



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

BIOECONOMÍA DEL PROCESO DE ENGORDA DE  
TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) EN UN SISTEMA DE  
PRODUCCIÓN INTENSIVO CON TECNOLOGÍA BIOFLOC  
EN EL ALTIPLANO MEXICANO

T E S I S

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias**

Bioeconomía Pesquera y Acuícola

(Línea General de Aplicación del Conocimiento en Bioeconomía )

P r e s e n t a

**Juan Carlos René Dorantes de la O**

La Paz, Baja California Sur, noviembre de 2022.

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las horas del día 10 del mes de Noviembre del 2022, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"BIOECONOMÍA DEL PROCESO DE ENGORDA DE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN INTENSIVO CON TECNOLOGÍA BIOFLOC EN EL ALTIPLANO MEXICANO"**

Presentada por el alumno:

**Juan Carlos René Dorantes de la O**

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

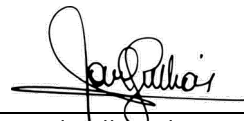
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA



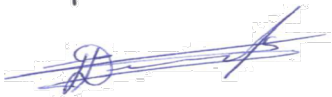
---

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Co-Director de Tesis



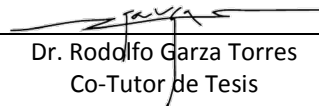
---

Dra. Mariel Gullian Klanian  
Co-Directora de Tesis



---

Dr. Luis Daniel Espinosa Chaurand  
Co-Tutor de Tesis



---

Dr. Rodolfo Garza Torres  
Co-Tutor de Tesis



---

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez  
Co-Tutor de Tesis



---

Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,  
Directora de Estudios de Posgrado y  
Formación de Recursos Humanos


La Paz, Baja California Sur, a 15 de noviembre de 2022.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante Juan Carlos René Dorantes de la O del Programa de Doctorado en Bioeconomía Pesquera y Acuícola, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el VoBo dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio: iThenticate
- Filtros utilizados:  
Excluir citas  
Excluir bibliografía
- Porcentajes de similitud: 11%  
Se muestra captura de pantalla

no Mexicano		Citas excluidas Bibliografía excluida	11% SIMILAR
<b>Resumen de Coincidencias</b>			
1	Internet 445 palabras Copiado el 15-Oct-2022 <a href="http://cibnor.repositorioinstitucional.mx">cibnor.repositorioinstitucional.mx</a>		2%
2	Internet 121 palabras <a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a>		1%
3	Internet 105 palabras <a href="http://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a>		<1%
4	Internet 70 palabras Copiado el 16-Feb-2022 <a href="http://repositorio.cinvestav.mx">repositorio.cinvestav.mx</a>		<1%
5	Internet 66 palabras Copiado el 04-Jul-2022 <a href="http://zootecnia.ucr.ac.cr">zootecnia.ucr.ac.cr</a>		<1%
6	Internet 61 palabras Copiado el 16-Ene-2022 <a href="http://www.cibnor.gob.mx">www.cibnor.gob.mx</a>		<1%
7	Internet 51 palabras Copiado el 12-Ene-2021 <a href="http://rinderesu.com">rinderesu.com</a>		<1%
8	Internet 40 palabras Copiado el 24-Jul-2016 <a href="http://issuu.com">issuu.com</a>		<1%
9	Internet 37 palabras Copiado el 16-Abr-2020 <a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a>		<1%
10	Crossref Posted Content 35 palabras Joan Renard Meseguer. "Identification of genes related to seed longevity in Arabidopsis thaliana using genomic mo..."		<1%
11	Internet 32 palabras Copiado el 24-Sep-2022		<1%

**Firmas del comité**



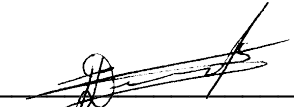

---

Dr. Alfonso N. Maeda Martínez



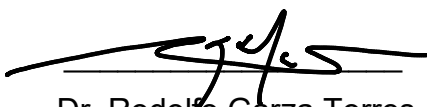

---

Dra. Mariel Gullian Klanian



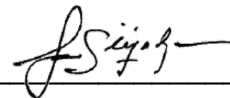

---

Dr. Luis D. Espinosa Chaurand




---

Dr. Rodolfo Garza Torres




---

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez

## **Conformación de Comités**

### **Comité Tutorial**

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Director de Tesis

Dra. Mariel Gullian Klanian  
Universidad Marista de Mérida  
Co-Directora de Tesis

Dr. Luis Daniel Espinosa Chaurand  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Tutor de Tesis

Dr. Rodolfo Garza Torres  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Tutor de Tesis

Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez  
Universidad Marista de Mérida  
Co-Tutor de Tesis

### **Comité Revisor de Tesis**

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Dra. Mariel Gullian Klanian  
Dr. Luis Daniel Espinosa Chaurand  
Dr. Rodolfo Garza Torres  
Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez

### **Jurado de Examen**

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Dra. Mariel Gullian Klanian  
Dr. Luis Daniel Espinosa Chaurand  
Dr. Rodolfo Garza Torres  
Dr. Juan Carlos Seijo Gutiérrez

### **Suplentes**

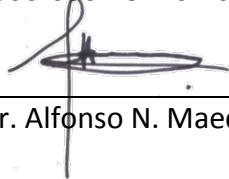
Dr. Fernando Aranceta Garza  
Dr. Ricardo García Morales

## Resumen

Actualmente México tiene un déficit de 140 mil toneladas anuales de tilapia, las cuales importa principalmente de China. Este déficit se puede reducir aumentando la producción nacional con la intensificación y la adopción de tecnologías sostenibles modernas, principalmente en las zonas más frías como el Altiplano mexicano, donde los precios del pescado son más altos. Dado que la tilapia es un organismo poiquilotérmico cuya tasa de crecimiento depende de la temperatura del agua, es necesario conocer la viabilidad económica de su cultivo en estas regiones. La bioeconomía ofrece herramientas para determinar la viabilidad financiera y simular escenarios basados en información biológica de la especie, las condiciones ambientales que afectan el crecimiento y supervivencia de los peces, la tecnología a utilizar y las condiciones económicas de la región objetivo. En el presente trabajo se realizó la evaluación bioeconómica de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en el Altiplano de México con base en los registros térmicos de una granja en el estado de Aguascalientes que utiliza tanques con aislamiento térmico. Esto se comparó con el perfil térmico de una granja en Sinaloa, que representa las regiones cálidas donde se cultiva tilapia en nuestro país. La viabilidad económica se determinó utilizando dos tecnologías: la clásica tecnología de agua verde (AV), en la que se realizan cambios de agua para mantener los niveles críticos de amonio por debajo, y donde se produce un aumento paulatino de la productividad primaria, frente a la tecnología biofloc (TBF) en los que se induce la formación de flóculos de microorganismos que sirven de alimento, pero que a su vez convierten el amonio en nutrientes inorgánicos que favorecen el crecimiento de microalgas y consecuentemente reducen o eliminan los intercambios de agua. Se construyó un modelo bioeconómico determinista basado en iteraciones de datos conformado por cuatro submodelos, a) biológico, b) de gestión, c) económico y d) de riesgo, los cuales interactúan entre sí a través de la Teoría de la Dinámica de Sistemas. El modelo proporciona los indicadores financieros Valor Presente Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio/Costo (B/C). Los resultados indicaron que la TBF produjo mejores resultados que el sistema AV ya que ahorra hasta un 23% en alimento balanceado, reduce la mortalidad natural hasta en un 90% y se ahorra agua tres veces más en la TBF que en el sistema AV. Económicamente, TBF nos permite reducir los gastos de operación en \$2.00 pesos/kg, aumentar la utilidad neta hasta en un 300% y aumentar la TIR en 11 puntos y un B/C de \$0.08 pesos/kg. El análisis de sensibilidad mediante TBF indicó que una reducción de 2°C en la temperatura media anual del agua, como ocurre en el Altiplano, la biomasa cosechada se redujo en un 53%. Se incrementó la duración del ciclo productivo en seis semanas, lo que redujo el VAN en 55%, la TIR en 4% y el B/C en \$0.03 pesos. Sin embargo, a esta temperatura el VAN (\$3,043,600 pesos), la TIR (38.7%) y el B/C (\$1.26 pesos) son positivos, indicando la viabilidad productiva y económica para cultivar tilapia con TBF en el Altiplano de México.

**Palabras clave:** Bioeconomía, *Oreochromis niloticus*, Modelación bioeconómica, Acuicultura.

ORCID:0000-0002-3426-4659



Dr. Alfonso N. Maeda Martínez

Vo. Bo. Co-Directores de Tesis



Dra. Mariel Gullian Klanian

## Summary

Mexico currently has a deficit of 140 thousand tons of tilapia annually, which it imports mainly from China. This deficit can be reduced by increasing national production with intensification and adopting modern sustainable technologies, mainly in colder areas such as the Mexican Altiplano, where fish prices are higher. Since tilapia is a poikilothermic organism whose growth rate depends on water temperature, it is necessary to know the economic viability of its cultivation in these regions. Bioeconomics offers tools to determine financial viability and simulate scenarios based on biological information on the species, the environmental conditions that affect the growth and survival of fish, the technology to be used, and the economic conditions of the target region. In the present work, the bioeconomic evaluation of the production of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the Altiplano of Mexico was carried out based on the thermal records of a farm in the state of Aguascalientes that uses thermally insulated tanks. This was compared against the thermal profile of a farm in Sinaloa, which represents the warm regions where tilapia is grown in our country. The economic viability was determined using two technologies: the classic green water technology (AV), in which water changes are carried out to keep the critical levels of ammonium below, and where a gradual increase in primary productivity occurs, against the technology biofloc (TBF) in which the formation of flocs of microorganisms that serve as food is induced, but which in turn convert ammonium into inorganic nutrients that favor microalgal growth and consequently reduce or eliminate water exchanges. A deterministic bioeconomic model was built based on data iterations made up of four submodels, a) biological, b) management, c) economic, and d) risk, which interact with each other through the System Dynamics Theory. The model provides the financial indicators Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Benefit/Cost (B/C). The results indicated that the TBF produced better results than the AV system since it saves up to 23% in balanced feed, reduces natural mortality by up to 90%, and saves water three times greater in the TBF than in the AV system. Economically, TBF allows us to reduce operating expenses by \$2.00 pesos/kg, increase net profits by up to 300%, and increase the IRR by 11 points and a B/C of \$0.08 pesos/kg. The sensitivity analysis using TBF indicated that a reduction of 2°C in the average annual water temperature, as occurs in the Altiplano, the biomass harvested was reduced by 53%. The duration of the production cycle was increased by six weeks, which reduced the NPV by 55%, the IRR by 4% and the B/C by \$0.03 pesos. However, at this temperature, the NPV (\$3,043,600 pesos), the IRR (38.7%) and, the B/C (\$1.26 pesos) are positive, indicating the productive and economic viability to cultivate tilapia with TBF in the Altiplano of Mexico.

**Key words:** Bioeconomy, *Oreochromis niloticus*, Bioeconomic modeling, Aquaculture.


ORCID: 0000-0002-3426-4659

Vo. Bo. Co-Directores de Tesis



---

Dr. Alfonso N. Maeda Martínez



---

Dra. Mariel Guzmán Klanian

**Dedicatoria**

PARA MAXIMILIANO Y CLARA

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada (No. 002955) para el desarrollo, culminación y obtención del grado de Doctor en Ciencias.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., y a la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos, por otorgarme la beca con número de solicitud 1320 la cual, me permitió continuar con la conclusión de mi trabajo de tesis en tiempo extra temporal.

Al cuerpo Académico, de Investigadores y Catedráticos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) y Universidad Marista de Mérida (UMM) por el apoyo, guía y conocimientos compartidos a través de cada clase, evaluación y exposición que me permitieron nutrir mi trabajo de tesis y expandir mis expectativas.

Al cuerpo de Investigadores de la Unidad Nayarit del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (UNCIBNOR) por la información, apoyo y motivación para el desarrollo de este trabajo de tesis y mi desarrollo en el área de las Ciencias.

Finalmente, a mi Comité Tutorial por cada observación, recomendación y motivación para la mejora continua del desarrollo de mi trabajo de tesis.

GRACIAS.



## Contenido

<b>Resumen</b> .....	i
<b>Summary</b> .....	ii
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Contenido</b> .....	v
<b>Lista de figuras</b> .....	vii
<b>Lista de tablas</b> .....	viii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Tilapia del Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) .....	3
1.1.1 Biología y características principales de la especie .....	3
1.1.2 La Producción de tilapia en México .....	4
1.1.3 La Producción de tilapia en Aguascalientes.....	6
1.1.4 Tecnología biofloc (TBF).....	7
1.1.5 Modelado Bioeconómico en acuicultura .....	8
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	10
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	15
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	16
5.1 Objetivo general.....	16
5.2 Objetivos particulares .....	16
<b>6. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	17
6.1 Modelo conceptual .....	17
6.2 Evaluación de impacto .....	20
6.3 Origen de los datos.....	20
6.4 Selección de los escenarios a evaluar .....	21
6.5 Modelo matemático.....	23
6.5.1 Submodelo biológico.....	23
6.5.1.1 Crecimiento en peso .....	23
6.5.1.2 Supervivencia en sistema.....	24
6.5.1.3 Heterogeneidad de pesos .....	25
6.5.1.4 Alimento consumido .....	26
6.5.1.5 Requerimientos de oxígeno en el sistema .....	28
6.5.2 Submodelo de manejo .....	29
6.5.2.1 Aireación .....	29
6.5.2.2 Biomasa .....	31
6.5.2.3 Cosecha .....	31
6.5.2.4 Cantidad de alimento, tasa de alimentación y Factor de Conversión Alimenticia .....	32
6.5.2.5 Cantidad de melaza.....	34
6.5.2.6 Recambios de agua .....	34
6.5.3 Submodelo económico.....	35
6.5.3.1 Costo por pie de cría .....	36
6.5.3.2 Costo por alimentación .....	36

6.5.3.3 Costo por aplicación de melaza .....	36
6.5.3.4 Costo de energía eléctrica por aireación .....	37
6.5.3.5 Costo de energía eléctrica por recambios de agua.....	37
6.5.3.6 Costos por cosecha.....	37
6.5.3.7 Costo total .....	38
6.5.3.8 Ingresos brutos.....	38
6.5.3.9 Utilidad bruta .....	39
6.5.3.10 Depreciación.....	39
6.5.3.11 Utilidad neta.....	40
6.5.3.12 Parámetros de rentabilidad: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio/Costo (B/C).....	40
6.5.4 Submodelo de riesgo.....	40
6.5.4.1 Análisis de sensibilidad.....	41
6.5.4.2 Análisis de Monte Carlo.....	42
6.5.5 Información de salida para el productor.....	42
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
7.1 Submodelo biológico.....	44
7.2 Submodelo de manejo .....	48
7.3 Submodelo económico.....	50
7.4 Análisis de sensibilidad.....	53
7.5 Análisis de Monte Carlo .....	56
<b>8. DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
8.1 Submodelo biológico.....	57
8.2 Submodelo de manejo .....	58
8.3 Submodelo de económico.....	59
8.4 Análisis de sensibilidad.....	61
8.5 Análisis de Monte Carlo .....	63
8.6 Diferencias productivas y de manejo entre zonas geográficas.....	63
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>10. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>67</b>
<b>11. ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Aportación de la captura y la acuicultura a la producción mundial de animales acuáticos durante el periodo 2010 -2019. ....	2
<b>Figura 2.</b> Comportamiento y crecimiento de la producción de tilapia en México. ....	5
<b>Figura 3.</b> Modelo bioeconómico conceptual. ....	9
<b>Figura 4.</b> Modelo conceptual desarrollado para en análisis de la bioeconomía de la engorda de tilapia en el Altiplano Mexicano. ....	18
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo de la interacción de los submodelos y de los parámetros que conforman el modelo bioeconómico. ....	19
<b>Figura 6.</b> Extracto de la entrevista para la carga de información de entrada por parte del usuario para la generación de escenarios. ....	21
<b>Figura 7.</b> Distribución de la energía dietaria en peces de acuerdo a modelos bioenergéticos. ....	27
<b>Figura 8.</b> A) Comportamiento del crecimiento en peso de los organismos con datos pronosticados con CTC de 0.02425 a una temperatura de $25.87 \pm 1.03$ °C; B) Comportamiento del crecimiento en peso de los organismos con datos observados con CTC de 0.02400 a una temperatura de $30.66 \pm 1.05$ °C. ....	46
<b>Figura 9.</b> Curva de crecimiento de <i>Oreochromis niloticus</i> a una temperatura media de $25.87 \pm 1.03$ °C con CTC pronosticado en comparativa al crecimiento en peso CTC observado, Coeficiente de Pearson = 1. ....	47
<b>Figura 10.</b> A) Desglose de la inversión inicial en cada uno de los escenarios base desarrollados; B) Porcentaje de participación de los conceptos de inversión en cada escenario base evaluado en las zonas geográficas de Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Vedes (AV). ....	51

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Producción mundial animal por métodos acuiculturales durante el periodo 2010 – 2019.	2
<b>Tabla 2.</b> Producción mundial de tilapia del Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) durante el periodo 2010 - 2019.	3
<b>Tabla 3.</b> Principales parámetros fisicoquímicos en el agua para el desarrollo del cultivo de tilapia.	4
<b>Tabla 4.</b> Principales Estados productores de tilapia en México.	6
<b>Tabla 5.</b> Modelos bioeconómicos para el manejo acuícola de la producción de tilapia durante el periodo 1994 – 2020.	11
<b>Tabla 6.</b> Modelos bioeconómicos para la viabilidad económica de la producción de tilapia durante el periodo 1994 – 2020.	12
<b>Tabla 7.</b> Características biológicas, productivas y económicas de las granjas base para la generación de datos iniciales.	22
<b>Tabla 8.</b> Ejemplo de la generación de pesos (g) aleatorios de una muestra poblacional de 100 individuos.	26
<b>Tabla 9.</b> Parámetros de consumo de oxígeno de los elementos que conforman la producción de tilapia. Fuente: Valbuena y Cruz (2006); Boyd <i>et al.</i> (2018)	28
<b>Tabla 10.</b> Mínima Eficiencia Estándar de Aireación (EEA) de los sistemas suplementarios de aireación más utilizados en la acuicultura. Fuente: Boyd y Pillai (1985); Boyd (1998)	29
<b>Tabla 11.</b> Estructura de clases por intervalos de pesos de cosecha de interés comercial.	31
<b>Tabla 12.</b> Parámetros de cambios implementados para la generación de escenarios a evaluar.	41
<b>Tabla 13.</b> Datos de entrada y determinación del CTC de cada zona geográfica.	45
<b>Tabla 14.</b> Comparativa de los parámetros más importantes de cada escenario y tipo de producción del submodelo biológico.	48
<b>Tabla 15.</b> Comparativa de los parámetros de manejo aplicados en cada escenario y tipo de producción utilizados en el submodelo de manejo.	49
<b>Tabla 16.</b> Costos de inversión desglosados para cada uno de los escenarios y tipos de producción base en Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).	50
<b>Tabla 17.</b> Conceptos financieros de mayor importancia en cada escenario base evaluado en la Granja de Aguascalientes (A) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).	52
<b>Tabla 18.</b> Conceptos financieros de mayor importancia en cada escenario base evaluado en la Granja de Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).	52
<b>Tabla 19.</b> Indicadores de rentabilidad generados en cada escenario base en la Granja de Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV) con el modelo bioeconómico.	53
<b>Tabla 20.</b> Principales factores de cambio en la Granja A (Aguascalientes) bajo sistemas de producción con Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV) considerando una inflación anual de 5%.	54
<b>Tabla 21.</b> Principales factores de cambio en la Granja A (Aguascalientes) bajo sistemas de producción con Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV) considerando una inflación anual de 10%.	54

<b>Tabla 22.</b> Principales factores de cambio en la Granja B (Sinaloa) bajo sistemas de producción con Tecnología Biofloc (TBF y Aguas Verdes (AV) considerando tasas de inflación anual de 5% y 10%.....	55
<b>Tabla 23.</b> Resultados generados por el análisis de Monte Carlo en 10,000 simulaciones por escenario base para las Granjas de Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV). .....	56
<b>Tabla 24.</b> Aspectos bioeconómicos calculados con el modelo bioeconómico en Granjas de producción ubicadas en Aguascalientes y Sinaloa con Tecnología Biofloc en contraste con datos de bibliografía.....	60

## 1. INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento poblacional ha desgastado, al punto del agotamiento, las reservas naturales de peces en el mundo. Este crecimiento demográfico ha generado un impacto negativo en el mercado de suministros de alimentos provenientes del mar considerando que cerca del 20% de la población mundial basa su dieta en proteínas derivadas del pescado (Pomeroy *et al.*, 2008). Sin la implementación adecuada de estrategias que permitan mitigar la creciente escasez, como la gestión óptima de los recursos pesqueros, la adopción de tecnologías amigables con el medio ambiente y los recursos, la implementación e intervención de políticas que permitan la sana y equitativa distribución de los recursos pesqueros, así como la migración hacia la acuicultura en donde la mano del hombre interviene de forma técnica en el proceso de crianza de organismos acuáticos, muy pronto se agotaran no solo los recursos comestibles provenientes del mar sino también los recursos que ayudan a mantener en balance a los ecosistemas marinos (Pomeroy *et al.*, 2008).

