



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“DISEÑO DEL PROGRAMA DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA NILÓTICA
EN UN SISTEMA SEMI INTENSIVO MEDIANTE ALGORITMOS DE
SECUENCIACIÓN EN UNA GRANJA ACUÍCOLA EN EL ESTADO DE
VERACRUZ.”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

ING. ITZEL VERA GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. MARÍA ELOÍSA DE LA ASUNCIÓN GURRUCHAGA RODRÍGUEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN

ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

DICIEMBRE 2024



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **13/noviembre/2024**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. VERA GONZALEZ ITZEL
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"DISEÑO DEL PROGRAMA DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA NILÓTICA EN UN SISTEMA SEMI
INTENSIVO MEDIANTE ALGORITMOS DE SECUENCIACIÓN EN UNA GRANJA ACUÍCOLA EN
EL ESTADO DE VERACRUZ"**

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®



OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OLE/magh

OG-13-F06



Av. Oriente 9 Núm. 852 Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba Veracruz Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: depi_orizaba@tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba Veracruz, 30/octubre/2024.

Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

VERA GONZALEZ ITZEL

La cual lleva el título de:

**DISEÑO DEL PROGRAMA DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA NILÓTICA EN UN SISTEMA SEMI INTENSIVO MEDIANTE
ALGORITMOS DE SECUENCIACIÓN EN UNA GRANJA ACUÍCOLA EN EL ESTADO DE VERACRUZ**

y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DRA. MA. ELOISA GURRUCHAGA RODRÍGUEZ

SECRETARIO: DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN

VOCAL: DR. ERICK ARTURO BETANZO TORRES

VOCAL SUP.: DR. OSCAR BAEZ SENTIES

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-F18



Av. Oriente 9 Num. 852 Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba Veracruz Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: depi_orizaba@tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



2024

**Felipe Carrillo
PUERTO**

Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 13 del mes de noviembre del año 2024.

El(la) que suscribe

C. Itzel Vera González

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 83 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

“Diseño del programa de producción de Tilapia Nilótica en un sistema semi intensivo mediante algoritmos de secuenciación en una granja acuícola en el estado de Veracruz”

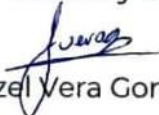
del programa: Maestría en Ingeniería Industrial bajo la asesoría y dirección de la Dra. María Eloísa de la Asunción Gurruchaga Rodríguez y el Dr. Miguel Josué Heredia Roldán y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Nombre y firma


Itzel Vera González

Agradecimientos

A Dios y a las personas que me guían desde el cielo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada (CVU 1234684), que fue fundamental para el desarrollo, culminación y obtención del grado de Maestra en Ingeniería Industrial.

A la Dra. María Eloísa Gurruchaga, por su paciencia infinita, su apoyo constante, su guía y el conocimiento compartido a lo largo de cada clase y durante la realización de este trabajo. Agradezco profundamente sus enseñanzas y consejos, los cuales fueron un pilar en este proceso; al Dr. Erick Betanzo, por sus observaciones, recomendaciones que me impulsaron a alcanzar la mejora continua en este proyecto y al Dr. Miguel Heredia, por sus evaluaciones detalladas y cada exposición que me llevaron a expandir mis expectativas, nutrir y buscar soluciones para el desarrollo de esta tesis.

A mis padres y hermanos, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi fortaleza y mi inspiración en cada paso de este camino. A las amistades valiosas que hice durante este camino, especialmente Monse y Zazil. Gracias por su compañía, por los momentos compartidos y por las enseñanzas que me dejaron.

Finalmente, agradezco a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la culminación de esta etapa de mi vida.

¡Gracias!

Resumen

En México, la acuicultura, a través de la Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura, registra 9,230 granjas acuícolas oficiales, la mayoría de estas carecen de un programa de producción y tienden a enfocarse en satisfacer la demanda estacional, usualmente una vez al año. A diferencia de la industria manufacturera, donde los modelos de producción se basan en procesos estables y continuos, la acuicultura enfrenta desafíos debido al crecimiento variable de los organismos, la estacionalidad de la demanda y la capacidad de carga del sistema acuícola.

