wan, X., Yang, Q., Zhu, Y., Chen, M. Guo, C., Liu, Z., Wang, W. and Huang, J. 2017. *pirABvp*-Bearing *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio campbellii* Pathogens Isolated from the Same AHPND-Affected Pond Possess Highly Similar Pathogenic Plasmids. *Frontiers in Microbiology* 8:1859.
- Estrada-Pérez, M., Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernandez-Llamas, A. and Zavala-Leal, I. 2015. A bio-economic approach to analyze the role of alternative seeding-harvesting schedules, water quality, stoking density and duration of cultivation in semi-intensive production of shrimp in Mexico. *Latin american journal of aquatic research* 43:466-472.
- Estrada-Perez, N., Hernández-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J.M.J., Zavala-Leal, I., Romero-Bañuelos, C.A., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rossete, C., Domínguez-Ojeda, D. and Campos-Mendoza, A. 2018. Stochastic modelling of aquaponic production of tilapia (*Oreochromis niloticus*) with lettuce (*Lactuca sativa*) and cucumber (*Cucumis sativus*). *Aquaculture Research* 49: 3723-3734.
- Elshopakey, G., Risha, E., Abdalla, O., Okamura, Y., Harada, S., Kishida, S., Matsuura, Y., Sudhakaran, R. and Itami, T. 2018. Efficacy of dietary fermented vegetable product on immune response, up-regulation of immune-related genes and protection of kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*) against *Vibrio parahaemolyticus*. *Aquaculture* 497:431-439.
- Elshopakey, G.E., Risha, E.F., Abdalla, O.A., Okamura, Y., Hanh, V.D., Ibuki, M., Sudhakaran, R. and Itami, T. 2018. Enhancement of immune response and resistance against *Vibrio parahaemolyticus* in kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*) by dietary supplementation of  $\beta$ -1, 4-mannobiose. *Fish and Shellfish Immunology* 74:26-34.

- FAO. 2018. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- Franco, A.R., Ferreira, J.G. and 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. and 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.
- Gopal, S., Ottaa, S.K., Kumar, S., Karunasagar, I., Nishibuchib, M. and Karunasagar, I. 2005. The occurrence of *Vibrio* species in tropical shrimp culture environments; implications for food safety. *International Journal of Food Microbiology* 102:151-159.
- Han, J.E., Tang, K.F.J., Pantoja, C.R., White, B.L. and Lightner, D.V. 2015. qPCR assay for detecting and quantifying a virulence plasmid in acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) due to pathogenic *Vibrio parahaemolyticus*. *Aquaculture* 442:12-15.
- Hara-Kudo, Y., Nishina, T., Nakagawa, H., Konuma, H., Hasegawa, J. and Kumagai, S. 2001. Improved Method for Detection of *Vibrio parahaemolyticus* in Seafood. *Applied and Environmental Microbiology* 67:5819-5823.
- Hasrimi, A.N., Budiharjo, A. and Jannah, S.N. 2018. Detection of *tlh* and *tdh* genes in *Vibrio Parahaemolyticus* inhabiting farmed water ecosystem used for *L. Vannamei* aquaculture. *Journal of Physics: Conference Series* 1025, 012058.
- Hean, R.L. 1994. An optimal management model for intensive aquaculture-an application in Atlantic salmon. *Australian Journal of Agricultural Economics* 38:31-47.
- Heaps, T. 1993. The optimal feeding of a farmed fish. *Marine Resource Economics* 8:89-99.
- Heaps, T. 1995. Density dependent growth and the culling of farmed fish. *Marine Resource Economics* 10:285-298.

- Hernandez-Llamas, A. 2015. Stochastic assessment of economic losses associated with hurricane hazard for whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* cultivated in floating cages in northwestern Mexico. *Aquaculture Research* 47: 3359-3362.
- Hernandez-Llamas, A. y F.J. Magallón-Barajas. 1991. Análisis bioeconómico del cultivo del camarón azul (*Penaeus stylirostris*) con fertilizantes orgánicos e inorgánicos y alimentación balanceada. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 6:267-281.