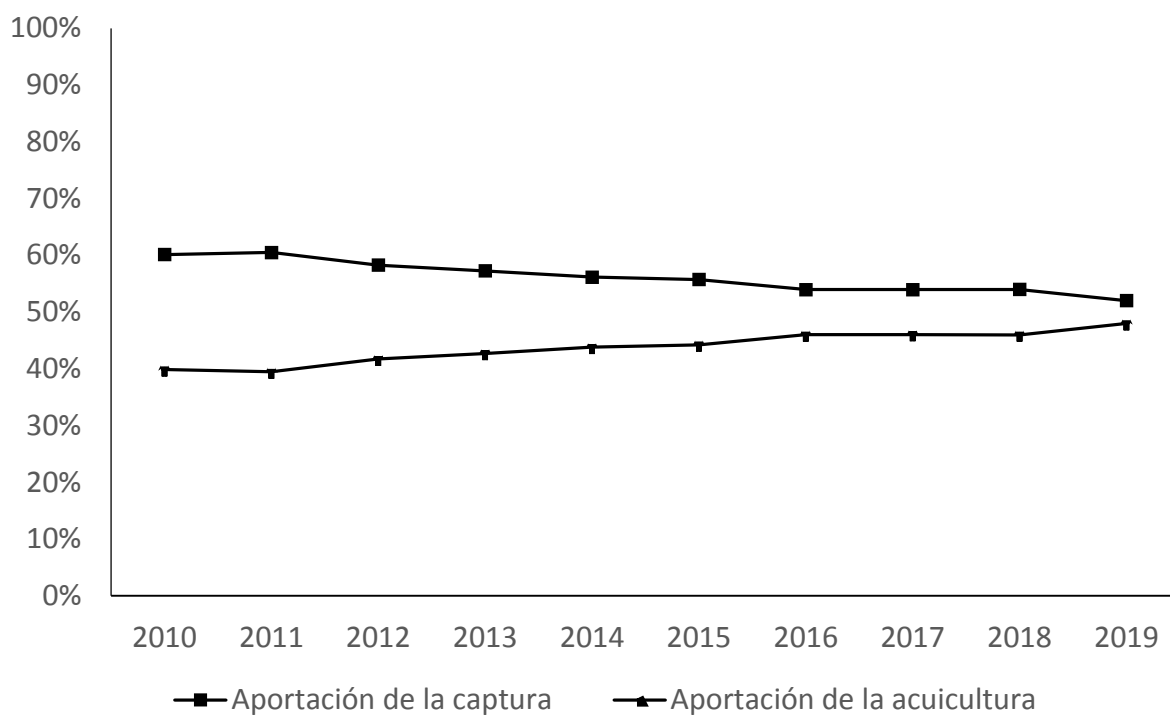
La acuicultura, como actividad productiva, ha desencadenado un rápido equilibrio en el suministro de pescados en el mercado alimenticio a nivel mundial. Este balance se ha alcanzado gracias a la contribución productiva que ha otorgado esta actividad en las últimas dos décadas y esto se puede observar en el rápido crecimiento que ha tenido este segmento. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) estima que esta actividad será clave para el 2030 otorgando más del 50% de la producción pescado para el consumo humano (FAO, 2003; Pomeroy *et al.*, 2008). De acuerdo a la FAO, en su reporte “El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura” en su edición 2020, la acuicultura presentó un crecimiento promedio anual del 5.3% dentro del periodo 2001 – 2018 representando el 46% de la producción pesquera total en el 2018 (FAO, 2020).

La producción animal a través de métodos acuiculturales ha arrojado una derrama económica mundial de 2.03 billones de dólares con una producción cercana a los 715 millones de toneladas presentando un incremento porcentual del 98% y 48%, respectivamente, durante el periodo 2010 – 2019 (Tabla 1), destacando una participación en la producción de recursos acuáticos del 43.96% frente al 56.04% producido por captura en este mismo periodo (Fig. 1) (FAO, 2021).

**Tabla 1.** Producción mundial animal por métodos acuiculturales durante el periodo 2010 – 2019.

Fuente: FAO (2021).

Año	Producción animal por acuicultura x10 <sup>3</sup> (tons.)	Valor de la producción animal por acuiculturax10 <sup>3</sup> (USD 1,000)	Incremento anual en la producción	Incremento anual en el valor
2010	57,744	131,222	0%	0%
2011	59,789	154,793	4%	18%
2012	63,480	169,771	6%	10%
2013	66,952	191,919	5%	13%
2014	70,506	210,890	5%	10%
2015	72,776	206,741	3%	-2%
2016	76,474	223,784	5%	8%
2017	79,497	238,697	4%	7%
2018	82,304	248,669	4%	4%
2019	85,335	259,547	4%	4%
<b>TOTAL</b>	<b>714,857</b>	<b>2,036,033</b>	<b>48%</b>	<b>98%</b>

**Figura 1.** Aportación de la captura y la acuicultura a la producción mundial de animales acuáticos durante el periodo 2010 -2019.

Fuente: FAO (2021).

Dentro de la producción acuícola de animales la producción de tilapias es una de las más importantes a nivel mundial. *Tilapia* spp. ocupa el segundo lugar dentro del grupo de peces de aleta producidos por métodos acuiculturales, destacando la producción de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), la cual fue la tercer especie de peces más producida en el mundo en el 2019 (FAO, 2020). La participación que tiene esta especie en el mercado mundial de alimentos es sumamente significativa (Tabla 2) ya que en la última década ha tenido un crecimiento productivo del 83%, participando con el 5.29% de la producción mundial, aportando poco más de 37.7 millones de toneladas que equivalen a una derrama económica de más de 74.5 mil millones de dólares (FAO, 2021).

**Tabla 2.** Producción mundial de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) durante el periodo 2010 - 2019.

Fuente: FAO (2021).

Año	Producción acuícola de tilapia x10 <sup>3</sup> (tons.)	Valor de la producción acuícola de tilapia x10 <sup>3</sup> (USD 1,000)	Incremento anual de la producción de tilapia	Incremento anual del valor de la producción de tilapia
<b>2010</b>	2,502	4,343	0%	0%
<b>2011</b>	2,917	5,677	17%	31%
<b>2012</b>	3,342	6,702	15%	18%
<b>2013</b>	3,484	7,261	4%	8%
<b>2014</b>	3,758	7,908	8%	9%
<b>2015</b>	4,050	8,075	8%	2%
<b>2016</b>	4,168	8,375	3%	4%
<b>2017</b>	4,446	8,411	7%	0%
<b>2018</b>	4,526	8,652	2%	3%
<b>2019</b>	4,590	9,179	1%	6%
<b>Total</b>	<b>37,783</b>	<b>74,583</b>	<b>83%</b>	<b>111%</b>

## 1.1 Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*)

### 1.1.1 Biología y características principales de la especie

La tilapia del Nilo es un pez dulceacuícola de origen africano que pertenece a la familia Cichlidae, la cual tiene un nivel biotecnológico para su producción completo en todas sus etapas de desarrollo (INAPESCA, 2018). Necesita intervalos de temperatura óptimos que oscila entre



los 28 a los 32°C para poder alcanzar pesos entre los 400 y 500 gramos en un periodo de 5 a 6 meses (FAO, 2016). Gracias a características como su rápido crecimiento, tolerancia a altas densidades de siembra, hábitos alimenticios omnívoros, fácil adaptación a alimentos peletizados comerciales, gran plasticidad a la manipulación durante la producción, tolerancia a diferentes intervalos en la calidad del agua (Tabla 3), aceptación por el consumidor y rentabilidad productiva, ha logrado colocarse en la mayor parte de regiones tropicales en el mundo como una opción viable de producción en diversos sistemas acuícolas (Vega *et al.*, 2009).

**Tabla 3.** Principales parámetros fisicoquímicos en el agua para el desarrollo del cultivo de tilapia.

Fuente: SAGARPA (2011); INAPESCA (2018).

Parámetro	Óptimo	Límites
Temperatura	24 °C - 29 °C	< 11 °C - > 32 °C
Oxígeno disuelto	5 mg/L	< 3 mg/L
pH	7.5	6.5 - 8.5
Salinidad	< 20 ppt	> 20 ppt
Amonio total	Hasta 2mg/L	> 2mg/L
Amonio	< 0.1 mg/L	> 0.1 mg/L
Nitritos	< 0.1 mg/L	> 0.1 mg/L
Nitratos	< 5 mg/L	> 5 mg/L
Transparencia	35 - 45 cm	> 45 cm

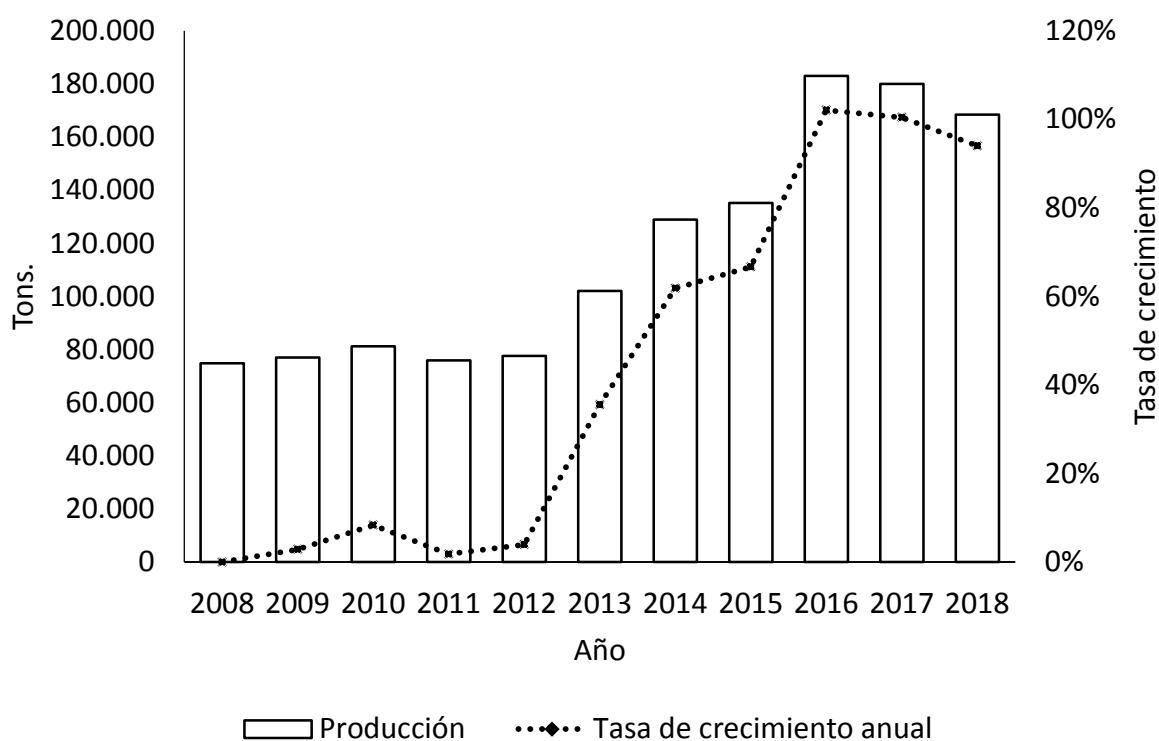
Aunado a lo anterior, y considerando la fuerte tendencia en el mercado por productos con bajo contenido en colesterol y alto contenido en proteínas, sitúa a la tilapia como una opción viable para mitigar el déficit proteico que tienen en la actualidad la dieta humana, además, de posicionarse como una alternativa más saludable en comparación a la carne de aves, cerdo y res (Toledo y García, 2000).

### 1.1.2 La Producción de tilapia en México

En México, la tilapia fue introducida en el año de 1964 con organismos procedentes de Estados Unidos de América, los ejemplares importados fueron depositados en una estación piscícola de Oaxaca para posteriormente distribuirlos ampliamente en una gran cantidad de diferentes embalses naturales y artificiales (Pullin y Low McConell, 1982; Toledo y García, 2000).

De acuerdo con datos de la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA) en el 2018 la producción de tilapia en México ha registrado una tasa de crecimiento promedio anual de 9.08% de 2008 a 2018, presentando decrementos en los años 2011, 2017 y 2018 del 7%, 2% y 6%, respectivamente, y un crecimiento del 125% en este mismo periodo (Fig. 2).

La producción de tilapia en el 2018 se desarrolló a un nivel de poco más 168 mil toneladas en peso vivo, con una derrama económica de 3,273 millones de pesos, de las cuales cerca del 81% (135,571 toneladas) fue por acuicultura (CONAPESCA, 2018). A nivel nacional Chiapas, Jalisco y Michoacán produjeron el 49% de la producción de tilapia a nivel nacional con una participación del 17%, 21% y 10 %, respectivamente (Tabla 4), mientras que el 51% restantes de la producción nacional se concentró en los demás estados de la República Mexicana (CONAPESCA, 2018). Por su volumen y valor comercial la tilapia se encuentra en el lugar número tres a nivel nacional.



**Figura 2.** Comportamiento y crecimiento de la producción de tilapia en México.

Fuente: CONAPESCA (2018).

**Tabla 4.** Principales Estados productores de tilapia en México.

Fuente: CONAPESCA (2018).

<b>Entidad</b>	<b>Peso vivo (tons.)</b>	<b>Participación nacional</b>
Jalisco	35,887	21%
Chiapas	28,230	17%
Michoacán	17,615	10%
Sinaloa	17,553	10%
Nayarit	14,292	8%
Veracruz	12,386	7%
Tabasco	7,620	5%
Guerrero	5,674	3%
Edo. de México	4,948	3%
Resto del país	24,154	14%
<b>TOTAL</b>	<b>168,359</b>	<b>100%</b>

Para este mismo año se registró un déficit de 127,981 toneladas de tilapia, con un valor comercial cercano a los 300 millones de dólares, que, considerando este dato, la demanda nacional de tilapia para este año ascendió a las 296,340 toneladas en peso vivo, colocando a México como el segundo país importador de tilapia, después de Estados Unidos de Norteamérica (CONAPESCA, 2018).

### **1.1.3 La Producción de tilapia en Aguascalientes**

Por sus cualidades productivas, biológicas y gran adaptación a diferentes sistemas de cultivo la tilapia posee amplia aceptación dentro del estado, además de ser la principal especie dulceacuícola producida. Aguascalientes cuenta con más de 4 mil hectáreas de cuerpos hídricos, de los cuales destacan las extensiones que se encuentran en las Presas Presidente Plutarco Elías Calles y General Abelardo L. Rodríguez, estas presas tienen potencial para el desarrollo de la acuicultura en el Estado y esto se ha reflejado en el incipiente desarrollo de la producción de tilapia en la Entidad (INEGI, 2007). Para el 2018 Aguascalientes registró una producción de 119 toneladas en peso vivo de tilapia, con un crecimiento promedio anual del 41% durante el periodo de 2009 al 2018 (CONAPESCA, 2018). Hasta el 2021 el Estado contaba con 33 unidades de producción de las cuales la mayoría se encuentran asociadas al Sistema Producto Tilapia de la Entidad (Bussön, 2021).

#### 1.1.4 Tecnología biofloc (TBF)

Para los cultivos semi-intensivos e intensivos de tilapia la tecnología Biofloc (TBF) es un sistema de producción aplicado que permite manejar los cultivos con cero o bajo recambio de agua (Avnimelech y Kochba, 2009; De Schryver *et al.*, 2008). Al existir un bajo recambio de agua la materia orgánica en el sistema se incrementa convirtiéndose en un sustrato para las bacterias existentes en el biofloc las cuales obtienen su energía al metabolizar moléculas orgánicas, como el amoníaco ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) permitiendo la intensificación del cultivo y un mayor control en la calidad del agua disminuyendo la posibilidad del ingreso de patógenos y enfermedades al sistema (Ballester *et al.*, 2009; Avnimelech, 2012).

Esta biotecnología permite reciclar el alimento no consumido y los desechos producidos por los organismos por medio de flóculos, en los cuales se produce una biomasa bacteriana, que queda disponible para los organismos de cultivo como alimento *in situ* (Avnimelech, 2007; Emerenciano *et al.*, 2013). De acuerdo a Avnimelech (2007) esta biomasa aporta hasta el 50% de la proteína requerida por la tilapia para su alimentación permitiendo reducir un 20% el alimento otorgado a los organismos, lo cual ayuda a disminuir significativamente los costos de alimento balanceado necesario para su crecimiento. El principio básico de este sistema es el reciclaje de nutrientes, al mantener una alta relación Carbono: Nitrógeno (C:N) en el agua, a fin de estimular el crecimiento de bacterias heterotróficas que convierten el amoníaco en biomasa microbiana, favoreciendo y promoviendo la intensificación acuícola (Kubitza, 2011) con un sistema con limitado o cero recambios de agua (Avnimelech, 1999).

Si bien, las características descritas anteriormente sobre el biofloc permiten acentuar sus grandes beneficios en sistemas de cultivo, es importante destacar que existe diversa evidencia científica que sitúan a la TBF como una alternativa viable tanto productivamente como económicamente. En un estudio realizado por Muñoz (2018) se logró comprobar una reducción del 72.4% de los costos de producción por kilogramo producido gracias a las generalidades que presenta esta tecnología, al disminuir gastos en materia de consumo de agua y al incrementar la biomasa producida en el sistema. Otros estudios identificaron una reducción significativa del 20% en el uso de alimento balanceado, sin afectar la calidad del producto ni el bienestar del

organismo, además de lograr un incremento del 20% en la biomasa final cosechada y mejorando el Factor de Conversión Alimenticia (FCA) (Nhi *et al.*, 2018; Pérez *et al.*, 2018).

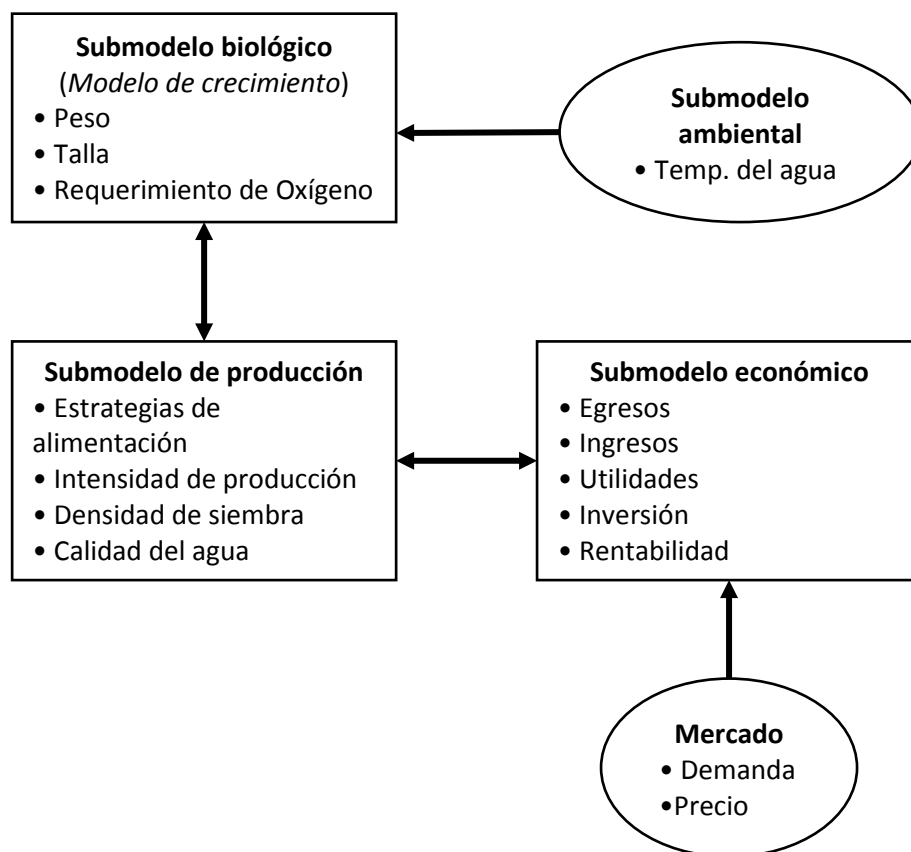
El biofloc promueve la acuicultura sustentable al proveer la disponibilidad de alimento durante todo el día y con un gran aporte nutricional en los cultivos intensivos, además de mejorar la calidad del agua por la constante producción de biomasa bacteriana, la cual transforma el nitrógeno existente en el sistema, mitigando los impactos ambientales generados por esta actividad al reutilizar el nitrógeno libre en el agua y transformándolo en proteína bacteriana (Crab *et al.*, 2007; Martínez *et al.*, 2009; Becerra *et al.*, 2012).

### **1.1.5 Modelado Bioeconómico en acuicultura**

En la actualidad evaluar el potencial económico, biológico y productivo que tiene una entidad, un municipio o una empresa permite, con los datos obtenidos de este análisis, la toma de decisiones a nivel gubernamental y empresarial, por lo que con un modelo bioeconómico se puede estimar a nivel cuantitativo los resultados de los parámetros externos e internos, con el objetivo de disminuir significativamente la incertidumbre de la inversión requerida para la implementación y el desarrollo de una Unidad Productiva (Almendarez, 2015).

La modelación bioeconómica se basa en el uso de herramientas matemáticas para generar un modelo que evalúe el comportamiento de los sistemas que integran la producción de un organismo vivo, en cualquiera de sus etapas, incorporando factores ambientales, biológicos, técnicos y económicos (Fig. 3). Básicamente un modelo bioeconómico tiene su origen en un submodelo biológico que está interrelacionado con un submodelo económico que permite cuantificar y evaluar el proceso productivo, así como identificar las variaciones económicas ante diferentes escenarios de producción y de mercado (Llorente y Luna, 2016).

Ante la alta competitividad y el crecimiento que ha alcanzado la acuicultura en los mercados de alto valor, esta actividad ha ido incrementando la generación de datos productivos que los productores tienen que manejar y que frente a este escenario, la modelación bioeconómica se ha convertido en una herramienta que permite conocer la dinámica de los sistemas y con ello realizar mejoras en la eficiencia de los procesos productivos bajo la consideración de los ejes planteados (Llorente y Luna, 2016).



**Figura 3.** Modelo bioeconómico conceptual.

Fuente: Ponce *et al.* (2006); Pomeroy *et al.* (2008).

## 2. ANTECEDENTES

Los modelos bioeconómicos acuícolas tienen sus precedentes en el análisis de pesquerías que posteriormente se adaptaron a este campo, basaban sus análisis en modelos bioeconómicos que representaban un enfoque metodológico para entender las interacciones existentes que entre los agentes que intervienen en el proceso de producción acuícola (Pomeroy *et al.*, 2008).

Ante el limitado acceso a la información productiva por parte de los productores y la incipiente investigación bioeconómica en acuicultura, los indicios de los modelos bioeconómicos eran modelos teóricos. Algunos trabajos iniciales fueron en relación a los tiempos óptimos de cosecha y el almacenamiento en el cultivo del camarón (Karp *et al.*, 1986; Leung y Shang, 1989), destacando el trabajo de Bjørndal (1988), quien desarrolló el primer modelo bioeconómico para la cosecha óptima en acuicultura, basando su modelo en trabajos desarrollados en bioeconomía silvícola (Llorente y Luna, 2016). Tomando como base el modelo bioeconómico teórico desarrollado por Bjørndal en 1988 autores como Arnason (1992), Heaps (1993, 1995), Hean (1994) y Mistiaen y Strand (1998), atendieron preguntas de investigación que dieron respuesta a efectos de alimentación, crecimiento de los organismos dependiendo de la densidad, precio y mercado, respectivamente (Llorente y Luna, 2016).

Para los años 2000, y ante la creciente necesidad de la obtención de información por parte de las empresas y entidades productivas para la toma de decisiones aplicadas a los procesos de producción acuícola, los modelos bioeconómicos empíricos han destacado sobre los teóricos teniendo solo algunos autores como Yu y Leung (2006, 2009) quienes modelaron el tiempo óptimo de cosecha, parcial y continua respectivamente, en la producción acuícola.

Si bien los modelos bioeconómicos han llegado a establecerse en el mundo de la acuicultura para dar respuesta a los productores e investigadores en la integración de los factores biológicos, económicos, productivos, técnicos y ambientales, que permitan examinar los procesos de creación de valor dentro de las empresas (Allen *et al.*, 1984; Cuenco, 1989), en el campo de la producción de tilapia estos modelos han permitido desarrollar en las últimas tres décadas, herramientas que permiten mejorar la gestión productiva y la viabilidad económica de estos organismos.