Por tal motivo, el objetivo principal de este trabajo fue diseñar un programa de producción de Tilapia (*O. niloticus*) mediante la aplicación de algoritmos de secuenciación en una granja acuícola en el estado de Veracruz. Se emplearon diversas herramientas de ingeniería industrial, como la dinámica de sistemas, para construir un modelo basado en iteraciones de datos, compuesto por cuatro submodelos principales: biológico, de manejo, de riesgo y económico. Además, se utilizó una analogía mediante la aplicación de algoritmos de secuenciación y a partir de datos históricos, se generaron curvas de crecimiento para determinar el tiempo promedio de cosecha, comparando estos resultados con el modelo de crecimiento térmico. Esto permitió identificar la temperatura como una variable crítica en la programación de la producción, asimismo, se calculó la capacidad de carga de los estanques en términos de volumen y biomasa, obteniendo los costos de producción por cultivo, además se diseñó una aplicación informática que resume la amplia cantidad de datos productivos, económicos y operativos, brindando al productor un panorama de producción favorable y de riesgo.

A través de esta aplicación, se implementaron escenarios de evaluación para lograr una cosecha mensual de 600 kg y 1200 kg en períodos de alta demanda, donde se obtuvieron datos de tiempos de crecimiento basados en datos históricos y en el perfil térmico de la zona, la cantidad de alimento consumido, la biomasa a cosechar, el FCA mínimo requerido, el número de estanques necesarios, la densidad teórica por estanque, los costos de

producción, y la secuencia de prioridades para pedidos en momentos de alta demanda, en conclusión, se confirma la viabilidad de la aplicación con algoritmos de secuenciación la programación de la producción en el sector acuícola.

Palabras clave: Acuicultura de Tilapia, producción acuícola, optimización de procesos.

Abstract

In Mexico, aquaculture, through the National Commission of Fisheries and Aquaculture, registers 9,230 official aquaculture farms, most of which lack a production program and tend to focus on satisfying seasonal demand, usually once a year. Unlike the manufacturing industry, where production models are based on stable and continuous processes, aquaculture faces challenges due to the variable growth of organisms, seasonality of demand and the carrying capacity of the aquaculture system. Therefore, the main objective of this work was to design a Tilapia (*O. niloticus*) production program through the application of sequencing algorithms in an aquaculture farm in the state of Veracruz. Several industrial engineering tools, such as system dynamics, were used to build a model based on data iterations, composed of four main submodels: biological, management, risk and economic. In addition, an analogy was used through the application of sequencing algorithms and from historical data, growth curves were generated to determine the average harvest time, comparing these results with the thermal growth model. This allowed the identification of temperature as a critical variable in production scheduling, as well as the calculation of the carrying capacity of the ponds in terms of volume and biomass, obtaining the production costs per crop. In addition, a computer application was designed to summarize the large amount of productive, economic and operational data, providing the producer with a favorable production and risk scenario.

Through this application, evaluation scenarios were implemented to achieve a monthly harvest of 600 kg and 1200 kg in periods of high demand, where data were obtained on growth times based on historical data and the thermal profile of the area, the amount of feed consumed, the biomass to be harvested, In conclusion, the feasibility of the application of sequencing algorithms for the scheduling of production in the aquaculture sector is confirmed.

Keywords: Tilapia aquaculture, aquaculture production, process optimization.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. Generalidades.....	3
1.1 Diagnóstico de la empresa ingeniería agropecuaria del Papaloapan S.P.R de R.L.....	3
1.1.1 Antecedentes.....	3
1.1.2 Enfoque estratégico.....	4
1.1.3 Marco geográfico.....	5
1.1.4 Infraestructura acuícola.....	6
1.2 Generalidades del proyecto.....	9
1.2.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2.2 Objetivos.....	11
1.2.3 Justificación	12
Capítulo 2. Marco teórico	13
2.1 Acuicultura.....	13
2.2 Acuicultura mundial.....	13
2.3 Acuicultura en México.....	15
2.4 Cultivo de Tilapia	15
2.5 Alimentación de la Tilapia.....	16
2.5.1 Estrategias de alimentación de la Tilapia.....	17
2.5.2 Factor de conversión alimenticia	18
2.6 Crecimiento en peces.....	19
2.6.1 Coeficiente Térmico de Crecimiento (CTC).....	20
2.7 Capacidad de carga de cultivo	20
2.8 Transferencia de peces.....	21
2.9 Sistemas dinámicos.....	22
2.9.1 Modelo de un sistema	23
2.9.2 Diagrama causal.....	24
2.9.3 Retroalimentación causal.....	25
2.10 Planificación de la producción.....	27
2.11 Programación de la producción	29
2.12 Criterios de programación	29
2.13 Secuenciación de trabajos.....	30
2.14 Reglas de prioridad para secuenciar los trabajos	31
2.15 Secuenciación de trabajos en máquinas.....	31