- Hernandez-Llamas, A. and 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.
- Hernandez-Llamas, A., Gonzalez-Becerril, A., Hernandez-Vazquez, S., Escutia-Zuñiga, S., 2004. Bioeconomic analysis of intensive production of the blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. *Aquaculture Research* 35:103-111.
- Hernandez-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J.M.J. and 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* 5:121-131.
- Hernandez-Llamas, A., Cabanillas-Ramos, J. and F.J. Magallon-Barajas. 2016. Estimating impact of white spot disease on economic risk in semi-intensive shrimp farms in Mexico: the case of the State of Sinaloa. *Reviews in Aquaculture* 8:111-120.
- Joshi, J., Srisala, J., Truong, V. H., Chen, I. T., Nuangsaeng, B., Suthienkul, O., Lo, C. F., Flegel, T. W., Sritunyalucksana, K., and Thitamadee, S. 2014. Variation in *Vibrio parahaemolyticus* isolates from a single Thai shrimp farm experiencing an outbreak of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND). *Aquaculture* 428-429:297-302.
- Julie, D., Solen, L., Antoine, V., Jaufrey, C., Annick, D. and Dominique, H. 2010. Ecology of pathogenic and non-pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* on the French Atlantic coast. Effects of temperature, salinity, turbidity and chlorophyll a. *Environmental Microbiology* 12:929-937.

- Junprung, W., Supungul, P. and Tassanakajon, A. 2019. *Litopenaeus vannamei* heat shock protein 70 (LvHSP70) enhances resistance to a strain of *Vibrio parahaemolyticus*, which can cause acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND), by activating shrimp immunity. *Developmental and Comparative Immunology* 90:138-146.
- Karp, L., Sadeh, A. and Griffin, W.L. 1986. Cycles in agricultural production: the case of aquaculture. *American Journal of Agricultural Economics* 68:553-561.
- Keys, S.J., Crocos, P.J. and Cacho, O.J. 2004. Commercial grow-out performance and cost-benefit analysis for farm production of the brown tiger shrimp (*Penaeus esculentus*). *Aquaculture Economics & Management* 8:295-308.
- Kondo, H., Van, P.T., Dang, L.T. and Hironoa, I. 2015. Draft Genome Sequence of Non-*Vibrio parahaemolyticus* Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease Strain KC13.17.5, Isolated from Diseased Shrimp in Vietnam. *Genome Announcements* 3:e00978-15.
- Kua, B. C., Mohd Fariduddin, O., Marzukhi, O. and Ahmad Iftikhar, A. M. 2018. Mortality Outbreaks in Whiteleg Shrimp (*Penaeus vannamei* Boone 1931) Cultured in Peninsular Malaysia. *Asian Fisheries Science* 31S: 242-256.
- Kumar, B.K., Deekshit, V.K., Raj, J.R.M., Rai, P., Shivanagowda, B.M., Karunasagar, I. and Karunasagar, I. 2014. Diversity of *Vibrio parahaemolyticus* associated with disease outbreak among cultured *Litopenaeus vannamei* (Pacific white shrimp) in India. *Aquaculture* 433:247-251.
- Lai, H.C., Ng, T.H., Ando, M., Lee, C.T., Chen, I.T., Chuang, J.C., Mavichack, R., Chang, S.H., Yeh, M.D., Chiang, Y.A., Takeyama, H., Hamaguchi, H.O. Lo, C.F., Aoki, T. and Wang, H.C. 2015. Pathogenesis of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) in shrimp. *Fish & Shellfish Immunology* 47:1006-1014.
- Leung, P. and Shang, Y.C. 1989. Modeling prawn production management system: a dynamic Markov decision approach. *Agricultural Systems* 29:5-20.
- Llorente, I. and Luna, L. 2013. The competitive advantages arising from different environmental conditions in seabream, *Sparus aurata*, production in the Mediterranean sea. *Journal of the World Aquaculture Society* 44:611-627.