Dentro de los modelos bioeconómicos desarrollados dentro del campo de la acuicultura se han identificado 68 trabajos científicos enfocados en la modelación bioeconómica acuícola durante el periodo de 1994 – 2020, destacando que la mayor parte de estos productos se centran en la producción de camarón (*Penau spp.* – 15 trabajos), tilapia (*Oreochromi spp.* – 12 trabajos) y dorada (*Sparus aurata* -- 11 trabajos), especies que representan el 56% de los trabajos encontrados. De los 12 trabajos identificados en la modelación bioeconómica de la producción de tilapia se pueden agrupar en dos temas principales: 1) manejo acuícola (Tabla 5) y 2) viabilidad económica (Tabla 6), lo que da idea y mejora el entendimiento de sus principales aportaciones y aplicaciones.

**Tabla 5.** Modelos bioeconómicos para el manejo acuícola de la producción de tilapia durante el periodo 1994 – 2020.

Fuente: Pomeroy *et al.* (2008); Llorente y Luna (2016)

<b>Autores (año)</b>	<b>Especie</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Principal aplicación</b>
Kazmierczak y Caffey (1996)	<i>Tilapia sp.</i>	EEUU	Óptimo aprovechamiento de recursos en sistemas de recirculación acuícola.
Saiti <i>et al.</i> (2007)	<i>Oreochromis shiranus</i>	Malawi	Tiempo óptimo de cosecha para cultivos a pequeña escala.
Gasca Leyva <i>et al.</i> (2008)	<i>Tilapia sp.</i>	México	Tiempo óptimo de cosecha para activos biológicos con heterogeneidad de tamaño.
Poot López <i>et al.</i> (2010)	<i>Tilapia sp.</i>	México	Integración de sistemas de producción agrícola y acuícola (impacto en las tasas de alimentación).
Domínguez <i>et al.</i> (2011)	<i>Tilapia sp.</i>	México	Efecto de la heterogeneidad del tamaño y la ración sobre el tiempo y talla de cosecha óptima.
Poot López <i>et al.</i> (2014)	<i>Oreochromis niloticus</i>	México	Tamaño óptimo de la porción.
Karimanzira <i>et al.</i> (2017)	<i>Tilapia sp.</i>	Alemania	Integración de sistemas productivos agrícolas y acuícolas (sistema acuapónico tomate-tilapia).
Domínguez <i>et al.</i> (2020)	<i>Tilapia sp.</i>	México	Tamaño óptimo de la porción.
Kim <i>et al.</i> (2020)	<i>Oreochromis niloticus</i>	México	Efecto de la heterogeneidad detalla en el tiempo óptimo de cosecha.



**Tabla 6.** Modelos bioeconómicos para la viabilidad económica de la producción de tilapia durante el periodo 1994 – 2020.

Fuente: Pomeroy *et al.* (2008); Llorente y Luna (2016)

<b>Autores (año)</b>	<b>Especie</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Principal aplicación</b>
Ponce <i>et al.</i> (2006)	<i>Oreochromis niloticus</i>	México	Viabilidad económica de Tilapia del Nilo en un policultivo (langosta roja australiana-tilapia).
Poot y Gasca (2009)	<i>Oreochromis niloticus</i>	México	Evaluación económica del reemplazo de alimento en la dieta de tilapia.
Zuñiga y Goycolea (2014)	<i>Tilapia roja</i>	Ecuador	Viabilidad económica del cultivo de tilapia roja.

La categoría de manejo acuícola es la más abordada por los autores con un 75% de los trabajos encontrados. Los principales objetivos de estos trabajos son los de realizar mejoras dentro de los eslabones de la cadena de producción para poder obtener mejores rendimientos productivos, a través de la identificación de los tiempos óptimo de cosecha de un sistema, el mejoramiento de las técnicas de alimentación para disminuir esfuerzos y costos, así como la integración de sistemas acuapónicos o policultivos para un mayor aprovechamiento de la capacidad instalada y de los desechos orgánicos.

Por otro lado, la categoría de viabilidad económica presenta interesante aportaciones en materia de desarrollo de modelos que permiten, a través de simulaciones y el uso de datos teóricos y/o comerciales, evaluar el potencial productivo y económico que tiene o puede tener un sistema de producción acuícola, generando información cuantitativa para los tomadores de decisiones, la cual puede ser utilizada para mejorar, identificar o eliminar algún o algunos procesos que permitan tener mayores rentabilidades económicas.

Es importante denotar que dentro de la búsqueda bibliográfica realizada no se logró identificar la existencia de trabajos científicos en los que se desarrollaran modelos bioeconómicos que pudieran evaluar el potencial de la aplicación de la tecnología biofloc en la producción de tilapia. Así mismo, es sustancial puntualizar que no existen antecedentes de modelos bioeconómicos en tilapia que presenten la característica y la facilidad de adaptarse a diferentes

tipos de sistemas de producción, con sus principales características de manejo, en los que se integren la temperatura del agua como factor que influye en el crecimiento de los organismos y se reconozca como la principal variable de cambio.

### 3. JUSTIFICACIÓN

México tiene actualmente un déficit de 140,000 toneladas de tilapia al año, las cuales importa principalmente de China. Por lo tanto, para reducir el déficit se requiere incrementar la producción nacional mediante la intensificación de los cultivos con tecnologías modernas sustentables y expandir su cultivo a zonas más frías como en el Altiplano mexicano, donde los precios del pescado son más elevados. Sin embargo, como la tilapia es un organismo poiquiloterma cuya tasa de crecimiento depende de la temperatura del agua, es necesario conocer anticipadamente la viabilidad económica de su cultivo en dichas regiones. La bioeconomía ofrece herramientas para determinar la viabilidad económica y simular escenarios a partir de información biológica de la especie, de las condiciones ambientales que afectan el crecimiento y supervivencia de los peces, de la tecnología a emplear y de las condiciones económicas de la región objetivo. En el presente trabajo se realizó la evaluación bioeconómica de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en el Altiplano de México, tomando como base los registros térmicos de una granja en el estado de Aguascalientes que emplea tanques aislados térmicamente. Esta se comparó contra el perfil térmico de una granja del estado de Sinaloa que representa las regiones cálidas donde se cultiva la tilapia en nuestro país. Además la viabilidad económica se determinó empleando dos tecnologías: la tecnología clásica de aguas verdes (AV) en la que se realizan recambios de agua para mantener por debajo los niveles críticos de amonio, y donde ocurre un incremento gradual en la productividad primaria, contra la tecnología biofloc (TBF) en la que se induce la formación de flóculos de microorganismos que sirven de alimento, pero que a su vez, convierten el amonio en nutrientes inorgánicos que favorecen el crecimiento microalgal y en consecuencia reducen o eliminan la necesidad de recambiar el agua.

#### 4. HIPÓTESIS

Si la implementación de biotecnologías, como es el caso de la TBF, permite innovar, mejorar y aprovechar la capacidad instalada de los sistemas de producción, entonces la aplicación de TBF incide significativamente de manera positiva en los rendimientos productivos, en la rentabilidad y en la viabilidad económica de un cultivo de tilapia permitiendo obtener un mejor desempeño bioeconómico considerando las temperaturas confort en las zonas geográficas en las que se desarrolla la actividad.

Hipótesis matemática	
<i>H<sub>0</sub></i>	<i>H<sub>a</sub></i>
$R_{TBF} = R_{Trad}$	$R_{TBF} \neq R_{Trad}$

Dónde:

$R_{TBF}$ : Rentabilidad del cultivo con tecnología biofloc.

$R_{Trad}$ : Rentabilidad del cultivo con métodos tradicionales.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Analizar la viabilidad bioeconómica del potencial económico-productivo del sistema intensivo de cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) con tecnología biofloc en Aguascalientes y validar el modelo bioeconómico generado.

### 5.2 Objetivos particulares

1. Identificar los parámetros físicos, químicos, biológicos, tecnológicos, zootécnicos, económicos y productivos necesarios para la construcción de un modelo bioeconómico.
2. Seleccionar los modelos matemáticos más adecuados que conformaran el modelo bioeconómico para el tratamiento y gestión de los parámetros de entrada.
3. Validar y ajustar los modelos matemáticos empleados utilizando datos, teóricos-comerciales, de sistemas de producción en TBF y AV en la zona de estudio para un mejor desempeño del modelo bioeconómico.
4. Evaluar a través de la metodología de impacto la información de entrada al modelo bioeconómico para obtener datos de cambio en el tiempo de duración del proyecto.
5. Comparar los resultados obtenidos a través del análisis bioeconómico de los dos tipos de sistemas de producción evaluados para la generación de información específica y concreta que permita seleccionar las mejores condiciones, estrategias y métodos de producción para la toma oportuna de decisiones.
6. Parametrizar la plasticidad de cada uno de los escenarios bases mediante un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros de mayor impacto que inciden de manera significativa en los resultados iniciales obtenidos.

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

Para poder desarrollar el análisis de la viabilidad bioeconómica del potencial económico-productivo del sistema intensivo de cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) con tecnología biofloc, se desarrolló un modelo bioeconómico siguiendo las metodologías de la Teoría de Dinámica de Sistemas y Simulación de Sistemas planteados por Forrester (1961) y Gasca (1999), respectivamente. Además, al tener como objetivo el realizar una evaluación bioeconómica, se implementa la metodología de Evaluación Impacto para evaluar los cambios (positivos o negativos) y el efecto que presenta el proyecto de inversión en el bienestar de los individuos desde su implementación inicial a través del tiempo (Gertler *et al.*, 2017).

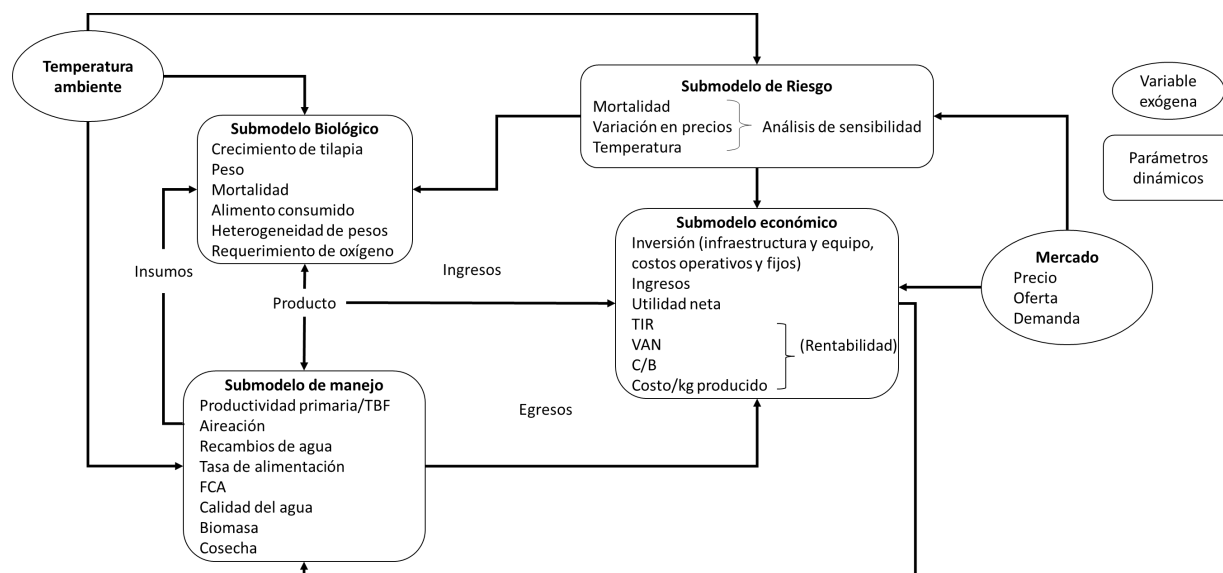
La elaboración del modelo bioeconómico tiene su origen con la descripción conceptual del modelo identificando los componentes que lo van a conformar, así como, la interacción existente entre ellos. Posteriormente se realizó la búsqueda, identificación y selección de los modelos matemáticos que tuvieran mayor pertinencia para el cálculo y descripción de los parámetros seleccionados que conforman el modelo bioeconómico. Considerando la aplicabilidad del modelo bioeconómico dentro de un plano existente y su uso en proyectos de inversión, es imperativo evaluar su representatividad razonable frente a un panorama real afectado por cambios causales que se salen de la injerencia del ejecutor del proyecto por lo que se realizó un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más influyentes y que representan cambios significativos dentro del sistema de producción. Finalmente, y una vez validado el modelo con parámetros reales, se procedió a realizar las simulaciones del cultivo para obtener las evaluaciones bioeconómicas.

Con la finalidad de que el modelo sea de fácil acceso y usabilidad para los usuarios este se desarrolló en el software Excel de Microsoft Office® ya que esta es una herramienta básica y de dominio general en todos los equipos de cómputo.

### 6.1 Modelo conceptual

El modelo desarrollado está adaptado y fundamentado en Ponce *et al.* (2006), donde en el presente trabajo se encuentra conformado por dos tipos de entradas de datos los cuales están representados por 1) variables exógenas, aquellas en las que no se tiene un dominio total de la información y que dependen de causalidades o de eventos externos al modelo bioeconómico; y

por 2) parámetros dinámicos los cuales, pueden ser fijados por el usuario del modelo para realizar las simulaciones deseadas, al existir interacciones entre los parámetros estos se vuelven dinámicos (Fig. 4). Además, el modelo se encuentra conformado por cuatro submodelos: biológico, de manejo, económico y de riesgo, los cuales, están integrados por los parámetros seleccionados y que tienen pertinencia dentro de la engorda de tilapia.

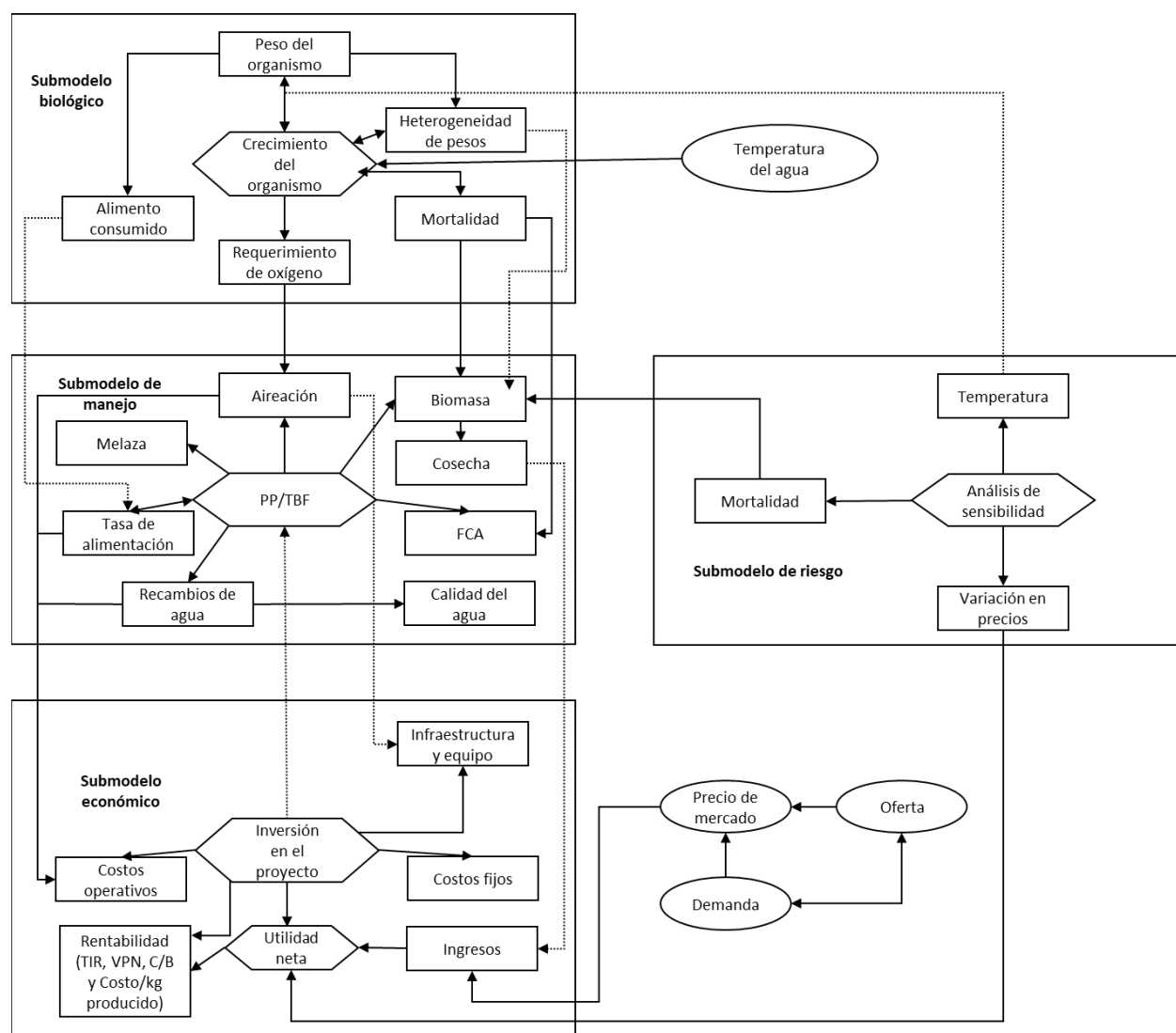


**Figura 4.** Modelo conceptual desarrollado para en análisis de la bioeconomía de la engorda de tilapia en el Altiplano Mexicano.

Fuente: Adaptado de Ponce *et al.* (2006).

Las interacciones existentes entre los diferentes submodelos se basan en lo mencionado por Gasca (1999) considerando la información de entrada (inputs) y salida (output) de cada uno de ellos (Fig. 5). En el submodelo biológico el parámetro de cambio (crecimiento del organismo) que lo conforma se ve afectado significativamente por la temperatura existente en el agua misma que interactúa con el alimento consumido. Para el caso del submodelo de manejo se definen dos parámetros importantes, el primero, es el tipo de sistema de producción a implementar (AV o TBF) el cual, determina las características tecnológicas y de manejo del sistema definiendo parámetros como el tipo de aireación, la tasa de recambio de agua, la densidad de siembra y el FCA, el segundo parámetro de importancia es el de la biomasa cosechada; parámetro que mantiene una fuerte relación con la heterogeneidad de pesos durante el ciclo de producción.

Las interacciones existentes entre los dos submodelos anteriores permiten al submodelo económico determinar parámetros del tipo de inversión económica, beneficios económicos obtenidos y niveles de rentabilidad dando pie a establecer y determinar los objetivos de mercadeo y producción necesarios para que el proyecto sea viable. Finalmente, podemos observar que el submodelo de riesgo nos permite crear diferentes escenarios para evaluar la información y plasticidad de los datos de salida, esto a través de un análisis de sensibilidad considerando variables de importancia y que afectan de manera significativa cada uno de los submodelos anteriores.



**Figura 5.** Diagrama de flujo de la interacción de los submodelos y de los parámetros que conforman el modelo bioeconómico.

Fuente: Adaptado de Gasca (1999).



## 6.2 Evaluación de impacto

La cuantificación del impacto, tanto negativo como positivo, del proyecto a desarrollar permitió monitorear el comportamiento de los parámetros económicos y de rentabilidad a través del tiempo brindando evidencia sólida para la toma de decisiones. Para el caso de las evaluaciones económicas, así como, las simulaciones realizadas se consideró una temporalidad de cinco años de desarrollo del proyecto, además de considerar como unidad monetaria en todos los datos económicos del presente trabajo el peso mexicano (\$ MXN).

## 6.3 Origen de los datos

Para lograr un correcto funcionamiento y validación del modelo bioeconómico fue necesario ajustarlo mediante datos reales de sistemas de producción. Los datos observados fueron proporcionados por dos granjas de engorda durante el periodo 2016 – 2018 y para fines de mantener la confidencialidad de los datos facilitados por las granjas a partir de este punto en adelante se les denominara Granja A y Granja B. Es importante destacar que la selección de las granjas se realizó considerando dos zonas térmicas distintas.

La granja A se encuentra ubicada en el municipio de Aguascalientes, Ags. a una altitud de 2021 msnm y cuenta con un sistema de engorda con aguas verdes basado en el uso de 16 tanques circulares de geomembrana con una capacidad individual de  $69.4 \text{ m}^3$  los cuales son alimentados por aireación suplementaria proporcionada por blowers y difusores de aire, en sus tanques siembran organismos con un peso individual de 5 g y producen organismos de hasta 600 g con ciclos productivos de 6 meses, cada tanque cuenta con una capacidad productiva de 1.12 toneladas/ciclo manejando densidades de siembra de  $30 \text{ organismos/m}^3$ , la temperatura promedio diaria anual en el agua que tiene esta granja es de  $26.16 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La granja B se encuentra ubicada en el municipio de El Rosario, Sinaloa a una altitud de 6 msnm, cuenta con una infraestructura de 10 estanques de tierra recubiertos con geomembrana con un volumen individual de  $2,520 \text{ m}^3$  en un sistema con TBF. Aquí se utilizan aireación suplementaria proveniente de aireadores tipo paleta, el peso individual inicial de siembra que manejan es de 3 g cosechando organismo de hasta 500 g con ciclos productivos de 4 meses, la capacidad de carga que tiene cada uno de sus estanques es de 10 toneladas/ciclo con densidades de siembra

de 10 organismos/m<sup>3</sup>, la temperatura promedio diaria anual en el agua en esta granja es de 30.66 °C.

Con la finalidad de que el modelo bioeconómico permita evaluar diferentes sistemas de engorda, los cuales pueden tener características biológicas, productivas y económicas distintas a las mencionados con anterioridad, se desarrolló un esquema de entrevista (Fig. 6) que le permite al usuario cargar los datos de entrada a cada uno de los submodelos que integran el modelo, esto con el propósito de que se generen diferentes escenarios y simulaciones permitiendo la adaptabilidad del mismo a la información suministrada.