2.16	Planificación de producción en piscifactorías.....	33
Capítulo 3. Metodología.....		36
3.1	Descripción del lugar de estudio.....	36
3.2	Tipo de investigación.....	36
3.3	Método de recopilación de información	36
3.4	Abordaje metodológico	37
Capítulo 4. Resultados.....		51
4.1	Caracterización del sistema de producción	51
4.1.1	Identificación de los componentes del sistema y la interacción existente entre ellos.....	51
4.2	Origen de los datos.....	54
4.2.1	Recolección de información mediante datos históricos de la empresa.....	54
4.3	Modelos representativos	57
4.3.1	Validación de los modelos representativos.....	59
4.3.2	Submodelo biológico	61
4.3.3	Submodelo de manejo.....	64
4.3.4	Submodelo económico.....	66
4.4	Aplicación de los algoritmos de secuenciación para la secuencia de pedidos	66
4.5	Diseño de la aplicación informática para la programación de la producción de Tilapia.....	67
Capítulo 5. Conclusiones.....		74
Referencias		76
Anexos.....		83

Índice de figuras

Figura 1. 1 Ubicación geográfica del estado de Veracruz dentro del territorio mexicano.....	5
Figura 1. 2 Ubicación de la UPA Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan SPR de RL en el Rancho Tierra Adentro.....	6
Figura 1. 3 Layout del módulo II de la instalación de producción.	8
Figura 2. 1 Producción acuícola mundial 1950 – 2022. Fuente: FAO, 2024.....	14
Figura 2. 2 Curva de crecimiento sigmoidea. Fuente: Arce Vega (2014).	19
Figura 2. 3 Concepción general de un sistema físico. Fuente: Imués Figueroa (2013).	23
Figura 2. 4 Relación positiva - diagrama causal. Fuente: García & Sterman, (2003).....	24
Figura 2. 5 Relación negativa - diagrama causal. Fuente: García & Sterman, (2003).....	25
Figura 2. 6 Bucles de retroalimentación. Fuente: García & Sterman, (2003).....	26
Figura 3. 1 Metodología de la revisión de literatura.....	37
Figura 3. 2 Modelo conceptual e identificación de componentes. Adaptado de Ponce, et al. (2005).....	39
Figura 4. 1 Diagrama de flujo de la interacción de submodelos que conforman el sistema. Adaptado de Dorantes, (2022).....	52
Figura 4. 2 Diagrama causal del sistema de producción de Tilapia.....	53
Figura 4. 3 Datos de entrada para obtener la duración del ciclo.....	68
Figura 4. 4 Resultados con datos históricos.....	69
Figura 4. 5 Datos de temperatura de entrada	69
Figura 4. 6 Resultados meta con CTC	70
Figura 4. 7 Datos de entrada para los costos de producción.....	70
Figura 4. 8 Resultados de costos de producción.....	71
Figura 4. 9 Datos de entrada de las características de los estanques	71
Figura 4. 10 Resultados del número de estanques necesarios	72
Figura 4. 11 Datos de entrada para obtener la secuencia de prioridad.....	73
Figura 4. 12 Resultados obtenidos de la secuencia de priorización.....	73

Índice de tablas

Tabla 1. 1 Resumen de características de los estanques del módulo I.....	6
Tabla 1. 2 Resumen de características de los estanques del módulo II.	7
Tabla 3. 1 Características generales de producción para planificar.....	40
Tabla 3. 2 Datos de entrada para obtener información sobre la capacidad de carga en los estanques de producción para determinar la capacidad de carga.....	41
Tabla 3. 3 Datos de la información económica para la obtención de los costos de producción.	42
Tabla 3. 4 Densidad de siembra para Tilapia. Fuente: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, (2021)..	45
Tabla 3. 5 Escenarios a evaluar considerando diversas variables que impactan el ciclo de producción.	48
Tabla 3. 6 Escenarios propuestos para la secuencia de prioridad.	49
Tabla 4. 1 Valores de la media de la temperatura por año/estación. Elaboración propia con información basada en Santana Carrión, (2023).....	54
Tabla 4. 2 Lotes de producción período 2016 – 2019.	55
Tabla 4. 3 Curvas de crecimiento históricos para estimar el tiempo de producción.....	55
Tabla 4. 4 Estimación de días de producción y error de estimación mediante modelos obtenidos	57
Tabla 4. 5 Puntuación para ponderación de criterios.....	58
Tabla 4. 6 Ponderación final de cada lote.....	58
Tabla 4. 7 Escenario de producción con datos históricos.	59
Tabla 4. 8 Error de estimación de la simulación contrastando con datos reales.	60
Tabla 4. 9 Estimación de error para biomasa cosechada y FCA.	61
Tabla 4. 10 Escenario propuesto para la programación escalonada.	62
Tabla 4. 11 Tiempo promedio de los modelos representativos.	62
Tabla 4. 12 Estimación de la biomasa cosechada y mortalidad.....	63
Tabla 4. 13 Estimación del número de estanques y densidad teórica de los organismos.	64
Tabla 4. 14 Estimación del FCA y alimento consumido.	65
Tabla 4. 15 Estimación de los márgenes de utilidad por lote.	66
Tabla 4. 16 Secuencia de pedidos de producción.	67