- Llorente, I. and Luna, L. 2016. Bioeconomic modelling in aquaculture: an overview of the literatura. *Aquaculture International* 24:931-948.
- López-León, P., Luna-González, A., Escamilla-Montes, R., Flores-Miranda, M., Fierro-Coronado, J., Álvarez-Ruiz, P. and Diarte-Plata, G. 2016. Isolation and characterization of infectious *Vibrio parahaemolyticus*, the causative agent of AHPND, from the whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Latin American Journal of Aquatic Research* 44:470-479.
- Lun, J., Liu, D., Liu, T., Zhang, S., Dong, Y., Li, C., Zhang, Y. and Hu, Z. 2018. Evaluation of outer membrane protein U (OmpU) as a novel capture target of *Vibrio parahaemolyticus* and rapid detection of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) using PCR combined with immunomagnetic separation. *Aquaculture* 485:225-232.
- Maralit, B.A., Jaree, P., Boonchuen, P., Tassanakajon, A. and Somboonwiwa, K. 2018. Differentially expressed genes in hemocytes of *Litopenaeus vannamei* challenged with *Vibrio parahaemolyticus* AHPND (VP AHPND) and VP AHPND toxin. *Fish and Shellfish Immunology* 81:284-296.
- Martinez-Cordero, F.J. and Leung, P.S. 2004. Multicriteria decision making (MCDM) model for regional sustainable shrimp farming development in northwest Mexico. *Aquac Econ Manag* 8:179-191.
- Mateus, L., Costa, L., Silva, Y.J., Pereira, C. and Almeida, A. 2014. Effect of lysozyme addition on the activity of phages against *Vibrio parahaemolyticus*. *Aquaculture* 432:125-129.
- Mistiaen, J.A. and Strand, I. 1999. Optimal feeding and harvest time for fish weight-dependent prices. *Marine Resource Economics* 13:231-246.
- Mun, J. 2006. *Modelling Risk: Applying Monte Carlo Simulation, Real Options Analysis, Forecasting and Optimization Techniques*. John Wiley & Sons, New Jersey. 623 p.
- Muthukrishnan, S., Defoirdt, T., Ina-Salwany, M.Y., Yusoff, F.M., Shariff, M., Ismail, S.I. and Natrah, I. 2019. *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio harveyi* causing Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) in *Penaeus vannamei* (Boone, 1931) isolated from Malaysian shrimp ponds. *Aquaculture* 511: 734227.

- NACA (Network of Aquaculture Centres in Asia Pacific). 2012. Report of the Asia Pacific emergency regional consultation on the emerging shrimp disease: early mortality syndrome (EMS)/Acute hepatopancreatic necrosis syndrome (AHPNS), 9-10 Aug 2012. Published by the Network of Aquaculture Centres in Asia-Pacific, Bangkok, Thailand. August 2012.
- Noriega-Orozco, L., Acedo-Felix, E., Higuera-Ciapara, I., Jiménez-Flores, R. and Cano, R. 2007. Pathogenic and non pathogenic *Vibrio* species in aquaculture shrimp ponds. *Revista latinoamericana de microbiología* 49:60-67.
- Nunan, L., Lightner, D. V., Pantoja, C. and Gómez-Jiménez, S. 2014. Detection of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) in Mexico. *Diseases of Aquatic Organisms* 111:81-86.
- Panakorn, S. 2012. Opinion article: More on early mortality syndrome in shrimp. *Aqua Culture Asia Pacific* 8:8-10.
- Parveen, S., Hettiarachchi, K.A., Bowers, J.C., Jones, J.L., Tamplin, M.L., McKay, R., Beatty, W., Brohawn, K., Dasilva, L.V. and Depaola, A. 2008. Seasonal distribution of total and pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* in Chesapeake Bay oysters and waters. *Journal of Food Microbiology* 128:354-361.