Nombre de la Granja o Cliente	Juan Carlos R. Dorantes de la O		
	Fecha de elaboración	03/05/2022	
Información biológica	Cantidad	Unidad	Observaciones
¿Cuál va a ser el peso de siembra de los organismos?	5	g	
¿Cuál va a ser el peso de cosecha esperado de los organismos al finalizar el ciclo de 6 meses?	600	g	
¿Qué mortalidad natural en el sistema esta considerando?	20%		en sistemas de producción primaria se considera aceptable una mortalidad entre el 30% y el 10% con la aplicación de biofloc esta mortalidad se puede reducir hasta un 50%
Información zootécnica	Cantidad	Unidad	Observaciones
¿Cuál va a ser la densidad de siembra?	10	org/m <sup>3</sup>	en sistemas de producción intensiva de tilapia la densidad debe oscilar entre 10 - 30 org/m <sup>3</sup>
¿En qué mes tiene contemplado realizar la siembra de los organismos?	octubre		seleccione alguna de las opciones establecidas
¿Cuál es el área que tiene contemplada para realizar el cultivo?	5,000	m <sup>2</sup>	
¿Qué profundidad promedio tendrá su sistema de producción?	1	m	
¿Qué tipo de sistema de producción implementará en su cultivo?	Productividad primaria		seleccione alguna de las opciones establecidas
De implementar TBF ¿Qué relación de Carbono:Nitrógeno maneja en su sistema?	0	partes de Carbono:1 parte de Nitrógeno	
¿Cuál es la concentración de sal que contiene la fuente de origen de agua para alimentar el sistema	0	%	
¿A qué altura sobre el nivel del mar esta establecido su cultivo?	0	msnm	
¿Qué tipo de sistema de aireación complementario utilizará? (seleccione alguna de las opciones establecidas)	Blower burbuja fina		seleccione alguna de las opciones establecidas
¿Cuál es la potencia en kW del aireador a utilizar?	1.34	kW	si no la conoce utilizar la potencia predeterminada (1.34 kW)
¿Cuál es la potencia en HP del aireador a utilizar?	1.8	HP	si no la conoce utilizar la potencia predeterminada (1.80 HP)
¿Cuántas horas se mantendrá encendido el sistema de aireación complementario?	12	horas	para el caso de sistemas con producción primaria se recomienda encenderlo 12 horas durante la noche en el caso de biofloc la aireación debe de ser 24 horas
¿Qué porcentaje de recambio de agua tiene considerado para su sistema?	50%		es deseable por lo menos realizar un recambio de agua del 50% cada 7 días en sistemas con producción primaria en caso de biofloc se aconseja realizar un recambio del 5% cada 7 días considerando un calidad del agua óptima en ambos casos

**Figura 6.** Extracto de la entrevista para la carga de información de entrada por parte del usuario para la generación de escenarios.

#### 6.4 Selección de los escenarios a evaluar

Para la simulación de los escenarios se consideraron dos granjas hipotéticas bases que manejaran un sistema de producción con AV y con TBF similar a la de las granjas antes mencionadas. Estas características de las granjas bases cubren los supuestos de infraestructura,

equipamiento, manejo, producción e inversión de una granja comercial por lo que los datos de entrada de estas granjas hipotéticas se parametrizaron de la siguiente manera (Tabla 7):

**Tabla 7.** Características biológicas, productivas y económicas de las granjas base para la generación de datos iniciales

Parámetro	Granja A		Granja B	
	AV	TBF	AV	TBF
Tipo de producción	AV	TBF	AV	TBF
Peso promedio de siembra (g)	5	5	5	5
Peso promedio de cosecha (g)	600	600	600	600
Mortalidad	20%	10%	20%	10%
Densidad (org/m <sup>3</sup> )	10	30	10	30
Volumen (m <sup>3</sup> )	5,000	5,000	5,000	5,000
Relación C:N	-	10:1	-	10:1
Altitud (msnm)	2,021	2,021	6	6
Temperatura media del ciclo productivo (°C)	25.87	25.87	30.20	30.20
Salinidad (‰)	0	0	0	0
Tipo de aireación suplementaria	Paletas	Paletas	Paletas	Paletas
Horas de trabajo de aireación	12	24	12	24
Recambio de agua (%/semana)	20%	5%	20%	5%
Precio por kg de organismos > 500 g	\$45.00	\$45.00	\$45.00	\$45.00
Precio por kg de organismos 400 a 499 g	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00
Precio por kg de organismos 300 a 399 g	\$30.00	\$30.00	\$30.00	\$30.00
Inversión inicial	\$250,000.00	\$250,000.00	\$250,000.00	\$250,000.00
Costos fijos (\$/semana)	\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00
Costos variables (\$/semana)	\$500.00	\$500.00	\$500.00	\$500.00
Tasa de descuento (CETES a 1 año)	8.9%	8.9%	8.9%	8.9%
Inflación anual	5%	5%	5%	5%

Los organismos sembrados en cada tipo de sistema de producción, AV y TBF, fueron considerados a partir de las características productivas de un sistema de producción intensiva el cual va de los 10 a los 30 organismos por metro cúbico con lo que se busca no estresar el sistema.

Otro apartado importante para la generación de escenarios base fue la selección del ciclo de producción. Para este ejercicio se consideró como mes de cosecha el tiempo en el que la temporada de Semana Santa está presente (abril). Esta selección se basó en el supuesto de que durante esta época se logra obtener los máximos beneficios económicos y productivos de las granjas de engorda de tilapia a evaluar y existe una alta demanda del producto final por lo que

en cuestión de marketing esta temporada es cruciales para los productores. Sin embargo, y como se ha mencionado con anterioridad, el modelo presenta la cualidad de adaptarse a las características de la información de entrada que el usuario proporcione a través de la entrevista como tal es el caso del mes de siembra de los organismos o el tipo de sistema de producción que se implemente en el cultivo (Fig. 6).

## 6.5 Modelo matemático

El modelo bioeconómico desarrollado en el presente trabajo se elaboró a partir del enfoque dinámico (Forrester, 1961) el cual permite representar de manera gráfica cada uno de los sistemas dinámicos. De acuerdo a Aracil (1995) la estructura básica del modelo matemático se basa principalmente en las retroacciones causales, positivas o negativas, que representan un ciclo entre las variables, de la misma forma en que sucede en la naturaleza.

### 6.5.1 Submodelo biológico

Considerando los datos observados en el cultivo proporcionados por las granjas anteriormente mencionadas se desarrolló, parametrizó y validó el submodelo biológico. Este modelo tiene como eje central la función biológica del crecimiento en peso de la tilapia considerando como variable de cambio la temperatura del agua la cual permite simular la ganancia o pérdida de peso considerando situaciones diferentes en el sistema de cultivo. Los modelos matemáticos seleccionados para elaborar este submodelo fueron contemplados en función de la información disponible en las granjas comerciales, como es el caso del peso inicial (a la siembra), peso final (a la cosecha), temperatura en el agua dentro del sistema de producción y el tiempo en el que se llega al peso final.

#### 6.5.1.1 Crecimiento en peso

El crecimiento en peso se estimó a través de un modelo matemático utilizado para pronosticar la ganancia en peso que tienen los organismos considerando la temperatura del agua descrito por Cho y Bureau (1998) y modificado por Atwood *et al.* (2003):

$$CTC = [(P_f^{1/3} - P_i^{1/3}) / (\Delta T * t)] \quad (1)$$

Donde  $CTC$  es el Coeficiente Térmico de Crecimiento,  $P_f$  y  $P_i$  es el peso final y peso inicial del organismo respectivamente,  $\Delta T$  es la temperatura efectiva del agua y  $t$  es el tiempo.

Una vez determinado el Coeficiente Térmico de Crecimiento se puede proceder a calcular el crecimiento en peso del organismo mediante el siguiente despeje de la ecuación (1):

$$P_f = [P_i^{1/3} + (CTC * \Delta T * t)]^3 \quad (2)$$

Para validar la correcta estimación del crecimiento en peso de los organismos a través de la ecuación (2) se realizó un análisis de correlación a través del coeficiente de Pearson entre los pesos observados y los pesos pronosticados y así poder estimar la asociación que presentan estas dos series de datos.

#### 6.5.1.2 Supervivencia en sistema

La supervivencia de los organismos fue modelizada a partir de la información proporcionada por las granjas y por manuales de cultivo especializados en tilapia, además, de considerar la función del tiempo. Se tomó como base del tiempo de cultivo un periodo de 26 semanas que es el tiempo en el que la tilapia alcanza un peso de cosecha comercial entre 500 y 600g, de acuerdo a manuales y a las características generales descritas por la FAO (2009) considerando parámetros de la calidad en el agua óptimos para el desarrollo de los organismos. Considerando las especificaciones mencionadas se empleó la siguiente ecuación exponencial:

$$N_t = [N_0 * e^{(-M_e/t_c)*t}] \quad (3)$$

Dónde  $N_t$  es el número de sobrevivientes,  $N_0$  es la población inicial,  $M_e$  es la mortalidad esperada durante todo el cultivo,  $t_c$  es una constante del tiempo del cultivo (26 semanas) y  $t$  es el tiempo.

### 6.5.1.3 Heterogeneidad de pesos

La heterogeneidad en los pesos de los organismos en un sistema de producción es un factor importante por considerar ya que tiene un impacto en la biomasa final cosechada y por consecuencia en los beneficios económicos obtenidos. Para la determinación de esta variable se empleó la siguiente ecuación típica estadística:

$$CV = \frac{\sigma}{Pp_{cos}} * 100 \quad (4)$$

Dónde  $CV$  es el coeficiente de variación en peso,  $\sigma$  es la desviación y  $Pp_{cos}$  es el peso promedio de cosecha.

Considerando que  $\mu$  es un dato conocido y aportado por el productor y  $CV$  se tomó como un valor constante promedio obtenido del trabajo de Kim *et al.* (2020) se procedió a realizar el despeje de la fórmula 4 para obtener la desviación estándar:

$$\sigma = CV * Pp_{cos} \quad (5)$$

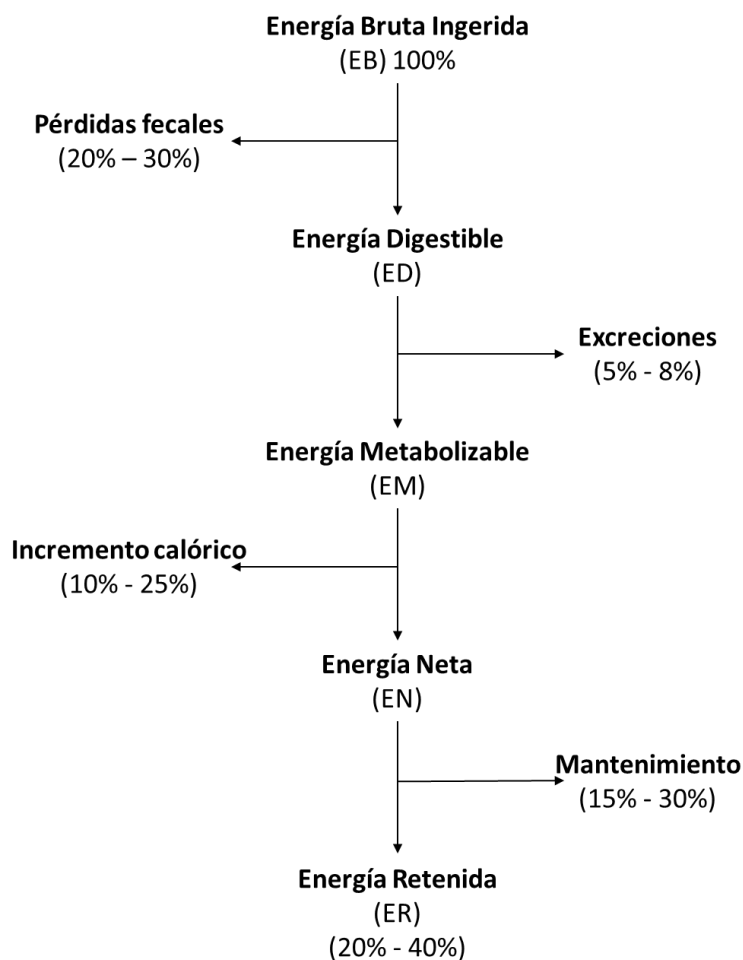
Con los resultados obtenidos se logró realizar la generación muestral de cien números aleatorios (Tabla 8) mediante una distribución normal en el software Excel para poder establecer la heterogeneidad de pesos de los organismos al momento de la cosecha.

**Tabla 8.** Ejemplo de la generación de pesos (g) aleatorios de una muestra poblacional de 100 individuos.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	$\sigma$	$\mu$	<b>CV</b>
<b>1</b>	876	838	580	875	477	172.66	654.47	26%
<b>2</b>	853	676	625	607	457			
<b>3</b>	817	759	609	806	420			
<b>4</b>	525	470	919	607	779			
<b>5</b>	571	876	525	894	415			
<b>6</b>	803	906	680	567	419			
<b>7</b>	865	479	511	434	599			
<b>8</b>	514	638	604	605	785			
<b>9</b>	438	397	700	846	437			
<b>10</b>	413	913	832	658	473			
<b>11</b>	789	423	888	630	632			
<b>12</b>	482	576	434	815	844			
<b>13</b>	821	488	726	829	483			
<b>14</b>	902	573	412	924	639			
<b>15</b>	459	782	538	560	401			
<b>16</b>	657	439	883	703	902			
<b>17</b>	822	469	543	830	902			
<b>18</b>	809	853	561	459	480			
<b>19</b>	807	891	916	592	408			
<b>20</b>	478	446	702	638	841			

#### 6.5.1.4 Alimento consumido

La estimación del alimento consumido fue determinado a través de los principios bioenergéticos expuestos por Kaushik (1998) y Cho y Bureau (1998) quienes determinaron que el uso de la energía va en función del metabolismo de los peces además de considerar el efecto de la temperatura en el agua en el metabolismo basal (Fig. 7).



**Figura 7.** Distribución de la energía dietaria en peces de acuerdo con modelos bioenergéticos.

Fuente: Kaushik (1998) y Cho y Bureau (1998)

Para la determinación del Energía Digestible Requerida (kJ/pez) se empleó la siguiente ecuación:

$$ED_{req} = [ER + MB + ICA + (EU + EB)] \quad (6)$$

Dónde  $ED_{req}$  es la energía digestible requerida,  $ER$  es la energía requerida,  $MB$  es el metabolismo basal,  $ICA$  es el incremento calórico y  $EU$  y  $EB$  son las excreciones urinarias y branquial, respectivamente.

Chowdhury *et al.* (2013) deconstruyó el modelo bioenergético base expuesto en el párrafo anterior desarrollando ecuaciones simplificadas e índices de cada uno de los requerimientos



fisiológicos planteados en la ecuación (6). Las ecuaciones desarrolladas se describen a continuación:

$$ER = (6.43 * P_f - 6.43 * P_i) \quad (7)$$

$$MB = [(-30.33 + 2.37 * T) * P_f^{0.80}] \quad (8)$$

$$ICA = [0.45 * (ER + MB)] \quad (9)$$

$$EU + EB = [0.057 * (ER + MB + ICA)] \quad (10)$$

### 6.5.1.5 Requerimientos de oxígeno en el sistema

Para el cálculo del requerimiento de oxígeno del sistema de producción se consideraron todos los elementos existentes en el sistema de producción que requieren de oxígeno para realizar sus funciones vitales. Para el caso particular del este trabajo se contemplaron los requerimientos teóricos de oxígeno de la biomasa total de peces producida hasta el momento de su cosecha, el sedimento y el plancton, además, de una saturación mínima de oxígeno inicial en el agua, dependiendo del tipo de sistema con el que se va a realizar el proceso de engorda, que les permita a los organismos llevar a cabo sus funciones metabólicas sin comprometer su estado de salud y supervivencia (Tabla 9).

**Tabla 9.** Parámetros de consumo de oxígeno de los elementos que conforman la producción de tilapia. Fuente: Valbuena y Cruz (2006); Boyd *et al.* (2018).

Elemento	Parámetro
Peces (kg O <sub>2</sub> /h/ton)	0.333
Plancton (kg O <sub>2</sub> /h/ha)	10
Sedimento (kg O <sub>2</sub> /h/ha)	3.5
Aguas verdes (mg O <sub>2</sub> /L)	3
TBF (mg O <sub>2</sub> /L)	6

Considerando lo anterior la demanda total de oxígeno en el sistema viene dada por la siguiente ecuación (Boyd *et al.*, 2018):

$$DO_{total} = DO_{pec} + DO_{planc} + DO_{sed} \quad (11)$$

Dónde  $DO_{total}$  es la demanda de oxígeno total en el sistema (kg O<sub>2</sub>/h),  $DO_{pec}$ ,  $DO_{planc}$  y  $DO_{sed}$  son la demanda de oxígeno de los peces, el plancton y el sedimento, respectivamente.

### 6.5.2 Submodelo de manejo

La selección del sistema de producción a implementar fue determinada por dos factores importantes: 1) la capacidad de inversión y 2) la demanda del producto. Estas consideraciones son clave al momento de decidir qué tipo de sistema implementar (AV o TBF) contemplando los requerimientos mínimos de tecnología, equipo, inversión, conocimiento y manejo para llevar el correcto funcionamiento de la granja, así como, garantizar la supervivencia de los organismos a producir.

#### 6.5.2.1 Aireación

Para el cálculo de la Eficiencia de la Aireación Actual (EAA) se utilizaron los valores teóricos base de la Eficiencia Estándar de Aireación (EEA) propuestos por Boyd y Pillai en 1985 y 1998 (Tabla 10).

**Tabla 10.** Mínima Eficiencia Estándar de Aireación (EEA) de los sistemas suplementarios de aireación más utilizados en la acuicultura. Fuente: Boyd y Pillai (1985); Boyd (1998).

Tipo de aireador	EEA (Kg O <sub>2</sub> /kW/h)
Aireador de paletas	2.1
Blower burbuja fina	1.2
Blower burbuja mediana	1
Blower burbuja grande	0.6
Venturi	1.2

Considerando las características ambientales y geográficas en cada una de las zonas y tipo de sistema de producción (AV y TBF) el EAA se estimó con la siguiente ecuación:

$$EAA = \left[ EEA * \frac{(\beta C_s - C_m)}{9.09} * 1.024^{T-20} \alpha \right] * Corr_{elev} \quad (12)$$

Dónde  $EAA$  es la eficiencia de aireación actual (kg O<sub>2</sub>/kW/h) ,  $EEA$  es la eficiencia estándar de aireación,  $C_s$  es la concentración de oxígeno a saturación determinada por la temperatura y la salinidad en el sistema,  $C_m$  es la concentración de oxígeno mínima requerida por el sistema de producción (AV = 3 mg/L; TBF = 6 mg/L),  $T$  es la temperatura del agua en el sistema,  $Corr_{elev}$  es un factor de corrección al equipo de aireación determinado por la altitud sobre el nivel del mar (msnm) y  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes teóricas (Boyd *et al.*, 2018).

Posteriormente, Para determinar la tasa de transferencia que tiene el equipo de aeración implementado se obtuvo mediante la ecuación:

$$TTOE = EAA * P \quad (13)$$

Dónde  $TTOE$  es la tasa de transferencia de oxígeno estándar (kg de O<sub>2</sub>/h) y  $P$  es la potencia del equipo de aireación en kW.

Dado que el productor requiere de información menos compleja para entender los requerimientos que necesita en su granja en materia de equipamiento también se determinó el número de aireadores y los caballos de fuerza (HP's) necesarios para el sistema, así como, la productividad (tons/HP) que aporta el sistema de aireación. Estos parámetros se determinaron a través de las siguientes ecuaciones:

$$N \text{ aireadores} = DO_{total}/TTOE \quad (14)$$

$$HP = N \text{ aireadores} * P \quad (15)$$

$$Productividad = \frac{B_{cos}}{HP} \quad (16)$$

Dónde  $N \text{ aireadores}$  es la cantidad de aireadores utilizados para oxigenar el agua,  $HP$  es la cantidad de caballos de fuerza utilizados para oxigenar el agua,  $P$  es la potencia en HP y  $B_{cos}$  es la biomasa cosechada al final del ciclo.

### 6.5.2.2 Biomasa

Para la determinación de la biomasa existente a través del tiempo se utilizó la siguiente expresión matemática:

$$B_t = N_t * Pp_t \quad (17)$$

Dónde  $B_t$  es la biomasa en el tiempo  $t$  y  $Pp_t$  es el peso promedio de los organismos en el tiempo  $t$ .

### 6.5.2.3 Cosecha

Una vez que se generaron los pesos aleatorios de una muestra poblacional de 100 individuos para determinar la heterogeneidad de pesos en el sistema al momento de la cosecha se procedió a clasificar a la población total de acuerdo a las siguientes clases:

**Tabla 11.** Estructura de clases por intervalos de pesos de cosecha de interés comercial.

Clase	Intervalo de peso (g)
1	> 600
2	500 - 599
3	400 - 499
4	300 - 399

El cálculo de la población cosechada existente por cada una de las clases de pesos se realizó mediante la ecuación:

$$N_{mCx} = \sum_{x=1}^n I_{mCx} \quad (18)$$

Dónde  $N_{mCx}$  es la población existente en cada una de las clases de pesos e  $I_{mCx}$  es el individuo que por su peso se cataloga en cada una de las clases de pesos.

En el caso de la biomasa cosechada por cada una de las clases de pesos se obtuvo con la ecuación:

$$B_{mCx} = \sum_{x=300}^n P_{indCx} \quad (19)$$

Dónde  $B_{mCx}$  es la biomasa en cada una de las clases de pesos y  $P_{indCx}$  es el peso individual de los individuos existentes en cada una de las clases de pesos superior a 300 g.

Ya determinada la población muestral existente en cada una de las clases se cuantificó la población total cosechada de conformidad a cada una de las clases con la siguiente ecuación:

$$N_{cos} = \frac{NmCx}{100} * Nt \quad (20)$$

Dónde  $N_{cos}$  es la población total cosechada y  $NmCx$  es la cantidad de individuos existente de cada una de las clases de pesos considerados a la cosecha.

Para el caso de la biomasa total cosechada considerando las diferentes clases de pesos superiores a 300 g se implementó la siguiente ecuación:

$$B_{cos} = \frac{B_{mCx}}{100} * Nt \quad (21)$$

Dónde  $B_{mCx}$  es la biomasa existente de cada clase considerando los pesos de cosecha.

#### 6.5.2.4 Cantidad de alimento, tasa de alimentación y Factor de Conversión Alimenticia

Con el cálculo de la cantidad de energía digestible requerida utilizando la ecuación (6) podemos calcular la cantidad de alimento a suministrar considerando los diferentes tipos de alimentos

utilizados dependiendo de la fase de crecimiento del organismo con la siguiente ecuación para el caso de sistemas con AV:

$$Alim_t = [(ED_{req}/(ED_{prot} + ED_{lip} + ED_{carb})) * FCA_{obs}] \quad (22)$$

Para el caso de un sistema de producción con TBF se implementó la siguiente ecuación:

$$Alim_t = [(ED_{req}/((ED_{prot} * 1.50) + ED_{lip} + ED_{carb})) * FCA_{obs}] \quad (23)$$

Dónde  $Alim_t$  es la cantidad de alimento a suministrar en el tiempo  $t$  por organismo,  $ED_{prot}$ ,  $ED_{lip}$  y  $ED_{carb}$  es la energía digestible en el alimento considerando los macronutrientes más representativos en los alimentos comerciales, proteína, lípidos y carbohidratos, respectivamente, (kJ/kg de alimento) y  $FCA_{obs}$  es el factor de conversión alimenticia observado que se utiliza como elemento de ajuste. La determinación de la cantidad de alimento total otorgada al sistema ( $Alim_{total}$ ) se cuantifico con la ecuación siguiente:

$$Alim_{total} = Alim_t * N_t \quad (24)$$

El cálculo de la tasa de alimentación se determina por la ecuación:

$$Pv = \frac{Alim_t * 100}{Pp_t} \quad (25)$$

Dónde  $Pv$  es el porcentaje de alimento que se le suministra por peso vivo del organismo.