Introducción

En las últimas décadas, el agotamiento gradual de las áreas de reserva natural y la creciente demanda de productos marinos han generado un incremento considerable en la relevancia de la acuicultura como fuente de producción de alimentos acuáticos (Luna, et al., 2020). Por lo tanto, es imperativo que se le otorgue máxima prioridad al avance de la acuicultura, especialmente en áreas donde el potencial de crecimiento en este sector sigue en gran parte sin aprovecharse. Se estima que la producción de alimentos acuáticos aumentará otro 15% para el año 2030 (FAO, 2019).

Por su parte, Palomo (2021) menciona que la acuicultura está experimentando un incremento notable en los últimos años y no solo eso, también posee amplias perspectivas de un crecimiento sostenible. En este sentido, la producción acuícola se presenta como una herramienta fundamental para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

La programación de la producción acuícola se relaciona con varios de los 17 objetivos globales de la Agenda 2030, como lo es el objetivo 14.7, el cual tiene como propósito aumentar los beneficios económicos en pequeños Estados insulares en desarrollo y países menos adelantados mediante la gestión sostenible de la pesca, la acuicultura y el turismo, asimismo con el objetivo 12.2 que establece la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, y por último con el objetivo 10.1 enfocado en lograr progresivamente el crecimiento de los ingresos del 40% de la población más pobre (ONU, 2015), donde, la acuicultura puede generar empleos y oportunidades económicas en zonas rurales y costeras.

Con base en lo anterior, una programación de producción adecuada en granjas acuícolas puede contribuir con el aumento de los beneficios económicos y sociales, mejorando la calidad de vida de las comunidades locales, la promoción de la producción, el consumo sostenible de los recursos y la protección del medio ambiente marino.

Por consiguiente, el propósito de este trabajo es diseñar un programa de producción de Tilapia (*O. niloticus*) en un sistema semi intensivo mediante dinámica de sistemas y algoritmos de secuenciación bajo distintas restricciones, en múltiples estanques con diferente capacidad, con la finalidad de conocer cuándo y cuánto se debe cultivar para aprovechar de manera efectiva las limitadas instalaciones acuícolas. Este estudio se llevará a cabo en la granja acuícola “*Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan S.P.R. de R.L.*”, situada en Rancho Tierra Adentro, congregación de Joachín, municipio de Tierra Blanca, Veracruz.

El primer capítulo de esta tesis se proporciona una visión integral de la UPA, abarcando su historia, enfoque estratégico, alcance geográfico y distribución de espacio, se describe la problemática que motivó la investigación, el objetivo general: diseñar un programa de la producción de Tilapia (*O. niloticus*) mediante la aplicación de algoritmos de secuenciación y la justificación fundamentada del trabajo. En el segundo capítulo, se exploran los conceptos y técnicas de las herramientas de Ingeniería Industrial empleadas en el desarrollo. Además, se expone el estado actual de la aplicación de estas herramientas en el ámbito acuícola, basándose en la revisión bibliográfica realizada. En el tercer capítulo se expone detalladamente la metodología propuesta en la implementación del trabajo. Se describen los pasos, procedimientos y técnicas necesarias para alcanzar los objetivos planteados. El capítulo subsiguiente culmina en la presentación de los resultados obtenidos, mostrando cómo el modelo propuesto puede mejorar la eficiencia en la producción de Tilapia en un sistema semi intensivo. Se evalúa el impacto del uso de distintas tecnologías y se discuten los beneficios económicos y sociales que podrían derivarse. Finalmente, el último capítulo recopila las conclusiones derivadas de los resultados del estudio y ofrece recomendaciones para la implementación del programa de producción. Se destaca la importancia de una adecuada programación de la producción acuícola para maximizar los beneficios económicos y sociales, así como para promover la sostenibilidad en la acuicultura.