- Pfeffer, C.S. and Oliver, J.D. 2003. A comparison of thiosulphate-citrate-bile salts-sucrose (TCBS) agar and thiosulphate-chloride-iodide (TCI) agar for the isolation of *Vibrio* species from estuarine environments. *Letters in Applied Microbiology* 36:150-151.
- Perez-Enriquez, R., Robledo, D., Houston, R.D. and Llera-Herrera, R. 2018. SNP markers for the genetic characterization of Mexican shrimp broodstocks. *Genomics* 110: 423-429.
- Poole, R.W. 1974. *An introduction to Quantitative Ecology*. McGraw-Hill, New York.
- Prabu, D., Chandrasekar, S., Ambashankar, K., Dayal, J., Ebeneezar, S., Ramachandran, K., Kavitha, M. and Vijayagopal, P. 2018. Effect of dietary *Syzygium cumini* leaf powder on growth and non-specific immunity of *Litopenaeus vannamei* (Boone 1931) and defense against virulent strain of *Vibrio parahaemolyticus*. *Aquaculture* 489:9-20.

- Prachumwat, A., Taengchaiyaphum, S., Mungkongwongsiri, N., Aldama-Cano, D.J., Flegel, T.W. and Sritunyalucksana, K. 2019. Update on early mortality syndrome/acute hepatopancreatic necrosis disease by April 2018. *Journal of the World Aquaculture Society* 50:5-17.
- Qin, Z., Babu, V.S., Wan, Q., Zhou, M., Liang, R., Muhammad, A., Zhao, L., Li, J., Lan, J. and Lin, L. 2018. Transcriptome analysis of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) challenged by *Vibrio parahaemolyticus* reveals unique immune-related genes. *Fish and Shellfish Immunology* 77: 164-174.
- RathnaKumari, P., Kolanchinathan, P., Siva, D., Abirami, B., Masilamani, V., John, G., Achirama, S. and Balasundaram, A. 2018. Antibacterial efficacy of seagrass *Cymodocea serrulata*-engineered silver nanoparticles against prawn pathogen *Vibrio parahaemolyticus* and its combative effect on the marine shrimp *Penaeus monodon*. *Aquaculture* 493:158-164.
- Ratkowsky, D.A., 1990. *Handbook of Nonlinear Regression Models*. Marcel Dekker, New York.
- Rencher, A.A. 2002. *Method of Multivariate Analysis*, 2nd Edn. John Wiley and Sons. New York. 738 p.
- Restrepo, L., Bayot, B., Arciniegas, S., Bajaña, L., Betancourt, I., Panchana, F. and Reyes-Muñoz, A. 2018. Pir<sup>VP</sup> genes causing AHPND identified in a new *Vibrio species* (*Vibrio punensis*) within the commensal *Orientalis* clade. *Scientific Reports* 8:13080.
- Rubio-Castro, A., Luna-González, A., Álvarez-Ruiz, P., Escamilla-Montes, R., Fierro-Coronado, J.A., López-León, P., Flores-Miranda M.C. and Diarte-Plata, G. 2016. Survival and immune-related gene expression in *Litopenaeus vannamei* co-infected with WSSV and *Vibrio parahaemolyticus*. *Aquaculture* 464:692-698.
- Rudtanatip, T., Boonsri, N., Asuvapongpatana, S., Withyachumnarnkul, B. and Wongprasert, K. 2017. A sulfated galactans supplemented diet enhances the expression of immune genes and protects against *Vibrio parahaemolyticus* infection in shrimp. *Fish and Shellfish Immunology* 65:186-197.

- Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernández-Llamas, A. and Gómez-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.
- Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernández-Llamas, A., Gómez-Muñoz, V.M. and Magallón, F.J. 2010b. Dynamics of intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* affected by white spot disease. *Aquaculture* 300:113-119.
- Sajali, U.S.B.A., Atkinson, N.L., Desbois, A.P., Little, D.C., Murray, F.J. and Shin, A.P. 2019. Prophylactic properties of biofloc- or Nile tilapia-conditioned water against *Vibrio parahaemolyticus* infection of whiteleg shrimp (*Penaeus vannamei*). *Aquaculture* 498:496-502.