El FCA es un parámetro importante dentro a la producción animal ya que este nos permite saber cuál es la cantidad de alimento que se requiere para producir 1 kg de carne. El cálculo de este parámetro de estima a partir de la expresión matemática:

$$FCA_f = Alim_{total}/B_{cos} \quad (26)$$

Dónde  $FCA_f$  es el factor de conversión alimenticia al final del ciclo.

#### 6.5.2.5 Cantidad de melaza

Considerando que para la generación de bioflóculos en TBF es necesario el agregado de un elemento rico en carbohidratos como es el caso de la melaza, el cálculo de la cantidad a agregar al sistema con TBF se realizó con la siguiente ecuación:

$$NAT_t = \frac{Prot_t}{100} * 0.16 * 0.8 * 0.8 * 0.9 * Alim_t * N_t \quad (27)$$

$$Melaza_t = NAT_t * Rel_{C:N}/0.2804 \quad (28)$$

Dónde  $NAT_t$  es nitrógeno amoniacal total en 1 kg de alimento otorgado al sistema en el tiempo  $t$ ,  $Prot_t$  es la cantidad de proteína contenida en el alimento que se ofrece a los organismos en el tiempo  $t$ , 0.16, 0.8, 0.8 y 0.9 son constantes (Timmons *et al.*, 2002),  $Melaza_t$  es la cantidad de melaza a aplicar en el sistema en el tiempo  $t$ ,  $Rel_{C:N}$  es la relación carbono nitrógeno establecida por el usuario en el modelo y 0.2804 es una constante (carbono de la melaza en masa seca).

#### 6.5.2.6 Recambios de agua

Para mantener una óptima calidad del agua utilizada en el sistema es necesario realizar recambios para garantizar parámetros idóneos de pH, NAT, temperatura, salinidad entre otros que garanticen el bienestar de los organismos. Para el cálculo de la cantidad de recambio de agua se implementó la siguiente ecuación considerando valores empíricos de 20% y 5%, AV y TBF respectivamente:

$$Vrec_t = V_{total} * Rec_t \quad (29)$$

Dónde  $Vrec_t$  es el volumen del recambio de agua en el tiempo  $t$ ,  $V_{total}$  es el volumen total del sistema de producción y  $Rec_t$  es la cantidad de recambio de agua considerado para el sistema en el tiempo  $t$ .

### 6.5.3 Submodelo económico

Todo proyecto de inversión se encuentra integrado por tres fases durante su etapa de vida:

**Fase 1.** Se contempla la inversión inicial total para arrancar el proyecto, en esta fase no se generan ingresos,

**Fase 2.** Se empiezan a generar los primeros indicios de producción y considerando la demanda del mercado sobre el producto producido podrían generarse los primeros ingresos y

**Fase 3.** Inicia una etapa de balance entre los costos y los ingresos permitiendo tener equilibrio económico.

Para el desarrollo del modelo bioeconómico fue pertinente considerar parámetros y criterios de rentabilidad atendiendo los siguientes supuestos:

1. Valor Presente Neto (VPN). Este parámetro nos permite conocer el valor “al día de hoy” de los flujos de efectivo generados por el proyecto durante el tiempo de evaluación. Si la inversión del proyecto es viable VPN será  $> \$0.00$
2. Tasa Interna de Retorno (TIR). Toda inversión realizada en un proyecto será viable si este parámetro es  $\geq$  a la tasa de descuento. La tasa de descuento utilizada en el modelo bioeconómico corresponde a la tasa de rendimiento que tienen los instrumentos de inversión denominados CETES (Certificados de la Tesorería de la Federación) a un año de operación.
3. Beneficio/Costo (B/C). Permite cuantificar la relación entre el costo por producir un bien y los beneficios obtenidos por la venta de este. Un B/C rentable es aquel que es  $> a 1$ .



La parametrización de los costos económicos realizados durante cada ciclo productivo que generan los escenarios evaluados con el modelo bioeconómico se utilizaron las siguientes ecuaciones para cada uno de los parámetros:

### 6.5.3.1 Costo por pie de cría

Se consideró la cantidad de peces a sembrar por ciclo proporcionada por el productor tomando en cuenta que esta cantidad se encuentre entre los intervalos de siembra propios de un sistema de producción intensiva que va de 10 a 30 org/m<sup>3</sup>. El costo por pie de cría se determinó con la siguiente expresión matemática:

$$CT_{crías} = D_i * V_{total} * C_{cría} \quad (30)$$

Dónde  $CT_{crías}$  es el costo total de las crías sembradas,  $D_i$  es la densidad inicial sembrada en el sistema de producción,  $V$  es el volumen del tanque o estanque y  $C_{cría}$  es el costo por cada unidad de organismo adquirido.

### 6.5.3.2 Costo por alimentación

Para el cálculo del costo total de alimentación por ciclo productivo se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$CT_{alim} = \sum_{t=1}^n Alim_t * Calim_t \quad (31)$$

Dónde  $CT_{alim}$  es el costo total por alimentación durante todo el ciclo y  $Calim_t$  es el costo del alimento comercial en sus diferentes etapas de desarrollo utilizado en el tiempo  $t$ .

### 6.5.3.3 Costo por aplicación de melaza

Este insumo solo tiene injerencia cuando en el sistema de producción a evaluar se implementa la TBF por lo que en el caso de AV se descarta este costo. Para la determinación del costo por la aplicación de este insumo se aplicó la siguiente ecuación:

$$CT_{melaza} = \sum_{t=1}^n Melaza_t * C_{melaza} \quad (32)$$

Dónde  $CT_{melaza}$  es el costo total de la melaza aplicada en el sistema durante el ciclo productivo y  $C_{melaza}$  es el costo en el mercado por kilogramos de melaza.

#### 6.5.3.4 Costo de energía eléctrica por aireación

Para cuantificar el costo por consumo energético para airear el sistema de producción se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$CT_{aireación} = \sum_{t=1}^n N \text{ aireadores} * P * h_t * C_{energía} \quad (33)$$

Dónde  $CT_{aireación}$  es el costo total por el uso de energía eléctrica para los sistemas de aireación,  $P$  es la potencia de los aireadores en kW,  $h_t$  es el número de horas que operan los aireadores en el tiempo  $t$  y  $C_{energía}$  es el costo de la energía por kW/h.

#### 6.5.3.5 Costo de energía eléctrica por recambios de agua

La determinación del costo por recambios de agua en el cultivo se determinó con la siguiente expresión matemática:

$$CT_{rec} = \sum_{t=1}^n V_{rec_t} * C_{energía} \quad (34)$$

Dónde  $CT_{rec}$  es el costo total de la energía eléctrica por bombeo de agua en el cultivo.

#### 6.5.3.6 Costos por cosecha

Para el momento de realizar la cosecha de los organismos al finalizar el ciclo es necesario el apoyo de personal externo lo que genera empleos temporales alternos a los que se tienen de manera fija en la granja. Para determinar el costo generado por cosecha en la granja se utilizó la siguiente ecuación:

$$CT_{cos} = B_{cos} * C/kg_{cos} \quad (35)$$

Dónde  $CT_{cos}$  es el costo total que se genera al realizar la cosecha del cultivo y  $C/kg_{cos}$  es el costo pagado por cada kilogramo cosechado.

### 6.5.3.7 Costo total

Ya que se determinaron cada uno de los costos realizados en la granja al momento de culminar el ciclo productivo es necesario cuantificar cual es el costo total realizado. La determinación de este consolidado de costos se efectuó mediante la ecuación:

$$C_{TOTAL} = CT_{crías} + CT_{alim} + CT_{melaza} + CT_{aireación} + CT_{rec} + CT_{cos} + CT_F + CT_V \quad (36)$$

Dónde  $C_{TOTAL}$  son los costos totales generados en el ciclo productivo,  $CT_F$  son los costos fijos totales y  $CT_V$  son los costos variables totales.

Para evaluar los beneficios económicos dentro del modelo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

### 6.5.3.8 Ingresos brutos

El cálculo de los ingresos brutos se realizó con la siguiente ecuación considerando las biomásas cosechadas en las diferentes clases de pesos mencionados en el apartado 6.5.2.3.

$$IB = \sum_{x=1}^4 B_{mCx} * C/kg_{Cx} \quad (37)$$

Dónde  $IB$  son los ingresos brutos y  $C/kg_{Cx}$  es el costo por kilogramo asignado a cada una de las clases de pesos cosechadas.

### 6.5.3.9 Utilidad bruta

Ya determinados los costos totales y los ingresos brutos es necesario calcular la utilidad bruta la cual se estimó con la ecuación siguiente:

$$UB = IB - C_{TOTAL} \quad (38)$$

Dónde  $UB$  es la utilidad bruta.

### 6.5.3.10 Depreciación

Para estimar la depreciación del equipamiento utilizado en los sistemas de producción se implementó un método lineal considerando como cero su valor de venta al finalizar su vida útil y se cuantifico con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{CI}{v} \quad (39)$$

Dónde  $D$  es la depreciación calculada,  $CI$  es el costo inicial del equipo y  $v$  es la vida útil considerada para el equipo.

### 6.5.3.11 Utilidad neta

Las utilidades netas (UN) resultantes en cada ciclo productivo se calcularon con base a la siguiente ecuación:

$$UN = UB - D \quad (40)$$

### 6.5.3.12 Parámetros de rentabilidad: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio/Costo (B/C)

Parametrizar los resultados obtenidos a través de un análisis económico utilizando como herramientas los indicadores de rentabilidad, considerando los diferentes escenarios evaluados por el modelo bioeconómico, nos permite tener referencias sobre el comportamiento de los egresos e ingresos a través del tiempo y durante la vida del proyecto.

Para evaluar los indicadores de rentabilidad (VPN, TIR y B/C) se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas:

$$VPN = -I \sum_{t=1}^5 \frac{FE_t}{(1+i)^t} \quad (41)$$

$$TIR = VPN = 0 \quad (42)$$

$$B/C = \frac{IB_{act}}{C_{TOTALact}} \quad (43)$$

Dónde  $VPN$  es el Valor Presente Neto,  $I$  es la inversión inicial,  $FE_t$  es el flujo de efectivo en el tiempo  $t$ ,  $i$  es la tasa de descuento indicando el costo de oportunidad del capital (CETES = 8.09%),  $TIR$  es la Tasa Interna de Retorno,  $B/C$  es el beneficio/costo,  $IB_{act}$  son los ingresos brutos actualizados y  $C_{TOTALact}$  son los costos totales actualizados.

### 6.5.4 Submodelo de riesgo

Es imperativo considerar que dentro de cualquier proyecto productivo no se tiene un control total sobre todas las condiciones que giran en torno a él. Evaluar el riesgo a través de metodologías como el Análisis de Sensibilidad o Análisis de Monte Carlo permite considerar

escenarios posibles que pueden presentar eventos no deseados o factores que se salen del control humano como: cambio de temperaturas, presencia de patógenos y variaciones en precios de compra y venta; mismos que pueden afectar a la inversión y por consecuencia implementar planes alternos para aprovechar al máximo los beneficios productivos y económicos que se puedan presentar según sea el caso o el escenario.

#### 6.5.4.1 Análisis de sensibilidad

Considerando lo anterior se determinó la generación de cuatro escenarios bases en los que se consideraron los diferentes tipos de producción (AV y TBF) y distintas zonas geográficas (Aguascalientes y Sinaloa). Los resultados obtenidos se pusieron a prueba ante variaciones de escenarios a través de un análisis de sensibilidad.

Para lograr estas variaciones se consideraron los factores que presentan mayor influencia en los beneficios del proceso productivo, además, de considerar que estos factores seleccionados son parámetros que se salen del control humano en su mayor parte. Los resultados bases se hicieron variar de acuerdo con diferentes supuestos en el comportamiento del sistema considerando variaciones en la temperatura, mortalidad, inflación y variación en el precio de venta de acuerdo a la tabla 12:

**Tabla 12.** Parámetros de cambios implementados para la generación de escenarios a evaluar.

Parámetro	Escenario base				Análisis de sensibilidad	
	Granja A	Granja A	Granja B	Granja B	Granja A	Granja B
Tipo de producción	AV	TBF	AV	TBF	AV/TBF	AV/TBF
Inflación anual	5%		5%		10%	
Temperatura media del ciclo productivo (°C)	25.87	25.87	30.20	30.20	± 2	
Mortalidad	20%	10%	20%	10%	±50%	
Precio por kg de organismos > 500 g	\$45.00	\$45.00	\$45.00	\$45.00	±10%	
Precio por kg de organismos 400 a 499 g	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	±10%	
Precio por kg de organismos 300 a 399 g	\$30.00	\$30.00	\$30.00	\$30.00	±10%	

Para contrastar los resultados obtenidos en los diferentes escenarios generados y evaluados se utilizaron los estimadores de rentabilidad VPN, TIR y B/C, así como, la producción anual (tons/año) y la duración del ciclo de producción.

#### **6.5.4.2 Análisis de Monte Carlo**

Con la finalidad de analizar la variabilidad estocástica de los resultados económicos y de rentabilidad obtenidos por el modelo bioeconómico desarrollado se realizaron simulaciones de Monte Carlo a los cuatro escenarios base mediante la extensión de Excel Crystal Ball (periodo de prueba) a través de 10,000 simulaciones. Para la transformación de los valores calculados en variables aleatorias se utilizó la distribución de PERT (Vose, 2001) considerando como valores promedio o más probables aquellos que fueron estimados por el modelo bioeconómico por concepto de ingresos generados por la venta del producto, la inversión en infraestructura y equipo, el costo de producción y la utilidad bruta. Los valores mínimos y máximos se estimaron a través de un incremento y decremento del 10% sobre el valor calculado de estos parámetros, este porcentaje se seleccionó considerando un valor redondeado de la tasa de inflación anual máxima (año 2000 = 8.9%) que ha tenido México en un periodo de 22 años de acuerdo a datos históricos del Gobierno de México valor que para el año 2022 estuvo cercano por alcanzar (8.7%). Una vez estimado los valores mínimos, promedio y máximo se procedió a cargar la información en el entorno Crystal Ball mediante una distribución triangular considerando como indicadores meta el VPN, la TIR y el B/C.

#### **6.5.5 Información de salida para el productor**

Como bien se ha mencionado durante el desarrollo del presente trabajo gran parte del propósito y visión de desarrollar el modelo bioeconómico y llevar a cabo la evaluación bioeconómica de la producción de tilapia en diversos sistemas de cultivo es el de poder facilitarle información detallada, precisa y de fácil entendimiento al productor, quien es la población objetivo de este trabajo.

Con la finalidad de facilitar todo este macro universo de información y datos numéricos a los productores se elaboró un formato a manera de resumen de salida de datos que comprende información productiva, económica, financiera y de viabilidad el cual se puede apreciar en el anexo A del documento.

Con esta información resumida el productor cuenta con datos certeros del desarrollo bioeconómico de su cultivo y con los cuales podrá tomar decisiones de tipo gerencial para aplicar acciones que le permitan aprovechar al máximo su inversión y prevenir posibles escenarios pesimista.



## 7. RESULTADOS

El modelo bioeconómico desarrollado representa una herramienta de gran utilidad para evaluar diversos sistemas de producción en distintas zonas geográficas de México, ya que presenta una gran plasticidad a la información de entrada que proporciona el usuario por lo que se presentan mínimos límites teóricos.

La selección de los escenarios a evaluar fueron estipulados en función de obtener los máximos beneficios económicos para el sistema y el usuario por lo que en los escenarios bases se contempló el mes de abril como mes de cosecha de los organismos, considerando que en este mes se encuentra presente la celebración en México de la Semana Santa, temporada que por costumbre en la idiosincrasia de México en cuestión de mercadeo existe una alta demanda del producto evaluado.

### 7.1 Submodelo biológico

Dentro del modelo bioeconómico en acuicultura el modelo de crecimiento constituye la parte medular. Empleando las ecuaciones (1) y (2) se pronosticó el comportamiento del crecimiento en peso de los organismos, considerando la temperatura media del agua durante el ciclo productivo existente en la zona y la información más común con la que cuentan los productores (peso de siembra, peso de cosecha y duración del ciclo de engorda).

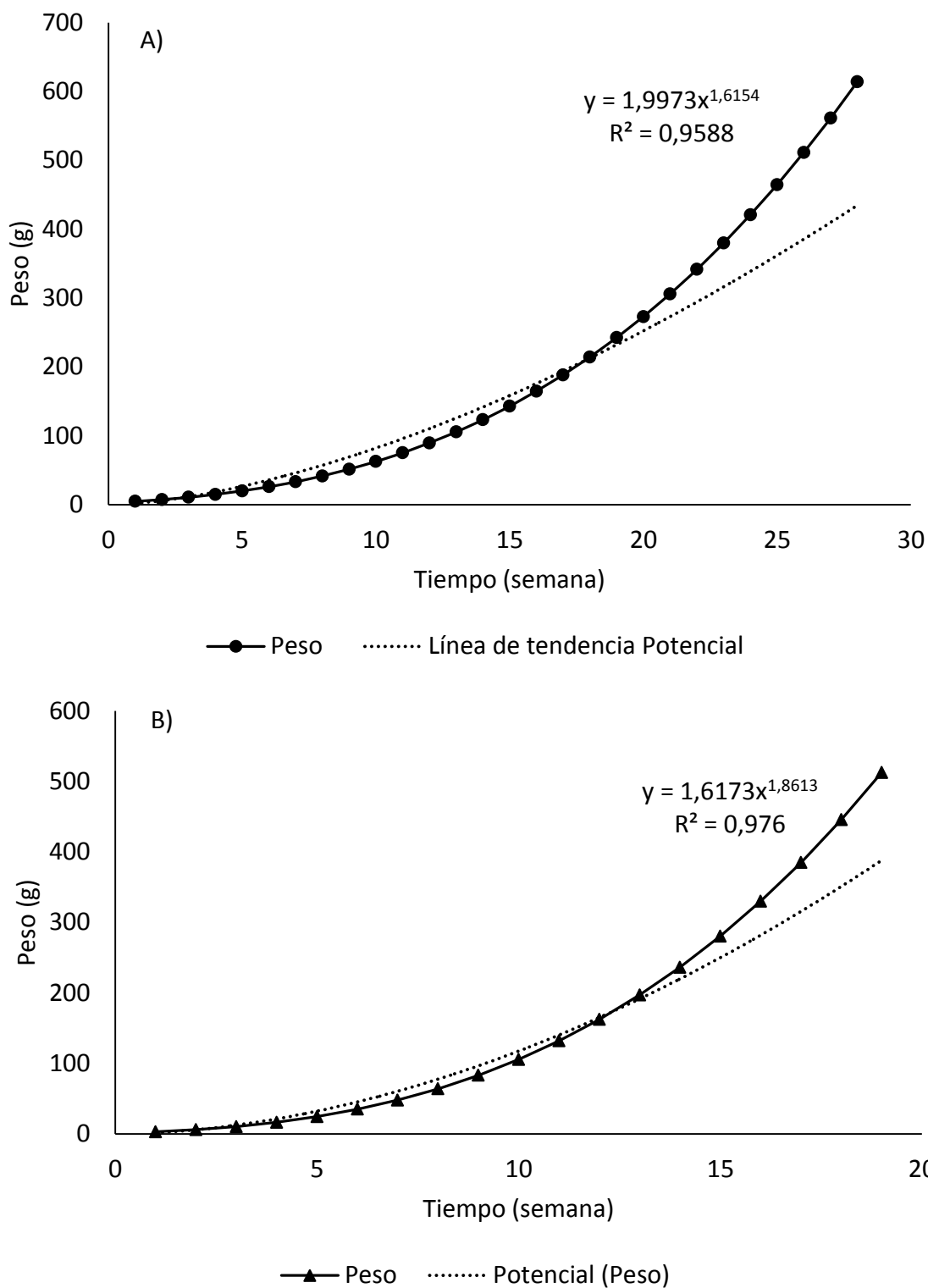
Como se ha mencionado con anterioridad la característica ectotérmica de las tilapias es una condición ecofisiológica imperativa por considerar ya que la temperatura del agua en el sistema es un factor que tiene influencia en los requerimientos y procesos metabólicos en la transformación y digestibilidad del alimento, así como, en el estrés que se puede generar al no presentar temperaturas idóneas para su desarrollo provocando decaimientos en el rendimiento en biomasa de los organismos.

Considerando lo anterior, se determinó un CTC para cada una de las zonas evaluadas, tomando en cuenta el origen de los datos de cada granja. Se obtuvo un valor promedio de que con 0.02413, un mínimo de 0.02400 (Granja B – datos observados) y un máximo de 0.02425 (Granja A – datos pronosticados) (Tabla 13). En el caso de la Granja A se presentó una  $R^2$  de 0.9752 y en el caso de la Granja B una  $R^2$  de 0.9848 (Fig. 8).

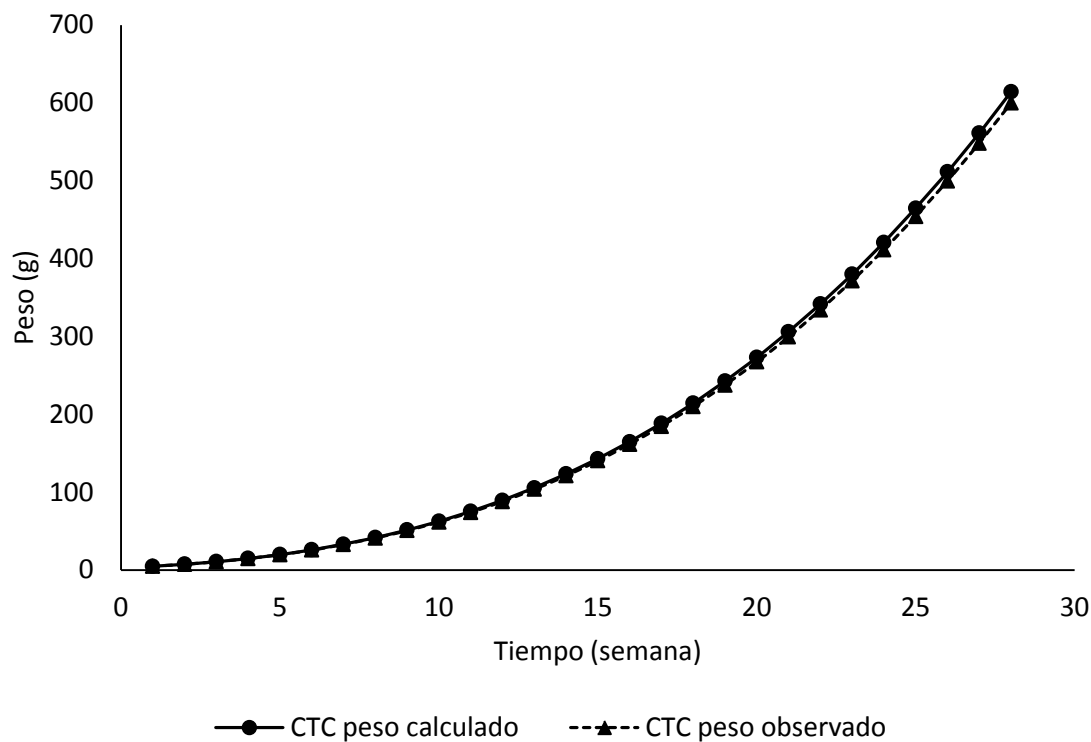
A través del coeficiente de correlación de Pearson se pudo estimar un valor de 1 entre el comportamiento del crecimiento en peso de ambos CTC, mostrando una correlación positiva con alta asociación lo que permitió validar el modelo matemático utilizado para pronosticar el peso destacando la alta afinidad entre los pesos observados y pronosticados (Fig. 9).