Capítulo 1. Generalidades

En el presente capítulo se proporciona una visión integral de la empresa “*Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan S.P.R. de R.L.*”, abarcando su historia, enfoque estratégico, alcance geográfico y distribución de espacio.

1.1 Diagnóstico de la empresa ingeniería agropecuaria del Papaloapan S.P.R de R.L

1.1.1 Antecedentes

En el año 2006 la unidad de producción acuícola (UPA) fue fundada obteniendo su reconocimiento legal como “*Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan*”, constituyéndose formalmente como una sociedad de producción rural de responsabilidad limitada.

En 2008, a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) adquirió el derecho de uso y aprovechamiento de aguas subterráneas nacionales mediante una concesión. En ese mismo período obtuvo el registro nacional de pesca para unidades económicas por medio de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Posteriormente en el año 2015, la Delegación Federal de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el Estado de Veracruz le emitió a la UPA un dictamen favorable de evaluación de impacto ambiental. Este dictamen respaldó la expansión de la granja y el aumento de su producción, cumpliendo con los requisitos establecidos por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

En el año 2018, la empresa con el objetivo de obtener el certificado de inocuidad mediante su implementación e iniciar el proceso de evaluación de Buenas Prácticas Acuícolas en la Producción Primaria presentó una solicitud a la Dirección General de Inocuidad Agroalimentaria, Acuícola y Pesquera. En el mismo año, el personal técnico del Comité de

Sanidad Acuícola y Pesquero Veracruzano A.C. (COSAP) llevó a cabo una auditoría en la unidad de producción. Como resultado de este proceso, en 2019, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), concedió a la empresa el reconocimiento al cumplimiento de las Buenas Prácticas Acuícolas en la Producción Primaria.

1.1.2 Enfoque estratégico

A continuación, se presentan la misión, visión y valores que comprenden el enfoque estratégico de la empresa.

Misión

La empresa tiene como misión principal:

“Desarrollar e implantar las mejores prácticas y tecnologías que permitan la producción y la comercialización de Tilapia (O. niloticus) de calidad, fomentando la innovación en la industria acuícola, tomando en cuenta el respeto al medio ambiente y la colaboración con diferentes unidades productivas.”

Visión

La empresa tiene como misión principal:

“Ser una organización líder en la producción de Tilapia (O. niloticus) en Veracruz, produciendo bienes y servicios que sean una alternativa que aporte a la buena alimentación de los clientes y al beneficio de la sociedad.”

Valores

La empresa se identifica con los siguientes valores:

- *Perseverancia*: ser conscientes de los retos constantes en el mercado y del esfuerzo necesario para poder afrontarlos.
- *Innovación*: estar la vanguardia con la tecnología que permita contribuir de forma eficiente al desarrollo de productos que satisfagan a los consumidores.
- *Humildad*: reconocer la importancia de todos los colaboradores que aportan en mayor o menor medida a los procesos que benefician a la organización.

1.1.3 Marco geográfico

La descripción del marco geográfico engloba los detalles del área donde se lleva a cabo el proyecto.

Macro localización

La localización macro del proyecto se encuentra ubicada en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. En la Figura 1. 1 se encuentra señalada la superficie geográfica.



Figura 1. 1 Ubicación geográfica del estado de Veracruz dentro del territorio mexicano.

Micro localización

La UPA Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan se localiza en el municipio de Tierra Blanca, Veracruz, específicamente en el Rancho Tierra Adentro, perteneciente a la Congregación de Joachín. Su ubicación geográfica se sitúa en las coordenadas 18°39'26" latitud norte y 96°17'58" longitud oeste, a una altitud de 63 metros. En la Figura 1. 2 se encuentra señalada la superficie geográfica.

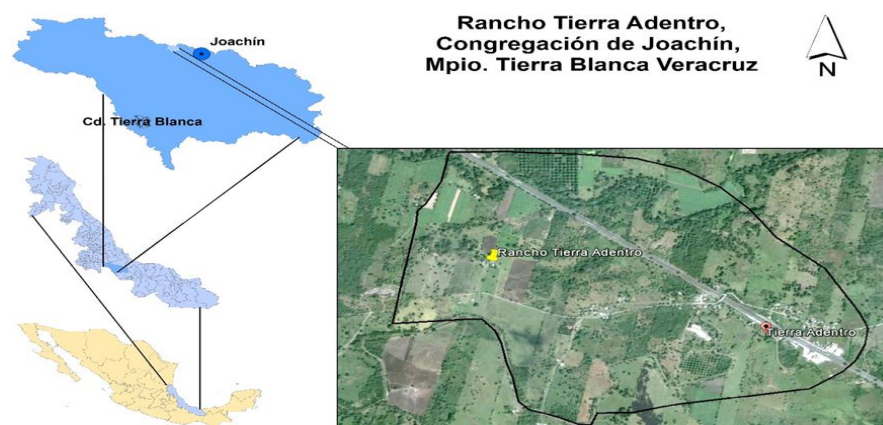


Figura 1. 2 Ubicación de la UPA Ingeniería Agropecuaria del Papaloapan SPR de RL en el Rancho Tierra Adentro.