- Sanchez-Zazueta, E. and 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., Martinez-Cordero, F.J. and Hernández, J.M. 2013a. Credit management analysis of semiintensive shrimp farming in Mexico. *Aquaculture Economics & Management* 17:360-379.
- Sanchez-Zazueta, E., Hernández, J.M. and Martínez-Cordero, F.J. 2013b. Stocking density and date decisions in semi-intensive shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) farming: a bioeconomic approach. *Aquacuaculture Research* 44:574-58.
- Seijo, J.C. 2004. Risk of exceeding bioeconomic limit reference points in shrimp aquaculture systems. *Aquaculture Economics & Management* 8:201-212.
- Sha, Y., Wang, B., Liu, M., Jiang, K. and Wang, L. 2016. Interaction between *Lactobacillus pentosus* HC-2 and *Vibrio parahaemolyticus* E1 in *Litopenaeus vannamei* in vivo and in vitro. *Aquaculture* 465:117-123.
- Shanmugasundaram, S., Mayavu, P., Manikandarajan, M., Suriya, A. and Anbarasu, E.R. 2015. Isolation and identification of *Vibrio* sp. in the Hepatopancreas of cultured white pacific shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *International Letters of Natural Sciences* 46:52-59.

- Shinn, A.P., Pratoomyot, J., Griffiths, D., Trong, T.Q., Vu, N.T., Jiravanichpaisal, P. and Briggs, M. 2018. Asian Shrimp Production and the Economic Costs of Disease. *Asian Fisheries Science* 31S:29-58.
- Sivagnanavelmurugan, M., Thaddaeus, B.J., Palavesam, A. and Immanuel, G. 2014. Dietary effect of *Sargassum wightii* fucoidan to enhance growth, prophenoloxidase gene expression of *Penaeus monodon* and immune resistance to *Vibrio parahaemolyticus*. *Fish and Shellfish Immunology* 39:439-449.
- Soowannayanab, C., Boonmeeac, S., Puckcharoenac, S., Anatamsombata, T., Yatipab, P., Ng, W-K., Thitamadee, S., Tuchinda, P., Munyoo, B., Chabang, N., Nuangsaeng, B., Sonthi, M. and Withyachumnarnkul, B. 2019. Ginger and its component shogaol inhibit *Vibrio* biofilm formation in vitro and orally protect shrimp against acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND). *Aquaculture* 504:139-147.
- Soto-Rodriguez, S.A., Gomez-Gil, B., Lozano-Olvera, R., Betancourt-Lozano, M. and Morales-Covarrubias, M.S. 2015. Field and experimental evidence of *Vibrio parahaemolyticus* as the causative agent of acute hepatopancreatic necrosis disease of cultured shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in northwestern Mexico. *Applied and Environmental Microbiology* 81:1689-1699.
- Suárez, M.G., Medina, Z., Montiel, M., Ibarra, J. y Salcedo, A. 2015. Distribución de *Vibrio spp.* en agua y sedimento de estanques productores de camarón *Litopenaeus vannamei* cultivados con agua del Lago de Maracaibo (Venezuela). *Revista Científica* 25:293-299
- Suong, N.T., Van Hao, N., Van Sang, N., Hung, N.D., Tinh, N.T.N., Phuoc, L.H., Cuong, D.V., Luan, N.T., Phuong, D.V., Thom T.T., Thao, P.H., Bossier, P., Sorgeloos, P. and Defoirdt, T. 2017. The impact of catecholamine sensing on the virulence of *Vibrio parahaemolyticus* causing acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND). *Aquaculture* 470:190-195.
- The Fish Site. 2013. Fighting EMS shrimp disease in Mexico. Retrieved from [www.thefishsite.com](http://www.thefishsite.com)

- Thompson, F.L., Iida, T. and Swings, J. 2004. Biodiversity of Vibrios. *Microbiology and molecular biology reviews* 68:403-431.