**Tabla 13.** Datos de entrada y determinación del CTC de cada zona geográfica.

Parámetro/Origen de los datos	Granja A	Granja B
Peso de siembra (g)	5	3.06
Peso meta de cosecha (g)	600	512.32
Peso de cosecha pronosticado (g)	614.08	512.32
°T media diaria en el ciclo (°C)	25.87 (±1.03)	30.66 (±1.05)
Ganancia de peso diario (g)	3.22	4.04
°T efectiva de desarrollo (°C)	10.37	15.16
Duración del ciclo (semanas)	27	18
CTC	0.02425	0.02400
CTC promedio		0.02413
Desviación estándar		±0.0002
Correlación de Pearson		1



**Figura 8.** A) Comportamiento del crecimiento en peso de los organismos con datos pronosticados con CTC de 0.02425 a una temperatura de  $25.87 \pm 1.03$  °C; B) Comportamiento del crecimiento en peso de los organismos con datos observados con CTC de 0.02400 a una temperatura de  $30.66 \pm 1.05$  °C.



**Figura 9.** Curva de crecimiento de *Oreochromis niloticus* a una temperatura media de  $25.87 \pm 1.03$  °C con CTC pronosticado en comparativa al crecimiento en peso CTC observado, Coeficiente de Pearson = 1.

Para no sobreestimar el crecimiento de los organismos en el sistema, y considerando la alta afinidad entre los datos observados y los pronosticados, se seleccionó el CTC mínimo (0.02400) para la predicción del crecimiento de los organismos.

En la tabla 14 se destacan los principales supuestos biológicos generados por el submodelo biológico. El peso promedio de siembra y cosecha asignado es un dato de entrada estimado por el usuario de la aplicación y los pesos de cosecha pronosticados son los determinados en cada escenario por el modelo de crecimiento aplicado en el modelo bioeconómico.

El coeficiente de variación en la heterogeneidad de pesos a la cosecha entre ambas zonas geográficas presenta una diferencia de un punto porcentual, de acuerdo al muestreo aleatorio y a la ecuación (4). En el caso de la energía digestible requerida total, se manejó el supuesto de que el crecimiento de los organismos es el mismo tanto en AV como en TBF con una ganancia en peso diaria de 3.31 y 4.77 g/día, respectivamente, sin embargo, el factor de impacto entre

ambos sistemas de producción recae en la aportación de proteína *in situ* disponible en el sistema por parte de la TBF (50%). El cálculo de la demanda total de oxígeno en el sistema recae en el entendido de que esta estimación se realizó considerando la biomasa total cosechada en el sistema.

**Tabla 14.** Comparativa de los parámetros más importantes de cada escenario y tipo de producción del submodelo biológico.

Parámetro/Escenario	Granja A		Granja B	
	AV	TBF	AV	TBF
Peso promedio de siembra asignado (g)	5.00	5.00	5.00	5.00
Peso promedio de cosecha asignado (g)	600	600	600	600
Peso promedio de cosecha pronosticado (g)	654.47	654.47	673.35	673.35
Cambio en peso (g/día)	3.31	3.31	4.77	4.77
Coefficiente de variación	24%	24%	25%	25%
Energía Digestible Requerida total (kJ/org)	7,350.48	7,350.48	7,708.22	7,708.22
Cantidad de alimento total consumido (g/org)	721.41	601.02	756.70	630.73
Demanda total de O <sub>2</sub> en el sistema (kg O <sub>2</sub> /h)	17.65	39.44	17.96	40.38

## 7.2 Submodelo de manejo

Los resultados obtenidos por el submodelo de manejo se muestran en la Tabla 15. Con estos resultados se puede apreciar el potencial que presenta los sistemas con TBF en comparativa con los AV.

Los sistemas con TBF en contraste con los sistemas con AV, permitieron obtener hasta un 70% más de organismos y biomasa cosechada, disminuyendo hasta en 91.20% promedio la mortalidad existente en el sistema y ahorrando hasta un 23.16% en el alimento consumido. Otro beneficio sustancial de los sistemas con TBF es el ahorro de hasta el 175% en el consumo de agua y en el uso de energía eléctrica por concepto de recambios respecto a AV. Por otro lado, los sistemas con TBF requirieron un mayor consumo energético por concepto de aireación suplementaria, el cual llegó a ascender hasta un 92% en comparación con AV en ambas zonas geográficas.

En la comparativa entre granjas y mismos sistemas de producción la zona geográfica de Sinaloa, en la que se encuentra la Granja B, presentó mejores cualidades productivas dentro de las simulaciones. Esta zona se destaca por presentar un promedio de 4.5% más de organismos

cosechados, lo cual se refleja en el 7.18% promedio de la biomasa cosechada, así como en la disminución de hasta de un 37.9% en la mortalidad y un ahorro del 0.52% en el consumo de alimento.

Considerando que en la zona de Sinaloa existe una mayor temperatura en el agua durante el ciclo de producción (4°C aproximadamente) respecto a Aguascalientes, los ciclos productivos en esta zona son de 20 semanas para llegar al peso meta establecido (600 g) en comparación a las 28 semanas que se requieren para llegar a este mismo peso en la zona de Aguascalientes. Esta situación la da una ventana de oportunidad a la zona de Sinaloa de implementar hasta tres ciclos al año, en comparación a los dos ciclos que puede realizar Aguascalientes. El consumo energético, considerando los ciclos más cortos en Sinaloa, en esta zona se ve beneficiado con un ahorro promedio del 26% y el 71.23% por concepto de bombeo de agua y aireación suplementaria, respectivamente.

**Tabla 15.** Comparativa de los parámetros de manejo aplicados en cada escenario y tipo de producción utilizados en el submodelo de manejo.

Parámetro/Escenario	Granja A		Granja B	
	AV	TBF	AV	TBF
Organismos sembrados	50,000	150,000	50,000	150,000
Organismos cosechados	40,311	134,685	42,870	138,894
Volumen (m <sup>3</sup> )	5,000	5,000	5,000	5,000
Densidad (org/m <sup>3</sup> )	10	30	10	30
Mortalidad	19.38%	10.21%	14.26%	7.40%
Supervivencia	80.62%	89.79%	85.74%	92.60%
Biomasa cosechada por ciclo (kg)	26,382.72	88,147.70	28,866.80	93,524.88
FCA	1.17	0.95	1.17	0.96
Productividad en la cosecha (kg/m <sup>3</sup> )	5.28	17.63	5.77	18.70
Duración de ciclo (semanas)	28	28	20	20
Ciclos al año	2	2	3	3
Consumo de agua por recambios (m <sup>3</sup> )	33,000	12,000	25,000	10,000
Consumo de energía eléctrica por bombeo de agua (kW)	1,854.45	674.34	1,404.88	561.95
Consumo de energía eléctrica por aireación (kW)	46,440.67	593,442.90	27,040.60	347,609.15
Productividad del sistema de aireación (ton/HP)	1.03	0.54	1.36	0.69
Fuente de carbono	Melaza	Melaza	Melaza	Melaza
Relación C:N	-	10:1	-	10:1

### 7.3 Submodelo económico

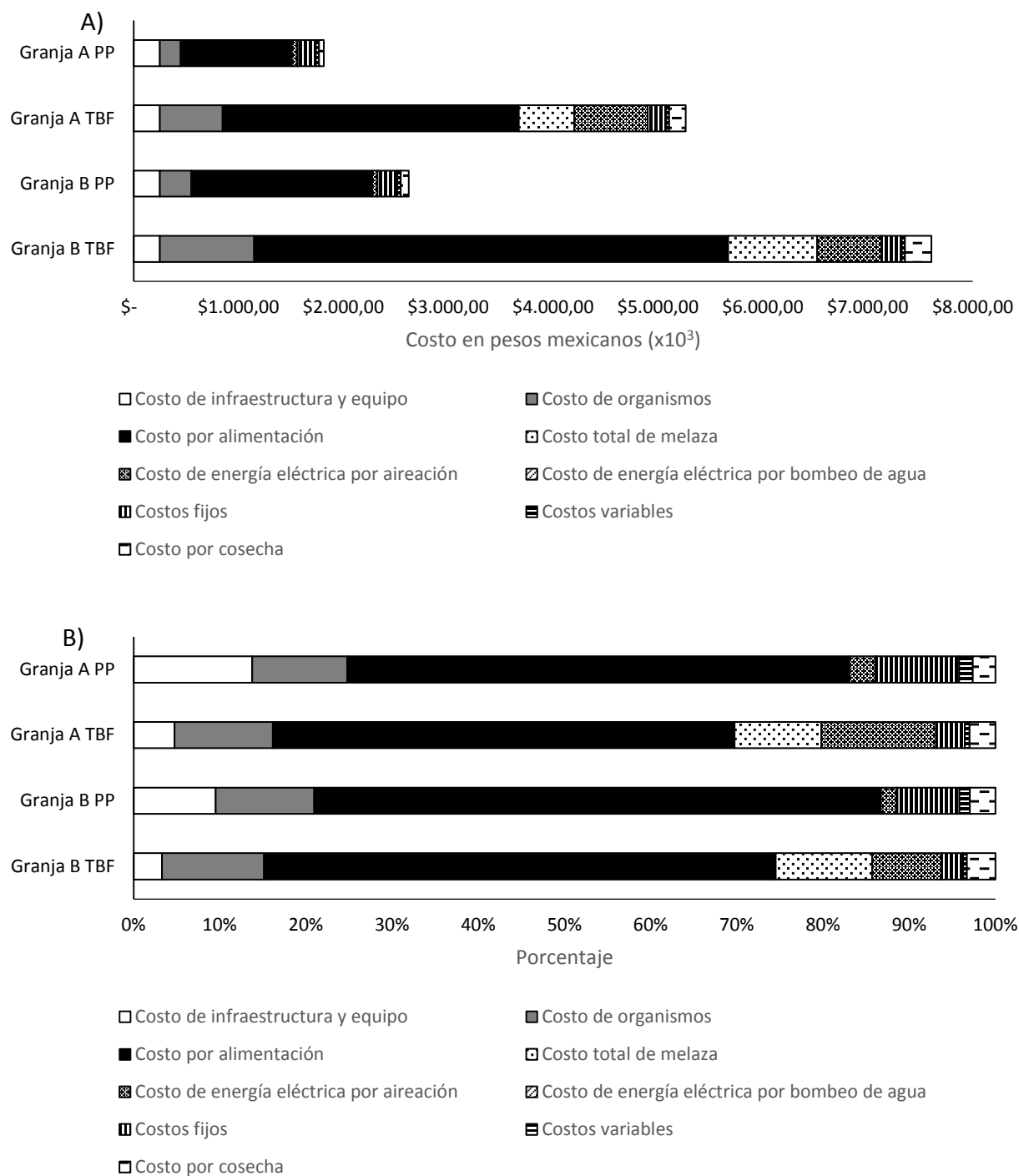
Dentro del este submodelo se consideraron los costos de inversión necesarios para dar inicio al sistema de producción en cuales quiera de sus fases, nuevo proyecto o en ejecución. Estos costos de inversión inicial vienen erogados por la inversión en infraestructura y equipo, capital de trabajo, costos fijos y costos variables correspondientes para el año 1 de operación (Tabla 16). Para el caso de los sistemas AV se tiene una inversión inicial promedio de \$2,219,330.31 considerando ambas zonas y para el caso de TBF una inversión de \$6,435,469.16 bajo la misma consideración.

**Tabla 16.** Costos de inversión desglosados para cada uno de los escenarios y tipos de producción base en Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).

Concepto/Escenario	Granja A AV	Granja A TBF	Granja B AV	Granja BTBF
Costo de infraestructura y equipo	\$ 250,000.00	\$ 250,000.00	\$ 250,000.00	\$ 250,000.00
Costo de organismos	\$ 200,000.00	\$ 600,000.00	\$ 300,000.00	\$ 900,000.00
Costo por alimentación	\$ 1,057,062.59	\$ 2,821,745.78	\$ 1,725,332.02	\$ 4,517,751.65
Costo total de melaza	\$ -	\$ 530,139.73	\$ -	\$ 849,296.89
Costo de energía eléctrica por aireación	\$ 54,799.99	\$ 700,262.63	\$ 47,861.87	\$ 615,268.20
Costo de energía eléctrica por bombeo de agua	\$ 2,188.25	\$ 795.73	\$ 2,486.64	\$ 994.66
Costos fijos	\$ 174,000.00	\$ 174,000.00	\$ 189,000.00	\$ 189,000.00
Costos variables	\$ 29,000.00	\$ 29,000.00	\$ 31,500.00	\$ 31,500.00
Costo por cosecha	\$ 47,488.90	\$ 158,665.86	\$ 77,940.36	\$ 252,517.19
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1,814,539.72</b>	<b>\$ 5,264,609.73</b>	<b>\$ 2,624,120.89</b>	<b>\$ 7,606,328.59</b>

En la Figura 10 (A) se presenta la distribución de los costos de inversión dentro del total a invertir en el proyecto y en la Figura 10 (B) el porcentaje de participación que tiene cada uno de los conceptos implementados en la inversión inicial. La mayor proporción de la inversión recae en el costo por alimentación (hasta 60% en TBF y 66% en AV), seguida por el costo por la adquisición de los organismos (promedio de 11.4% en ambas zonas y ambos sistemas). Con el uso de la TBF es posible disminuir hasta en un 10.7% los costos de por alimentación, aunque se deben de considerar como inversión prioritaria el uso de melaza y de un mayor gasto en energía

eléctrica (10.6% y 10.7% promedio en ambas zonas, respectivamente), situación que no sucede en el uso de sistemas con AV.



**Figura 10.** A) Desglose de la inversión inicial en cada uno de los escenarios base desarrollados; B) Porcentaje de participación de los conceptos de inversión en cada escenario base evaluado en las zonas geográficas de Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Vedes (AV).



Considerando que dentro de la evaluación bioeconómica se contempló una temporalidad de duración del proyecto de cinco años, en los cuales se realizaron reinversiones para la continuidad de las actividades, y un análisis de impacto para poder determinar indicadores de rentabilidad (VPN, TIR y B/C), en las Tablas 17 y 18 se pueden apreciar los principales resultados de reinversión, ingresos, utilidades netas y costo por kilogramo producido.

De acuerdo con estos resultados se logró determinar que el uso de TBF representa mejores condiciones económicas aun considerando que bajo la aplicación de este sistema la inversión es mayor. TBF presenta una disminución considerable en el costo por kilogramo producido, con un ahorro del 6% en ambas zonas geográficas. Por otro lado, la zona geográfica de Sinaloa presenta un ahorro del 8% en el costo por kilogramo producido en ambos tipos de producción, en comparativa con la zona geográfica de Aguascalientes.

**Tabla 17.** Conceptos financieros de mayor importancia en cada escenario base evaluado en la Granja de Aguascalientes (A) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).

Escenario Concepto	Granja A AV		Granja A TBF	
	Promedio anual	Desviación estándar	Promedio anual	Desviación estándar
Costo total de la inversión	\$ 1,779,013.92	±\$ 98,538.94	\$ 5,591,776.84	±\$ 359,372.61
Costo por kilo producido	\$ 33.72	±\$ 1.87	\$ 31.72	±\$ 2.04
Ingresos por ventas	\$ 2,330,124.48	±\$ -	\$ 7,785,213.97	±\$ -
Depreciación	\$ 55,256.31	±\$ 4,260.08	\$ 55,256.31	±\$ 4,260.08
Utilidad neta	\$ 495,854.25	±\$ 101,028.60	\$ 2,138,180.81	±\$ 363,524.47

**Tabla 18.** Conceptos financieros de mayor importancia en cada escenario base evaluado en la Granja de Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).

Escenario Concepto	Granja B AV		Granja B TBF	
	Promedio anual	Desviación estándar	Promedio anual	Desviación estándar
Costo total de la inversión	\$ 2,673,703.32	±\$ 149,059.95	\$ 8,179,671.83	±\$ 555,583.61
Costo por kilo producido	\$ 30.87	±\$ 1.72	\$ 29.15	±\$ 1.98
Ingresos por ventas	\$ 3,717,031.12	±\$ -	\$ 12,042,723.62	±\$ -
Depreciación	\$ 55,256.31	±\$ 4,260.08	\$ 55,256.31	±\$ 4,260.08
Utilidad neta	\$ 988,071.49	±\$ 152,654.58	\$ 3,807,795.48	±\$ 559,798.57

Estos porcentajes de ahorro, aunque aparentemente son pequeños, representan un gran impacto en los indicadores de rentabilidad. En el indicador TIR esta pequeña variación en el precio de producción por kilogramo representa el obtener un promedio de  $\pm 10$  puntos porcentuales en comparativa entre zonas geográficas y tipos de sistemas de producción, además, de representar el ganar o perder hasta \$0.08 en el indicador de B/C (Tabla 19).

**Tabla 19.** Indicadores de rentabilidad generados en cada escenario base en la Granja de Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con la implementación de Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV) con el modelo bioeconómico.

Parámetro/Escenario	Granja A		Granja B	
	AV	TBF	AV	TBF
VPN	\$ 1,553,760.19	\$ 6,766,389.32	\$ 3,193,459.24	\$ 12,467,827.62
TIR	32.04%	42.84%	41.40%	52.05%
B/C	\$ 1.21	\$ 1.29	\$ 1.28	\$ 1.36

#### 7.4 Análisis de sensibilidad

Los resultados de las 56 simulaciones realizadas (4 bases y 52 de análisis de sensibilidad) se pueden apreciar con mayor de talle en el Anexo B en el cual se destacan los factores de cambios más representativos y que se consideraron para identificar aquellos que presentan un mayor impacto tanto positivo como negativo frente a los escenarios base.

Con el análisis de sensibilidad se pudo determinar que la Granja A, ubicada en la zona geográfica de Aguascalientes, presenta mayor sensibilidad de cambio positivo en los escenarios AV y TBF, considerando una inflación del 5%, ante variaciones de incremento en el precio de venta por kilogramo (+10% sobre el precio base) afectando considerablemente al submodelo económico y a los indicadores de VPN, TIR y B/C (Tabla 20). Este aumento en el precio logra incrementar en un 58% el valor del VPN, 13 puntos porcentuales la TIR y en \$0.12 el B/C sobre el escenario base de AV y para el caso de TBF 45%, 15 puntos porcentuales y \$0.13, respectivamente.

Por otro lado, la disminución de la temperatura en el agua ( $-2$  °C sobre la temperatura base) es el factor de cambio negativo más representativo (Tabla 20), este factor tiene gran impacto en los submodelos de manejo y biológico incidiendo en los indicadores de VPN, producción y duración del tiempo del ciclo productivo. Para el caso de AV hay una disminución de un 67% en el VPN, un 55% menos de producción y un incremento en la duración del ciclo de 28 a 34

semanas. En TBF el VPN decrece un 55%, la producción decae 53% y hay un aumento de 6 semanas más en el ciclo de producción.

**Tabla 20.** Principales factores de cambio en la Granja A (Aguascalientes) bajo sistemas de producción con Tecnología Biofloc (TBF y Aguas Verdes (AV) considerando una inflación anual de 5%.

<b>Granja A AV y TBF con 5% de inflación anual</b>		
<b>Indicador</b>	<b>Factor de cambio positivo</b>	<b>Factor de cambio negativo</b>
VPN	+ Precio/kg	- Temperatura del agua
TIR	+ Precio/kg	- Precio/kg
B/C	+ Precio/kg	- Precio/kg
Producción (tons/año)	- Mortalidad	- Temperatura del agua
Tiempo del ciclo (semanas)	+ Temperatura del agua	- Temperatura del agua

Considerando una inflación anual del 10% dentro del análisis de sensibilidad los factores de cambio positivos y negativos más representativos son el aumento y decremento en el precio de venta del producto ( $\pm 10\%$ ), respectivamente. Estos cambios afectan directamente al submodelo económico presentando cambios significativos en los indicadores de rentabilidad (VPN, TIR y B/C) de la Granja A tanto en AV como en TBF (Tabla 21). En el caso de AV el aumento o disminución en un  $\pm 10\%$  en el precio de venta impacta en un  $\pm 106\%$  los VPN, en un  $\pm 14$  puntos porcentuales las TIR y en  $\pm \$0.11$  los B/C mostrando una rentabilidad inferior a la tasa de referencia o de descuento (CETES a un año 8.9%) en el escenario con disminución del 10% sobre los precios de venta base (VPN  $-\$54,738.33$ , TIR 80.08% y B/C  $\$0.99$ ). Para los escenarios de TBF los VPN presentaron variaciones en  $\pm 67\%$ , las TIR  $\pm 16\%$  y los B/C  $\pm \$0.12$ .

**Tabla 21.** Principales factores de cambio en la Granja A (Aguascalientes) bajo sistemas de producción con Tecnología Biofloc (TBF y Aguas Verdes (AV) considerando una inflación anual de 10%.

<b>Granja A AV y TBF con 10% de inflación anual</b>		
<b>Indicador</b>	<b>Factor de cambio positivo</b>	<b>Factor de cambio negativo</b>
VPN	+ Precio/kg	- Precio/kg
TIR	+ Precio/kg	- Precio/kg
B/C	+ Precio/kg	- Precio/kg
Producción (tons/año)	- Mortalidad	- Temperatura del agua
Tiempo del ciclo (semanas)	+ Temperatura del agua	- Temperatura del agua

Para el caso de la Granja B, ubicada en la zona geográfica de Sinaloa, los factores de cambio con mayor representatividad son las variaciones en los precios de venta ( $\pm 10\%$ ), estas variaciones impactan al submodelo económico y a los indicadores de rentabilidad tanto en AV como en TBF (Tabla 22) considerando los escenarios de ambos porcentajes de inflación anual (5% y 10%). AV presento variaciones de  $\pm 45\%$ ,  $\pm 15$  puntos porcentuales y  $\pm \$0.13$  en VPN, TIR y B/C, respectivamente, considerando una inflación anual del 5%. Para el caso de escenarios con una inflación anual del 10% los valores de VPN, TIR, y B/C oscilaron en  $\pm 68\%$ ,  $\pm 15$  puntos porcentuales y  $\pm \$0.12$ , respectivamente.