1.1.4 Infraestructura acuícola

La organización empresarial se divide en dos secciones: el módulo I dedicado a la recepción de crías y pre-engorda y el módulo II destinado a la engorda. Además, incluye cuatro secciones principales: un área de ventas, espacio para estacionamiento, una bodega para almacenar alimento y un depósito para accesorios y equipamiento.

Módulo I: Recepción de crías, pre engorda y engorda

El módulo I ocupa un área de 800 m³ y los estanques están compuestos por las siguientes características (Tabla 1. 1):

Tabla 1. 1 Resumen de características de los estanques del módulo I.

Características de los estanques del módulo I			
Fase	<i>Recepción de crías</i>	<i>Pre engorda y engorda</i>	<i>Pre engorda y engorda</i>
Tipo de infraestructura	Tanques de polietileno	Tanques de polietileno	Tanques de polietileno
No. de estanques	4	12	3
Diámetro (m)	3.10	6.10	4
Altura (m)	1.20	1.20	1.20
Área por estanque (m ²)	26.782	81.466	40.212
Vol. por estanque (m ³)	9.056	35.070	15.080

Además, se cuentan con:

- 2 sopladores de turbina para pre engorda.
- Tomas de agua y aire para cada estanque.
- Un sistema de desagüe independiente.

Módulo II: Engorda

El módulo II, ocupa un área de 720 m³ y los estanques están compuestos por las siguientes características (Tabla 1.2):

Tabla 1. 2 Resumen de características de los estanques del módulo II.

Características de los estanques del módulo II	
Fase	<i>Engorda</i>
Tipo de infraestructura	Tanque de geomembrana
No. de estanques	6
Diámetro (m)	12
Altura (m)	1.20
Área por estanque (m ²)	271.43
Vol. por estanque (m ³)	135.72

Además, se cuentan con:

- 1 soplador de turbina.
- Tomas de agua para cada estanque
- Sistema de desagüe.
- Tomas eléctricas para sopladores.

En la Figura 1. 3 se muestra la distribución del área del módulo II.

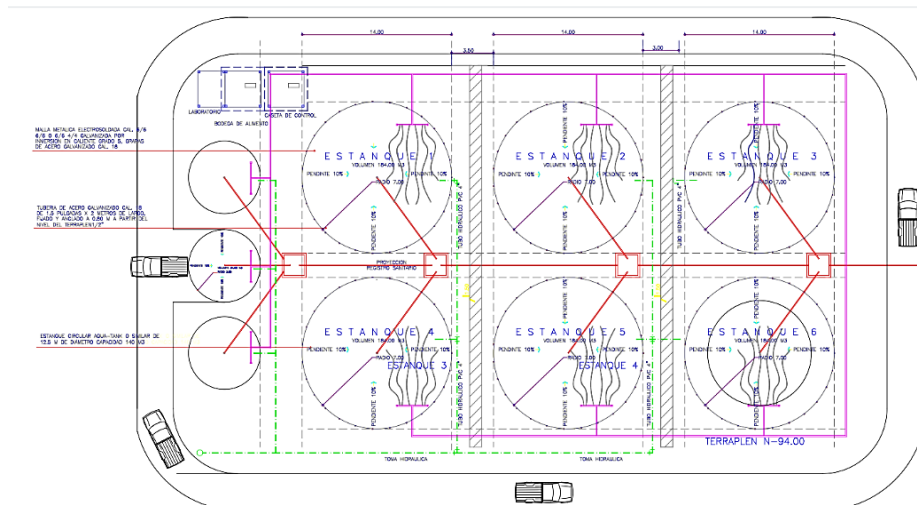


Figura 1. 3 Layout del módulo II de la instalación de producción.

Punto de venta

En el área de ventas, se dispone de un estanque de polietileno con dimensiones de 2 x 5 metros cúbicos para las cosechas parciales. La cosecha completa se lleva a cabo en el estanque de engorda, aunque en ocasiones puede realizarse en el otro estanque, dependiendo de la demanda y del tamaño disponible.