- Tran, L., Nunan, L., Redman, R. M., Mohnney, L. L., Pantoja, C. R., Fitzsimmons, K. and Lightner, D. V. 2013. Determination of the infectious nature of the agent of acute hepatopancreatic necrosis syndrome affecting penaeid shrimp. *Diseases of Aquatic Organisms* 105:45-55.
- Trejo-Flores, J.V., Luna-González, A., Álvarez-Ruíz, P., Escamilla-Montes, R., Peraza-Gómez, V., Diarte-Plata, G., Esparza-Leal, H.M., Campa-Córdova, A.I., Gámez-Jiménez, C. and Rubio-Castro, A. 2016 Protective effect of *Aloe vera* in *Litopenaeus vannamei* challenged with *Vibrio parahaemolyticus* and white spot syndrome virus. *Aquaculture* 465:60-64.
- Van Gigch, J.P. 1987. *Applied general system theory*. Harper and Row Publishers, NJ, 547p.
- Varela-Mejias, A., Peña-Navarro, N. and Aranguren-Caro, L.F. 2017. Necrosis aguda del hepatopáncreas: una revisión de la enfermedad en *Penaeus vannamei*. Revisión bibliográfica. *Agronomía Mesoamericana* 28:735-745.
- Villanueva, R.R., Araneda, M.E., Vela, M. and Seijo, J.C. 2013. Selecting stocking density in different climatic seasons: a decision theory approach to intensive aquaculture. *Aquaculture* 384-387:25-34.
- Vose, D. 2001. *Risk Analysis. A Quantitative Guide*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK.
- Wang, H., Wang, C., Tang, Y., Sun, B., Huang, J. and Song, X. 2018. Pseudoalteromonas probiotics as potential biocontrol agents improve the survival of *Penaeus vannamei* challenged with acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND)-causing *Vibrio parahaemolyticus*. *Aquaculture* 494:30-36.
- Wangman, P., Longyant, S., Taengchaiyaphum, S., Senapin, S., Sithigorngul, P. and Chaivisuthangkur, P. 2018. PirA & B toxins discovered in archived shrimp pathogenic *Vibrio campbellii* isolated long before EMS/AHPND outbreaks. *Aquaculture* 497: 494-502.

- Williams, S.L., Jensen, R.V., Kuhn, D.D. and Stevens, A.M. 2017. Analyzing the metabolic capabilities of a *Vibrio parahaemolyticus* strain that causes Early Mortality Syndrome in shrimp. *Aquaculture* 476: 44-48.
- Xiao, J., Liu, L., Ke, Y., Li, X., Liu, Y., Pan, Y., Yan, S. and Wang, Y. 2017. Shrimp AHPND-causing plasmids encoding the PirAB toxins as mediated by pirAB-Tn903 are prevalent in various *Vibrio* species. *Scientific Reports* 7:42177.
- Yu, R. and Leung, P. 2005. Optimal harvesting strategies for a multi-cycle and multi-pond shrimp operation: a practical network model. *Math Comput Simul* 68:339-354.
- Yu, R. and Leung, P. 2006. Optimal partial harvesting schedule for aquaculture operations. *Marine Resource Economics* 21:301-315.
- Yu, R. and Leung, P. 2009. Optimal harvest time in continuous aquacultural production: the case of nonhomogeneous production cycles. *International Journal of Production Economics* 117:267-270.
- Yu, R., Leung, P. and Bienfang, P. 2006. Optimal production schedule in commercial shrimp culture. *Aquaculture* 254:426-441.
- Yu, R., Leung, P. and Bienfang, P. 2009. Modeling partial harvesting in intensive shrimp culture: a network-flow approach. *European Journal of Operational Research* 193:262-271.
- Zuo, H., Gao, J., Yuan, J., Deng, H., Yang, L. and Weng, S. 2017. Fatty acid synthase plays a positive role in shrimp immune responses against *Vibrio parahaemolyticus* infection. *Fish and Shellfish Immunology* 60: 282.