TBF mostró comportamientos muy similares a AV, dentro de la Granja B, expresando valores de  $\pm 38\%$  en VPN,  $\pm 16$  puntos porcentuales en TIR y  $\pm \$0.14$  en B/C dentro de los escenarios con una inflación anual del 5%. Por otro lado, dentro de escenarios con una inflación anual del 10% los valores de VPN, TIR y B/C fueron de  $\pm 51\%$ ,  $\pm 17$  puntos porcentuales y  $\pm \$0.12$ , respectivamente.

**Tabla 22.** Principales factores de cambio en la Granja B (Sinaloa) bajo sistemas de producción con Tecnología Biofloc (TBF y Aguas Verdes (AV) considerando tasas de inflación anual de 5% y 10%.

Granja B AV y TBF con 5% y 10% de inflación anual		
Indicador	Factor de cambio positivo	Factor de cambio negativo
VPN	+ Precio/kg	- Precio/kg
TIR	+ Precio/kg	- Precio/kg
B/C	+ Precio/kg	- Precio/kg
Producción (tons/año)	- Mortalidad	- Temperatura del agua
Tiempo del ciclo (semanas)	+ Temperatura del agua	- Temperatura del agua

Finalmente, los factores - mortalidad (- 50%), - temperatura (- 2 °C) y + temperatura (+ 2 °C) presentan gran incidencia en el submodelo de manejo. Con la disminución de la mortalidad se logra aumentar la producción en 8% para el caso de AV y en 4% para el caso de TBF. La variación en la temperatura ( $\pm 2$  °C) repercute considerablemente en la duración del ciclo productivo en  $\pm 3$  semanas y en el escenario de disminuir 2 °C la temperatura del agua en el sistema la producción decae 35% y 36% en TBF y AV, respectivamente.

## 7.5 Análisis de Monte Carlo

Se realizaron 10,000 simulaciones para cada uno de los escenarios base (Anexo C) pudiéndose observar los resultados obtenidos en estas simulaciones en la Tabla 23. Los resultados muestran que ante la estocasticidad los diferentes escenarios presentan resultados favorables para el decisor con un 95 por ciento de confianza destacando que:

1. Los VPN's de los escenarios se encuentran de manera superior al \$ 1,000,000.00 fluctuando entre  $\pm 27\%$  y  $\pm 17\%$  como máximo y mínimo, respectivamente, en comparación a los valores calculados.
2. Las TIR's se encuentra superiores a la tasa de referencia (8.90% CETES a 1 año) con fluctuaciones de  $\pm 11\%$  en cada uno de los escenarios en comparación e los valores calculados.
3. Por otro lado, el indicador B/C se encuentra por arriba de \$ 1.00 en todos los escenarios lo cual, nos permite observar la recuperación de la inversión además de obtener beneficios en el proyecto, este indicador presento variaciones de  $\pm 5\%$  en cada uno de los escenarios en referencia a los valores calculados.

**Tabla 23.** Resultados generados por el análisis de Monte Carlo en 10,000 simulaciones por escenario base para las Granjas de Aguascalientes (A) y Sinaloa (B) con Tecnología Biofloc (TBF) y Aguas Verdes (AV).

Escenario	Certeza	Indicador	Valor mínimo	Valor calculado	Valor máximo
Granja A AV	95%	VPN	\$ 1,138,038.04	\$ 1,553,760.19	\$ 1,969,231.58
		TIR	28.56%	32.04%	35.72%
		B/C	\$ 1.15	\$ 1.21	\$ 1.27
Granja A TBF	95%	VPN	\$ 5,407,422.96	\$ 6,766,389.32	\$ 8,125,204.50
		TIR	38.64%	42.84%	47.57%
		B/C	\$ 1.22	\$ 1.29	\$ 1.35
Granja B AV	95%	VPN	\$ 2,541,722.69	\$ 3,193,459.24	\$ 3,850,009.23
		TIR	37.40%	41.40%	45.86%
		B/C	\$ 1.22	\$ 1.28	\$ 1.35
Granja B TBF	95%	VPN	\$ 10,378,073.58	\$ 12,467,827.62	\$ 14,553,390.21
		TIR	47.07%	52.05%	57.57%
		B/C	\$ 1.29	\$ 1.36	\$ 1.43

## **8. DISCUSIÓN**

A través del presente trabajo se ha profundizado sobre la importancia de los modelos bioeconómicos como una herramienta de gran utilidad e importancia para parametrizar los posibles resultados obtenidos durante el desarrollo de un proyecto acuícola. Con estos resultados es posible disminuir el sentido de incertidumbre que puede tener un productor sobre el éxito, fracaso o consolidación de su inversión, ya que a través de los resultados obtenidos es posible tomar decisiones previas a la puesta en marcha de un proyecto productivo.

El modelo bioeconómico presenta una gran adaptabilidad a dos zonas que contrastan considerablemente en cuestiones ambientales y geográficas, así como a dos tipos de sistemas de producción que se caracterizan por tener manejos muy específicos y particulares y que son de los más implementados en por las granjas productoras de tilapia en México.

Es imperativo destacar que el uso de un software de fácil acceso y dominio, como es el caso de Microsoft Excel<sup>®</sup>, representa una fácil distribución y entendimiento del modelo bioeconómico desarrollado por parte de del usuario final, ya que este no requiere una alta especialidad en su manejo además de ser un elemento básico de la gran mayoría de equipos de cómputo.

Las simulaciones desarrolladas por el modelo bioeconómico sugieren que la implementación de TBF destaca por presentar mejores resultados productivos y económicos frente a AV en ambas zonas geográficas y esto se debe a que la aplicación de esta estrategia biotecnológica permite intensificar el sistema de producción hasta el punto de aprovechar al máximo la capacidad instalada de la granja. Aunque el uso de un sistema con TBF requiere de una mayor inversión, en comparativa a AV, esta inversión se ve mitigada por la alta productividad que tiene de frente a la biomasa cosechada.

### **8.1 Submodelo biológico**

Los resultados biológicos obtenidos dentro de las simulaciones de TBF presentan una alta afinidad a resultados obtenidos en estudios de caso y con datos observados (Tabla 23). Un parámetro importante en el apartado biológico es el de ganancia de peso por día (g/día) en el cual, dentro de las simulaciones este parámetro presentó un valor de 3.31 para la zona Aguascalientes con un peso promedio de cosecha por organismos de 654.47 g en un periodo de

196 días, para el caso de Sinaloa se obtuvo un valor de 4.77 en un periodo de 140 días con peso promedio de cosecha por organismo de 673.35 g. Estos resultados se asemeja a los valores obtenidos de 3.20 a 4.27 en granjas comerciales en EEUU, Ecuador y México con pesos de cosecha que van de los 400 a los 826 g y duración del ciclo de engorda de 123 a 183 días (Rakocy *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2014; Betanzo *et al.*, 2019; Espinosa *et al.*, 2019) y esto se debe en gran medida porque las temperaturas en el agua que presentan las diferentes zonas de estudio se encuentran dentro de los intervalos adecuados para desarrollar el proceso de engorda de tilapia (Timmons *et al.*, 2002).

Trabajos realizados en EUUA y Ecuador reportan supervivencias en sistemas biofloc que van desde el 79.9% a 99.7% (Rakocy *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2014), para el caso de México Betanzo *et al.*, (2019) reportan en su trabajo, en el cual evalúa 6 granjas productoras de tilapia, un valor de supervivencia promedio de  $96 \pm 3.67\%$ . Los valores de supervivencia pronosticados por el modelo bioeconómico van en el orden del 89.79% y 92.60% para el caso de Aguascalientes y Sinaloa, respectivamente. Estos valores de supervivencia encontrados en los trabajos de Rakocy *et al.* (2011), Castro *et al.* (2014) y Betanzo *et al.* (2019) desarrollados en diferentes latitudes del Continente Americano permiten validar la sólida relación existente que entre los datos observados en los estudios antes mencionados y los obtenidos por la simulación del modelo bioeconómico

## **8.2 Submodelo de manejo**

El FCA es uno de los parámetros de productividad más utilizados para determinar la eficiencia productiva del sistema. Avnimelech (2007; 2011) reporta que con el uso de TBF es posible reducir un 20% la cantidad de alimento suministrado a los organismos considerando que TBF es capaz de aportar hasta el 50% de la proteína que requiere la tilapia para su desarrollo. Estas estimaciones se lograron corroborar con las simulaciones realizadas y comparando AV y TBF. Para el caso de AV se obtuvo un valor de FCA durante el ciclo de 1.17 en ambas zonas geográficas en contraste con el 0.95 y 0.96, Aguascalientes y Sinaloa respectivamente, estos valores se acercan al 20% de ahorro en la portación de alimento al sistema que argumenta Avnimelech (2007). Por otro lado, Betanzo *et al.* (2019) y Espinosa *et al.* (2019) reportan valores

de FCA de 0.90 a 0.98 en granjas de engorda establecidas en Yucatán y Sinaloa, respectivamente (Tabla 23).

La productividad pronosticada en relación a  $\text{kg}/\text{m}^3$  fue de  $17.63 \text{ kg}/\text{m}^3$  para el caso de Aguascalientes y de  $18.70 \text{ kg}/\text{m}^3$  para el caso de Sinaloa. Aunque estos valores se encuentran por arriba del promedio estimado por Betanzo *et al.*, (2019), quien determinó una productividad de  $15.31 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Tabla 23), es importante destacar que a nivel mundial están dentro del intervalo establecido para la engorda de tilapia que está en el orden de los 11.2 a los  $30 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Rakocy *et al.*, 2008; Avnimelech, 2011; Hargreaves, 2013; Castro *et al.*, 2014).

Autores como Avnimelech (2011), Emerenciano *et al.* (2013) y Castro *et al.* (2014) reportan que la implementación de melaza como fuente de carbono es una de las opciones más viables tanto económicamente como en su manejo, aunque esto dependerá en gran medida a la oferta de este insumo (Tabla 23). Su fácil adición a los tanques y alta solubilidad le permite ser adoptada con mayor facilidad por parte de los productores además de considerar su bajo costo que va de lo \$3.00 a los \$6.00 por kilogramo para el caso de México quien cuenta con una importante industria azucarera (Avnimelech, 2011; Betanzo *et al.*, 2019)

Con respecto a la relación C:N implementada en el sistema de cultivo esta dependerá en gran medida a las características ambientales, del agua y de la fuente de carbono (Tabla 23). Se mantiene una fuerte asunción de una relación que va desde 6:1 hasta 20:1 la cual dependerá también de la etapa de maduración en la que se encuentra el biofloc para el caso de un biofloc inicial los autores consideran una relación de 15:1 a 20:1, para mantenimiento del biofloc una relación de 10:1 y ya para biofloc muy maduros consideran una relación de 6:1 (Avnimelech, 2011; Hargreaves, 2013; Castro *et al.*, 2014; Betanzo *et al.*, 2019).

### **8.3 Submodelo de económico**

Existen pocos trabajos desarrollados en materia de evaluar la rentabilidad, los costos y demás aspectos económicos dentro del uso de la TBF en los sistemas de producción comercial tal como lo reporta Lujan y Chimbor en el 2016. De los pocos datos encontrados en TBF se pueden destacar los trabajos de De Schryver (2008), Molina (2013) y Betanzo *et al.* (2019) quienes solamente implementan el indicador de costo por kilogramos producido y reportan valores de \$25.77, \$22.15 y \$31.00  $\pm$  \$ 2.65, respectivamente (Tabla 23). Por otro lado, Ponce *et al.* (2006) y Zúñiga y Goycolea



(2014) reportan costos por kilogramo producido de \$26.12 y \$34.85, respectivamente, sin embargo, estos datos son provenientes de trabajos realizados en sistemas comerciales en los cuales no se implementa TBF. Considerando el dato estimado por Betanzo en el 2019 ( $\$31.00 \pm \$2.65$ ), el cual pertenece a granjas de México, con uso de TBF y dentro de una temporalidad cercana a la que se desarrolló este trabajo, el valor estimado con el modelo bioeconómico por costo por kilogramo se encuentra en el umbral determinado por estos autores siendo que el valor determinado por el modelo bioeconómico fue de  $\$31.72 \pm \$2.04/\text{kg}$  para el caso de Aguascalientes y de  $\$29.15 \pm \$1.98/\text{kg}$  en el caso de Sinaloa.

**Tabla 24.** Aspectos bioeconómicos calculados con el modelo bioeconómico en Granjas de producción ubicadas en Aguascalientes y Sinaloa con Tecnología Biofloc en contraste con datos de bibliografía.

Submodelo	Parámetro	Resultado calculado	Valor en bibliografía	Ubicación	Nivel de producción	Referencia
Bilógico	Peso de cosecha (g)	Ags. = 654.47	707 - 912	EEUU	Comercial	Rakocy <i>et al.</i> , 2008
			826	Ecuador	Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014
		Sin. = 673.35	528	México	Comercial	Espinosa <i>et al.</i> , 2019
			400 - 500	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019
	Supervivencia (%)	Ags. = 89.79	78.9 a 99.7	EEUU	Comercial	Rakocy <i>et al.</i> , 2008
			86.5	Ecuador	Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014
		Sin. = 92.60	71.25	México	Comercial	Espinosa <i>et al.</i> , 2019
			90 - 100	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019
	Días de cultivo	Ags. = 196	175-183	EEUU	Comercial	Rakocy <i>et al.</i> , 2008
			182	Ecuador	Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014
		Sin. = 140	123	México	Comercial	Espinosa <i>et al.</i> , 2019
			150 - 180	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019
Cambio de peso (g/día)	Ags. = 3.31	3.2 - 4.0	EEUU	Comercial	Rakocy <i>et al.</i> , 2008	
		4.15	Ecuador	Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014	
	Sin. = 4.77	3.25 - 4.27	México	Comercial	Espinosa <i>et al.</i> , 2019	

			2.2 - 3.9	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019	
Manejo	FCA	Ags. = 0.95	0.90 - 1.23	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019	
		Sin. = 0.96	0.98 - 1.05	México	Comercial	Espinosa <i>et al.</i> , 2019	
	Productividad (kg/m <sup>3</sup> )		14.4 a 18.6	EEUU	Comercial	Rakocy <i>et al.</i> , 2008	
		Ags. = 17.63	13 - 20	No específica	Comercial	Avnimelech, 2011	
			15 - 30	No específica	Comercial	Hargresaves, 2013	
		Sin. = 18.70	11.2	Ecuador	Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014	
			9.25 - 15.4	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019	
	Relación C:N	Ags. y Sin. = 10:1		15:01	Ecuador	Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014
				6:1 - 20:1	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019
	Fuente de carbono	Ags. y Sin. = melaza		Melaza	EEUU	Comercial	Rakocy <i>et al.</i> , 2008
			Ecuador		Comercial	Castro <i>et al.</i> , 2014	
			México		Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019	
Económ.	Costo/kilogramo (\$/kg)		26.12	México	Comercial	Ponce <i>et al.</i> , 2006	
		Ags. = 31.72 ± 2.04	25.77	No específica	Caso de estudio	De Schryver <i>et al.</i> , 2008	
			22.15	Brasil	Comercial	Molina, 2013	
		Sin. = 29.15 ± 1.98	34.85	Ecuador	Comercial	Zúñiga y Goycolea, 2014	
			31 ± 2.65	México	Comercial	Betanzo <i>et al.</i> , 2019	

#### 8.4 Análisis de sensibilidad

Las simulaciones realizadas permitieron identificar cuáles son los factores de impacto más representativos dentro del análisis de sensibilidad (Anexo B). La granja A, ubicada en Aguascalientes muestra una gran volatilidad al cambio con respecto a la disminución de la

temperatura (- 2°C) frente al escenario base reduciendo la biomasa producida en un sistema TBF en 53% y en AV 55% y aumentando hasta en 6 semanas el tiempo de producción para conseguir el peso meta establecido (600 g) en ambos sistemas. Por otro lado, ante la variación de disminución del precio de venta establecido (- 10%) en el escenario con AV y una inflación del 10% se pueden observar valores negativos de VPN (-\$ 54,738.33), una TIR de 8.08% que se encuentra bajo de la establecida como referencia a la tasa de descuento (8.9%) y un B/C de \$ 0.99 el cual, es inferior a \$ 1.00 de mostrando la inviabilidad económica ante este escenario.

Para el caso de la Granja B, ubicada en Sinaloa, los factores de impacto más representativos fueron la variación en el precio de venta ( $\pm 10\%$ ) sin embargo, estas variaciones, que son las más representativas, no afectaron negativamente ni la rentabilidad económica ni productiva derivado de que la Granja B mostro siempre valores positivos de VPN y B/C y por porcentajes por encima de la tasa de descuento de referencia (Anexo B).

Como bien se ha ido mencionado en apartados anteriores el desarrollo de trabajos en donde se aplique el uso de la modelación bioeconómica para determinar la rentabilidad y viabilidad de un sistema de producción con TBF son nulos.

Trabajos como el de Ponce *et al.* (2006), Saiti *et al.* (2007), Zúñiga y Goycolea (2014) y Karimanzira *et al.* (2016) aplican análisis de sensibilidad para poder determinar el comportamiento de la rentabilidad económica de un sistema productivo de tilapia en los cuales, implementan parámetros de cambio como densidad, incorporación de un producto con mayor valor en el mercado, duración del tiempo de cultivo, mortalidad, variación en precio de venta, insumos y capital de trabajo, tasa de descuento, tiempo óptimo de cosecha y uso de subsidios.

Si bien los trabajos mencionados en el párrafo anterior no se ajustan específicamente a las condiciones, tipo de cultivo y especificidad de la especie que se plantean en este trabajo, se logró identificar, al igual que Ponce *et al.* (2006), que los factores que mayor impacto tienen en la TIR y en el VPN son las variaciones en el precio de venta y en el costo por adquisición de insumos ya que muestra una relación directamente proporcional al incremento o disminución de estos parámetros. Por otro lado, los factores de variación de mortalidad y temperatura presentan cambios proporcionales a los valores de TIR y VPN aunque con menor incidencia, sin embargo, estas variaciones, aun con menor impacto económico, representan afectaciones

considerables al bolsillo de los productores por lo que conocer específicamente como afectan estos elementos a los indicadores de rentabilidad permiten tomar decisiones adecuadas y planificaciones con anticipación que permitan obtener los mayores beneficios económicos.

### **8.5 Análisis de Monte Carlo**

Las simulaciones realizadas en cada uno de los escenarios base permitieron validar, mediante la estocasticidad, la rentabilidad económica que presentan dichos escenarios aun considerando situaciones adversas, como el incremento de la tasa de inflación anual del 10% o la disminución del precio en este mismo valor. Con estos resultados los decisores tienen un horizonte claro sobre los beneficios y pérdidas que se pueden generar en los sistemas de cultivos evaluados ante variaciones económicas exógenas.

Simões & Gouvea (2015) a través de un Análisis de monte Carlo obtuvieron resultados favorables económicamente en la producción comercial de tilapia con 10 tanques de 12 m<sup>3</sup> (120 m<sup>3</sup>) con un precio promedio de venta de \$ 25.50 por kilogramo. Considerando que la inflación del 2015 al 2022 ha sido del orden 43%, de acuerdo con datos del INEGI (2022), el precio actualizado del trabajo de Simões & Gouvea (2015) ronda los \$36.45 por kilogramo precio que representa una variación del 9.7% en comparación a los \$40.00 promedio por kilogramo con el que se obtuvieron los datos en el presente trabajo. Esta información aleatoria obtenida por el análisis de Monte Carlo presenta una ventana de oportunidad para la toma de decisiones gerenciales minimizando errores que pueden ir desde el manejo de la producción hasta la administración de la granja.

### **8.6 Diferencias productivas y de manejo entre zonas geográficas**

Si bien la engorda de tilapia ha demostrado adaptarse a diferentes sistemas de producción y zonas geográficas alrededor del mundo es imperativo el poder contar con datos duros y específicos de las zonas evaluadas. Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten visualizar un horizonte acerca de que es lo que sucede de manera productiva y económica en dos zonas que difieren considerablemente en las características térmicas en el agua, factor que afecta en el rendimiento y crecimiento de la tilapia.

Las zonas con temperaturas ambientales medias anuales que oscilan entre los 17 y 18 °C pudieran presentar a simple vista ciertas limitaciones a la hora de producir organismos ectotérmicos como la tilapia, sin embargo, se puede apreciar el caso de éxito del Estado de Jalisco que de acuerdo con CONAPESCA en el 2018 se apuntalo como primer lugar en producción de tilapia (35,887 toneladas), con una producción que duplicó a la registrada por Sinaloa (17,553 toneladas) para este mismo año.

Estas diferencias productivas se deben en gran medida a la implementación de infraestructuras, como los invernaderos, y a la adopción de técnicas de producción, como la TBF, que permiten aprovechar esas limitaciones exógenas que pudieran representar un ecosistema adverso a la hora de producir tilapia que más que limitar los aparentes resultados representan un reto para los productores que aprovechan estas limitaciones para detonar sus capacidades y conocimientos (Timmons *et al.*, 2002 y Betanzo *et al.*, 2019).

En el 2019 Betanzo *et al.* determinó resultados productivos para zonas geográficas templadas, como el Estado de Jalisco, una ganancia en peso de 2.6 g/día, un FCA de 1.10 y supervivencia superior al 90% con el uso de TBF y a una temperatura ambiental media anual de 18.9 °C valores que se acercan a los obtenidos dentro de las simulaciones de 3.31 g/día, FCA de 0.95 y supervivencia de 89.79%, en el Estado de Aguascalientes en donde existe una temperatura ambiental media anual de 17.5 °C y con la aplicación de TBF. Para el caso de zonas con temperaturas medioambientales más cálidas (25.6 °C), como en el caso de Sinaloa, estos mismos parámetros y con el uso de TBF presentaron valores de 3 g/día, 0.90 de FCA y supervivencia superior al 90% en comparativa a los valores obtenidos en las simulaciones de este trabajo de 4.77 g/día, 0.96 de FCA y 92.60%, respectivamente.

En términos económicos los valores obtenidos por concepto de costo por kilogramo producido fueron de \$31.75 ± \$ 2.04 para el Estado de Aguascalientes y de \$29.15 ± \$1.98 para el Estado de Sinaloa valores que se asemejan a los obtenidos por Betanzo *et al.* (2019) quien determinó un costo por kilogramo producido de \$28.00 ± \$2.00 y \$30.00 ± \$2.00 para el Estado de Jalisco y Sinaloa, respectivamente, con la implementación de TBF.

## 9. CONCLUSIONES

A través del desarrollo del presente trabajo y de los resultados productivos y económicos obtenidos mediante las simulaciones realizadas por el modelo bioeconómico desarrollado, permiten concluir que la hipótesis planteada se acepta. La información cuantitativa obtenida funge como evidencia para establecer que la TBF es una opción con mayor viabilidad y beneficios tanto económicos como productivos frente a la AV.