Además, se cuentan con:

- Tomas de agua y aire para el estanque.
- Sistema de desagüe.

Estacionamiento

La zona de estacionamiento comprende una extensión de 500 metros cuadrados y está destinada para el uso del personal y de los visitantes. Está ubicada entre las áreas de pre-engorda y engorda.

Bodega de alimento

La bodega de alimentos de la instalación ocupa un área de 24 metros cuadrados y tiene capacidad para almacenar el equivalente a 20 días de producción actual. El reabastecimiento se realiza mensualmente para garantizar la frescura del alimento. Este se dispone sobre tarimas de madera, organizado en secciones separadas según su tipo. Se emplean dispositivos como trampas o cebos para controlar la presencia de roedores u otras plagas. Las ventanas y

la puerta están protegidas con malla para evitar la entrada de insectos y animales no deseados. Además, se cuenta con una báscula electrónica para pesar las raciones de alimentación destinadas a las diferentes etapas de desarrollo.

Almacén de accesorios y equipo

En adyacencia a la bodega destinada al almacenamiento de alimento, se dispone de un espacio adicional de 16 metros cuadrados. Este espacio está equipado con estanterías y una mesa de trabajo designada para resguardar las herramientas y materiales utilizados en la Unidad de Producción Acuícola (UPA), así como para realizar el mantenimiento de los equipos pertenecientes a la misma.

Equipo de soporte y complementario

La instalación está equipada con un transformador trifásico de 75 kVA y un generador de emergencia trifásico de 10 kVA. También cuenta con un pozo profundo para el suministro de agua y múltiples centros de carga eléctrica distribuidos estratégicamente. Se han instalado contenedores independientes para la gestión de desechos orgánicos e inorgánicos, los cuales se distribuyen en tres puntos distintos de la granja. Además, se ha implementado una fosa séptica ubicada en los límites de la UPA para el tratamiento de aguas residuales.

1.2 Generalidades del proyecto

Este apartado presenta las generalidades inherentes al trabajo de tesis como la formulación del problema de investigación, los objetivos y su respectiva justificación.

1.2.1 Planteamiento del problema

La programación de la producción establece estrategias y objetivos con el propósito de producir bienes y/o servicios de forma eficiente, considerando capacidades y períodos productivos, recursos disponibles con base a la demanda del mercado y restricciones logísticas (Yang Youn, 2015).

En la industria manufacturera los modelos de programación de la producción se elaboran con base a una demanda y un proceso productivo que podría considerarse estable (Chapman

Stephen, 2006), en el caso de la acuicultura, la incertidumbre en el crecimiento y desarrollo de los organismos, la estacionalidad de la demanda y factores ambientales y biológicos pueden estudiarse como variables fluctuantes que no se pueden controlar, las cuales afectan directamente a la programación de la producción (Rielo Zurita, 2013).

De acuerdo con una entrevista realizada con el gerente técnico de la empresa, se obtuvo información relevante, así como datos históricos, los cuales señalan que la producción por ciclo de la granja es aproximadamente de 7.8 toneladas, cuenta con 26 estanques de diferente diámetro de los cuales 15.38% son dedicados a la venta y un 84.61% son destinados al cultivo, con una o dos cosechas al año y aumento en la demanda en las fechas de semana santa, verano, navidad y año nuevo.

La situación imperante de la granja piscícola es que existe incertidumbre y falta de control en el proceso de producción, desperdicio de capacidad de instalación y limitaciones en la toma de decisiones, teniendo un área de oportunidad en la utilización y asignación de los recursos.

El adecuado desarrollo y la rentabilidad de la acuicultura se ven influenciados por una gestión efectiva durante el proceso de cultivo. No obstante, la complicación de los sistemas acuícolas, derivada de diversas interacciones lo cual complica la predicción de las respuestas de la comunidad acuática a las modificaciones, especialmente cuando se emplean enfoques de análisis sencillos que se centran en un único factor estresante a la vez (Yang Youn, 2014).

Al existir múltiples estanques acuícolas con diferente capacidad, el manejo de las instalaciones de acuerdo con la temporada de producción, demanda y funcionamiento eficiente de la granja, se convierte en una problemática debido a que los peces deben cultivarse durante un largo período de tiempo hasta alcanzar un crecimiento adecuado para venderse en el mercado, debido a lo anterior la asignación del área de superficie del estanque durante la etapa de desarrollo, es decir, cuando y cuantos estanques utilizar, complica el problema a resolver (Yang Youn, 2015).