Por otro lado, se pudo establecer que Aguascalientes tiene el potencial para el desarrollo y ejecución de proyectos que desarrollen la engorda de tilapia ya que a pesar de encontrarse geográficamente en condiciones significativamente diferente a una zona geográfica establecida en zonas costeras muestra características idóneas para el desarrollo de la especie.

Mediante del desarrollo del modelo bioeconómico propuesto en el presente trabajo se pudieron concretar cada uno de los objetivos particulares en función de que:

1. Se identificaron los parámetros físicos, químicos, biológicos, tecnológicos, zootécnicos, económicos y productivos precisos para la construcción del modelo bioeconómico descritos en la Fig. 4 en el apartado 6.1.
2. Se realizó la selección más afín de los modelos matemáticos que conformaron el modelo bioeconómico para el tratamiento y gestión de los datos considerando la disponibilidad y el tipo de la información de entrada como los son el peso inicial se siembra, peso meta de cosecha y temperatura media anual en el agua.
3. Se logró validar y ajustar los modelos matemáticos empleados utilizando datos, teóricos-comerciales, de sistemas de producción en TBF y AV en la zona de estudio para un mejor desempeño del modelo bioeconómico permitiendo al modelo tener una mayor afinidad a los resultados que se pueden esperar en campo.
4. Mediante la evaluación de impacto se logró generar datos de cambio en el tiempo de duración del proyecto.
5. Con el modelo bioeconómico se pudo contrastar los resultados obtenidos a través del análisis bioeconómico de los dos tipos de sistemas de producción evaluados generando información específica y concreta que permite seleccionar las mejores condiciones, estrategias y métodos de producción para la toma oportuna de decisiones.

6. A través del análisis de sensibilidad se estableció la plasticidad de cada uno de los escenarios bases con el propósito de identificar los parámetros de mayor impacto que inciden de manera significativa en los resultados iniciales obtenidos.

Considerando el poco desarrollo que tiene la producción de tilapia dentro de la modelación bioeconómica, el análisis de viabilidad económica que se desarrolla en el presente trabajo a escala comercial representa una base para el desarrollo de futuros trabajos de esta índole en diferentes latitudes del mundo contemplando diferentes sistemas de producción que pudieran aprovechar a su máxima capacidad los sistemas de producción incrementando los beneficios económicos.

Los datos obtenidos a través del uso de modelos bioeconómicos permiten tener una menor incertidumbre al momento ejecutar y/o desarrollar un proyecto en el que se tome como base la transmutación y oferta de un insumo biológico ya que con esta información es posible evaluar el desempeño actual que tiene un sistema de producción o bien identificar escenarios futuros. El modelo desarrollado en este trabajo al poder evaluar diferentes zonas geográficas, así como, diferentes tipos de producción presenta una adaptación y plasticidad favorable a diferentes escenarios por lo que su uso e implementación no solo delimita a un punto geográfico o un solo sistema de producción y dadas estas características, y a raíz de la información de entrada, es posible su implementación a nivel nacional y con ciertas adecuaciones hasta un nivel internacional.

Finalmente, el modelo desarrollado en este trabajo se encuentra en un software en un programa de uso universal (Excel), que permite realizar evaluaciones económicas y construir escenarios de alta precisión de proyectos existentes y futuros sobre cultivo de tilapia en cualquier región del mundo. Este software constituye una herramienta muy útil para los tomadores de decisión de cooperativas o empresas dedicadas a la acuicultura de tilapia.

## 10. LITERATURA CITADA

- Allen, P., Botsford, L., Schuur, A. y Johnston, W. (1984). Bioeconomics of aquaculture, developments in aquaculture and fisheries science. *Elsevier*, New York, 351 pp. <https://doi.org/10.1086/mre.2.4.42628911>.
- Almendarez, L. (2015). La Bioeconomía acuícola como herramienta para la toma de decisiones empresariales. *ContactoS*, 98: 14-18. <https://docplayer.es/94904666-La-bioeconomia-acuicola-como-herramienta.html>.
- Aracil, J. (1995). Introducción a la Dinámica de Sistemas. *Isdefe Ingeniería de Sistemas*, Madrid. [https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/dinsist-dinamica\\_sistemas.pdf](https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/dinsist-dinamica_sistemas.pdf).
- Arnason, R. (1992). Optimal feeding schedules and harvesting time in aquaculture. *Marine Resource Economics*, 7(1): 15-35. <https://www.jstor.org/stable/42629021>.
- Atwood, L., Tomasso, R., Webb, K. y Gatlin, DM. (2003). Low-temperature tolerance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*: effects of environmental and dietary factors. *Aquaculture Research*, 34(3): 241-251. [doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00811.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00811.x).
- Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176(3-4): 227-235. [doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X).
- Avnimelech, Y. (2007). Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture*, 264 (1-4): 140-147. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.025](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.025)
- Avnimelech, Y., Kochba, M. (2009). Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in biofloc tanks, using 15N tracing. *Aquaculture*; 287 (1-2): 163-168. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.10.009](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.10.009)
- Avnimelech, Y. (2011). Tilapia production using biofloc technology, saving water, waste recycling improves economics. *Global aquaculture Advocate*, 2011: 66-68. <https://www.globalseafood.org/advocate/tilapia-production-using-biofloc-technology/>.
- Avnimelech, Y. (2012). Biofloc Technology – A Practical Guide Book. *World Aquaculture Society*. Baton Rouge (La), 272 pp.
- Ballester, E., Abreu, P., Cavalli, R., Emerenciano, M., Abreu, L. y Wasielesky, W. (2009). Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero-exchange suspended microbial flocs intensive system. *Aquaculture Nutrition*, 16(2): 163-172. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2009.00648.x>.
- Becerra, J., Martínez, M., Martínez, R., Rivas, E., López A. y Porchas, A. (2012). Production response and digestive enzymatic activity of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) intensively pregrown in microbial heterotrophic and autotrophic-based systems. *The Scientific World Journal*, 2012: 723654. [doi.org/10.1100/2012/723654](https://doi.org/10.1100/2012/723654).
- Betanzo, E., Marín, J., Piñar, A., Celdran, D. y Mata, A. (2019). Analysis of the application of biofloc technology in the production of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in rural regions of Mexico. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 4(1-2): 42-58. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/40/45>.
- Bjørndal, T. (1988). Optimal harvesting of farmed fish. *Marine Resource Economics*, 5(2): 139-159. <http://www.jstor.org/stable/42628926>.
- Boyd, C. E. y Pillai, V. (1985). Water quality management in aquaculture. CMFRI Special Publication, 22. pp. 1-44.



- [https://www.researchgate.net/publication/279470557\\_Water\\_Quality\\_Management\\_in\\_Aquaculture](https://www.researchgate.net/publication/279470557_Water_Quality_Management_in_Aquaculture)
- Boyd, C. (1998). Water quality for pond aquaculture. *International Center for Aquaculture and Aquatic Environments*, Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, 37 pp. Alabama. <http://soiltesting.tamu.edu/publications/AU43.pdf>.
- Boyd, C., Torrans, E. y Tucker, C. (2018). Dissolved oxygen and aeration in ictalurid catfish aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, 49: 7-70. <https://doi.org/10.1111/jwas.12469>
- Bussön, F. (2021). Produce Aguascalientes 157 toneladas acuícolas al año. In: InfoRural. Disponible en: <https://www.inforural.com.mx/produce-aguascalientes-157-toneladas-acuicolas-al-ano/>. [consulta: 20 marzo 2022].
- Castro, C., Bulnes, L. y Suárez, H. (2014). Crianza de *Oreochromis niloticus* Var chitralada en sistema bio-floc en la Empresa PRODUMAR SA, Guayaquil (Ecuador). *REBIOLEST*, 1(2): 79-91. <https://docplayer.es/220467188-Crianza-de-oreochromis-niloticus-var-chitralada-en-sistema-bio-floc-en-la-empresa-produmar-sa-guayaquil-ecuador.html>.
- Cho, Y. y Bureau, P. (1998). Development of bioenergetic models and the fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources*, 11(4): 199-210. [doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)89002-5](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89002-5).
- Chowdhury, K., Siddiqui, S., Hua, K. y Bureau, D. (2013). Bioenergetics-based factorial model to determine feed requirement and waste output of tilapia produced under commercial conditions. *Aquaculture*, 410-411: 138-147. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.030](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.030).
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). (2018). Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2018. Mazatlán, Sinaloa. [https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2018/ANUARIO\\_2018.pdf](https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2018/ANUARIO_2018.pdf).
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P. y Verstraete, W. (2007). Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*, 270(1-4): 1-14. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006).
- Cuenca, L. (1989). Aquaculture Systems Modeling: an introduction with emphasis on warmwater aquaculture. *International Center for Living Aquatic Resources Management*, Manila, Philippines. <https://digitalarchive.worldfishcenter.org/bitstream/handle/20.500.12348/3231/Pub%20SR76%2019.pdf?sequence1=>.
- De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N. y Verstraete, W. (2008). The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277(3-4): 125-137. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019).
- Domínguez, R., Hernández, M., Gasca, E. y Poot, R. (2011). Effect of ration and size heterogeneity on harvest time: Tilapia culture in Yucatan, Mexico. *Aquaculture Economic Management*, 15(4): 278-301. [doi.org/10.1080/13657305.2011.624575](https://doi.org/10.1080/13657305.2011.624575).
- Domínguez, R., Poot, R., Hernández, J. y Gasca, E. (2020). Dynamic optimal ration size in tilapia culture: Economic and environmental considerations. *Ecological Modelling*, 420: 108930. [doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.108930](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.108930)
- Emerenciano, M., Gaxiola, G., Cuzon, G. (2013). Biofloc technology (BFT): a review for aquaculture application and animal food industry. In (Ed.), *Biomass Now - Cultivation and Utilization*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/53902>.

- Espinosa, D., Aparicio, B., Cortés, A., Garza, R., García, R. y Maeda, A. (2019). The productive assessment of two tilapia nilotica (*Oreochromis niloticus*) commercial strains in Sinaloa Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(3): 440-448. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/1838>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2003). Review of the State of World Fisheries and Aquaculture. Rome, Italia. <https://www.fao.org/3/y4490e/y4490e.pdf>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2009). *Oreochromis niloticus*. In Cultured aquatic species fact sheets. Text by Rakocy, J. E. Edited and compiled by Valerio Crespi and Michael New. CD-ROM (multilingual).
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. FAO, Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/i5555s/i5555s.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. FAO, Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/ca9229es/ca9229es.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). Estadísticas de pesca y acuicultura 2019. Roma, Italia. <https://mexico.un.org/sites/default/files/2022-01/Estad%C3%ADsticas%20de%20pesca%20y%20acuicultua%202019.pdf>.
- Forrester, W. (1961). Industrial Dynamics. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts. [http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres\\_textes\\_de\\_la\\_prospective/autres\\_ouvrages\\_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf](http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf).
- Gasca, E., Hernández, M. y Veliov, M. (2008). Optimal harvesting time in a size-heterogeneous population. *Ecological Modelling*, 210(1-2): 161-168. [doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.07.018](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.07.018).
- Gasca, E. (1999). Bioeconomía del cultivo de dorada (*Sparus aurata*). Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Gertler, J., Martinez, S., Premand, P., Rawlings, B. y Vermeersch, J. (2017). La evaluación de impacto en la práctica, Segunda edición. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/25030/9781464808883.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- Hargreaves, J. (2013). Biofloc production systems for aquaculture. In (Ed.), *South Regional Aquaculture Center*. 11 pp. USA. [https://aquaculture.ca.uky.edu/sites/aquaculture.ca.uky.edu/files/srac\\_4503\\_biofloc\\_production\\_systems\\_for\\_aquaculture.pdf](https://aquaculture.ca.uky.edu/sites/aquaculture.ca.uky.edu/files/srac_4503_biofloc_production_systems_for_aquaculture.pdf).
- Hean, L. (1994). An optimal management model for intensive aquaculture — an application in Atlantic salmon. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 38(1): 31-47. [doi.org/10.1111/j.1467-8489.1994.tb00718.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.1994.tb00718.x).
- Heaps, T. (1993). The Optimal Feeding of Farmed Fish. *Marine Resource Economics*, 8(2): 89-99. <https://www.jstor.org/stable/42629053>.
- Heaps, T. (1995). Density Dependent Growth and the Culling of Farmed Fish. *Marine Resource Economics*, 10(3): 285-298. <https://www.jstor.org/stable/42629592>.

- Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INAPESCA). (2018). Acuicultura de Tilapia. Disponible en: <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-tilapia>. [consulta: 20 marzo 2022].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). Principales cultivos anuales y perennes en Aguascalientes: *Censo Agropecuario 2007*. Aguascalientes, México. <https://docplayer.es/15659968-Principales-cultivos-anuales-y-perennes-en-aguascalientes-censo-agropecuario-2007.html>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Índice Nacional de Precios al consumidor: Calculadora de inflación. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/calculadorainflacion.aspx>. [consulta: 20 julio 2022].
- Karimanzira, D., Keesman, K., Kloas, W., Baganz, D. y Rauschenbach, T. (2017). Efficient and economical way of operating a recirculation aquaculture system in an aquaponics farm. *Aquaculture Economics and Management*, 21(7): 470-486. doi.org/10.1080/13657305.2016.1259368.
- Karp, L., Sadeh, A. y Griffin, L. (1986). Cycles in Agricultural Production: The Case of Aquaculture. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(3): 553-561. <https://doi.org/10.2307/1241540>.
- Kaushik, J. (1998). Nutritional bioenergetics and estimation of waste production in non-salmonids. *Aquatic Living Resources*, 11(4): 211-217. doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89003-7
- Kazmierczak Jr., F. y Caffey, H. (1996). The bioeconomics of recirculating aquaculture systems. *LSU Agricultural Experiment Station Reports*. Louisiana. <https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1437&context=agexp>.
- Kim, P., Klanian, M. y Seijo, J. (2020). Effect of size heterogeneity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on the optimal harvest time: A bioeconomics approach. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(1): 65-73. doi.org/10.3856/vol48-issue1-fulltext-2360.
- Kubitza, F. (2011). Criação de tilápias em sistema com bioflocos sem renovação de água. *Panorama da Aqüicultura*, 21: 14-23.
- Leung, P. y Shang, Y. (1989). Modeling prawn production management system: A dynamic Markov decision approach. *Agricultural Systems*, 29(1): 5-20. doi.org/10.1016/0308-521X(89)90067-X.
- Llorente, I. y Luna, L. (2016). Bioeconomic modelling in aquaculture: an overview of the literature. *Aquaculture International*, 24(4): 931-948. doi.org/10.1007/s10499-015-9962-z.
- Lujan, M. y Chimbor, C. (2016). Biofloc: Tendencia en la producción acuícola sustentable - AquaHoy. Disponible en: <https://aquahoy.com/bioflocs-tendencia-en-la-produccion-acuicola-sustentable/>. [consulta: 27 junio 2022].
- Martínez, L., Martínez, M. y Cortés, E. (2009). Camaronicultura mexicana y mundial: ¿actividad sustentable o industria contaminante? *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3): 181-196. <https://www.redalyc.org/pdf/370/37012012006.pdf>.
- Mistiaen, J. y Strand, I. (1998). Optimal Feeding and Harvest Time for Fish with Weight-Dependent Prices. *Marine Resource Economics*, 13(4): 231-246. <https://www.jstor.org/stable/42629239>.
- Molina, S. (2013). Costo de producción de biorreactores. En: 8vo. Foro Internacional de Acuicultura. Puebla, México.

- Muñoz, V. (2018). Contribución del biofloc inoculado con diferentes probióticos sobre el crecimiento y niveles de actividad enzimática digestiva en juveniles de tilapia (*Oreochromis niloticus* Var SPRING). *Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California. México.* <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2057>.
- Nhi, N., Da, C., Lundh, T., Lan, T. y Kiessling, A. (2018). Comparative evaluation of Brewer's yeast as a replacement for fishmeal in diets for tilapia (*Oreochromis niloticus*), reared in clear water or biofloc environments. *Aquaculture*, 495: 654-660. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.035](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.035).
- Pérez, J., Pérez, C., Hernández, M. y Monroy, M. (2018). Variation of the bacterial composition of biofloc and the intestine of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*, cultivated using biofloc technology, supplied different feed rations. *Aquaculture Research*, 49(11): 3658-3668. [doi.org/10.1111/are.13834](https://doi.org/10.1111/are.13834).
- Pomeroy, R., Bravo, B., Solis, D. y Johnston, R. (2008). Bioeconomic modelling and salmon aquaculture: An overview of the literature. *International Journal Environment and Pollution*, 33(4): 485-500. [doi.org/10.1504/IJEP.2008.020574](https://doi.org/10.1504/IJEP.2008.020574).
- Ponce, D., Hernández, J. y Gasca, E. (2006). Simulating the economic viability of Nile tilapia and Australian redclaw crayfish polyculture in Yucatan, Mexico. *Aquaculture*, 261(1): 151-159. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.047](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.047).
- Poot, G. y Gasca, E. (2009). Substitution of Balanced Feed with Chaya, *Cnidoscolus chayamansa*, Leaf in Tilapia Culture: A Bioeconomic Evaluation. *Journal of the World Aquaculture Society*, 40(3): 351-362. [doi.org/10.1111/j.1749-7345.2009.00255.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2009.00255.x).
- Poot, G., Hernández, J. y Gasca, E. (2010). Input management in integrated agriculture-aquaculture systems in Yucatan: Tree spinach leaves as a dietary supplement in tilapia culture. *Agricultural Systems*, 103(2): 98-104. [doi.org/10.1016/j.agsy.2009.11.003](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.11.003).
- Poot, G., Hernández, J. y Gasca, E. (2014). Analysis of ration size in Nile tilapia production: Economics and environmental implications. *Aquaculture*, 420-421: 198-205. [doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.005](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.005).
- Pullin, R. y Low McConell, R. (1982). The biology and culture of tilapias. , 1982.<sup>a</sup> ed.
- Rakocy, J., Danaher, J., Bailey, D., Shultz, R., Liping, L. y Fitzsimmons, K. (2011). Development of a biofloc system for the production of tilapia. *Aquaculture*, 277: 138-145. <https://ag.arizona.edu/azaqua/ista/ISTA9/FullPapers/Rakocy2.doc>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2011). Carta Nacional Acuícola. Ciudad de México. Disponible en: [https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/2011/SAGARPA\\_CNA.pdf](https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/2011/SAGARPA_CNA.pdf)
- Saiti, F., Jamu, D., Chisala, B. y Kambewa, P. (2007). Simulation of optimal harvesting strategies for small-scale mixed-sex tilapia (*Oreochromis shiranus* Boulenger 1896) ponds using a bio-economic model. *Aquaculture Research*, 38(4): 340-350. [doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01671.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01671.x).
- Simões, D. y Gouvea, A. (2015). Método de Monte Carlo aplicado a economicidade do cultivo de tilápia-do-Nilo. *Archivos de Zootecnia*, 64(245): 41-48. [doi.org/10.21071/az.v64i245.373](https://doi.org/10.21071/az.v64i245.373).
- Timmons, J., Wheaton, F., Summerfelt, S. y Vinci, B. (2002). Recirculating Aquaculture System. *Fundación Chile*.
- Toledo, S. y García, M. (2000). Nutrición y alimentación de tilapia cultivada en América Latina y el Caribe. pp 83-137 En: Civera-Cerecedo, R., Pérez-Estrada, C.J., Ricque-Marie, D. y Cruz-

- Suárez, L.E. (Eds.) Avances en Nutrición Acuícola IV. Memorias del IV Simposium Internacional de Nutrición Acuícola. Noviembre 15-18, 1998. La Paz, B.C.S., México.
- Valbuena, R. y Cruz, E. (2006). Efecto del peso corporal y temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de tilapia roja (*Oreochromis sp*). *Orinoquia*, 10(1): 57-63. <https://www.redalyc.org/pdf/896/89610107.pdf>.
- Vega, F., Ceballos, B., Cupul A., Galindo, J. y Cupul, F. (2009). Acuicultura de tilapia a pequeña escala para consumo de familias rurales y periurbanas de la costa del Pacífico. ISBN: 9788578110796. México.
- Vose, D. 2001. Risk Analysis. A Quantitative Guide. John Wiley & Sons. 2nd ed. Chichester, West Sussex, UK. 752p.
- Yu, R. y Leung, P. (2006). Optimal Partial Harvesting Schedule for Aquaculture Operations. *Marine Resource Economics*, 21(3): 301-315. <https://www.jstor.org/stable/42629513>.
- Yu, R. y Leung, P. (2009). Optimal harvest time in continuous aquacultural production: The case of nonhomogeneous production cycles. *International Journal of Production Economics*, 117(2): 267-270. [doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.001).
- Zuñiga, S. y Goycolea, M. (2014). A bioeconomic model for red tilapia culture on the coast of Ecuador. *Aquaculture International*, 22(2): 339-359. [doi.org/10.1007/s10499-013-9643-8](https://doi.org/10.1007/s10499-013-9643-8).

## 11. ANEXOS

**Anexo A.** Simulaciones realizadas por el modelo bioeconómico para la obtención de resultados productivos, económicos y financieros considerando dos sistemas de producción - Aguas Verdes (AV) y Tecnología Biofloc (TBF) -, dos zonas geográficas - Aguascalientes (Granja A) y Sinaloa (Granja B) -, y dos tasas de inflación (5 y 10%).

[https://drive.google.com/file/d/1qLWV1ERU\\_CdgKlhSFSN08FwyPOEOMo0o/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1qLWV1ERU_CdgKlhSFSN08FwyPOEOMo0o/view?usp=sharing)

**Anexo B.** Análisis de sensibilidad a los escenarios base considerando variaciones de temperatura ( $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), mortalidad ( $\pm 50\%$ ) y precio de venta ( $\pm 10\%$ ).

[https://drive.google.com/file/d/1BTXISxyl\\_JznhkFnaVkuspRsACL5Ow2\\_/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1BTXISxyl_JznhkFnaVkuspRsACL5Ow2_/view?usp=sharing)

**Anexo C.** Análisis de Monte Carlo para la validación de la estocasticidad de los resultados obtenidos en los escenarios base considerando una distribución Pert con una variación de  $\pm 10\%$ .

<https://drive.google.com/file/d/1jnntgpMTBbDowZChJukZmHm05wX8OSbB/view?usp=sharing>

**Anexo D.** Liga para acceder al programa Excel desarrollado del Modelo para la evaluación bioeconómica de la producción de tilapia.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WK4axEsSP7PUUB1Rbt286skbckM3kla/edit?usp=sharing&oid=101006746229223579940&rtpof=true&sd=true>. Para obtener licencia de uso, contactar a Juan Carlos René Dorantes de la O ([jcrdo03@gmail.com](mailto:jcrdo03@gmail.com)), y/o Alfonso Nivardo Maeda Martínez ([amaeda04@cibnor.mx](mailto:amaeda04@cibnor.mx)).