Por otra parte, la tasa de supervivencia de los peces disminuye al realizarse actividades como el desdoble de densidad de organismos o el cribado; proceso en el cual los peces se separan con función a su tamaño, peso, edad o grado de desarrollo que afectan directamente a la rentabilidad de la granja (Marques, et al., 2020).

Con base a estas variables biológicas la programación de la producción en granjas acuícolas se torna complicada cuando se incrementa la demanda, así como el número de estanques y el número de organismos cultivados, por esta razón existe poca información sobre este tema, volviéndola limitada o escasa.

1.2.2 Objetivos

A continuación, se exponen el objetivo general y los objetivos específicos de este estudio.

- **Objetivo general**

Diseñar un programa de la producción de Tilapia (*O. niloticus*) mediante la aplicación de algoritmos de secuenciación en una granja acuícola en el estado de Veracruz.

- **Objetivos específicos**

1. Determinar el tiempo de crecimiento de la Tilapia en función de datos históricos y el coeficiente térmico de crecimiento.
2. Estimar el tiempo promedio de cosecha de organismos por lote en cada estanque de cultivo y compararlo con el modelo de crecimiento térmico.
3. Determinar la capacidad de carga en los estanques de producción, considerando variables como la biomasa y el volumen.
4. Estimar los costos de producción asociados a un periodo de cultivo.
5. Aplicar algoritmos de secuenciación a las órdenes de pedido para los períodos de mayor demanda.
6. Diseñar una aplicación informática para la programación de la producción de Tilapia.

1.2.3 Justificación

La acuicultura en tierra está restringida por una alta producción de organismos, decisiones en la programación del cultivo de Tilapia (*O. niloticus*), se ven afectadas por condiciones biológicas, por lo cual, es necesario diseñar un programa de producción. Al programar la producción, se pueden controlar factores como el tamaño, la densidad de población y la alimentación de los peces, lo que puede influir en la tasa de crecimiento de los animales acuáticos (Gentry, et al., 2016).

La sobreproducción o la subproducción de peces pueden resultar en pérdidas económicas significativas y también pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente (Crespo Guerrero & Jiménez Pelcastre, 2021), con base en esto, una programación adecuada puede ayudar a garantizar que la producción de peces sea sostenible, rentable y eficiente, aunado que una producción apropiada de organismos puede ayudar a satisfacer la creciente demanda estacional o temporal contribuyendo a la seguridad alimentaria.

Con base al enfoque gerencial, programar la producción está directamente relacionado con la eficiencia y rentabilidad en términos de tecnología de acuicultura a fin de maximizar las ganancias (Yang Youn, 2015).

En cuanto a los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030, al programar la producción se puede minimizar los impactos negativos en el medio ambiente, maximizando los beneficios económicos para las comunidades locales y contribuyendo a la seguridad alimentaria global (ONU, 2015).

Capítulo 2. Marco teórico

En el segundo capítulo del proyecto de tesis, se exploran los conceptos y técnicas de las herramientas de Ingeniería Industrial empleadas en el desarrollo. Además, se expone el estado actual de la aplicación de estas herramientas en el ámbito acuícola, basándose en la revisión bibliográfica realizada.

2.1 Acuicultura

La acuicultura es la práctica de criar organismos acuáticos, tanto animales como vegetales, en un ambiente controlado. Este proceso incluye la intervención humana en la reproducción para aumentar la producción, e implica actividades como la siembra, la alimentación y la protección de los organismos contra depredadores (Rueda González, 2011).

Por otro lado, Gabriel Luciano (2013) describe a la acuicultura como una actividad que abarca diversas disciplinas, dado que se configura como una empresa eficiente que aprovecha los conocimientos en biología, ingeniería y economía.

El inicio de la acuicultura se origina en la necesidad de preservar los peces capturados en su entorno natural hasta que estuvieran listos para su comercialización. En el siglo XIV, se dieron los primeros pasos hacia la modificación del proceso natural mediante la fecundación artificial de huevos de trucha en Francia. No obstante, la reproducción en cautividad de la trucha no se logró hasta el siglo XIX. Inicialmente, estos avances se llevaron a cabo en centros de investigación gubernamentales de varios países, con un enfoque principalmente dirigido a la repoblación de ríos y lagos. Con el tiempo, estas técnicas se trasladaron al ámbito privado y se aplicaron a la producción con fines comerciales (Rueda González, 2011).

2.2 Acuicultura mundial

La producción acuícola mundial continuó creciendo durante 2020, 2021 y 2022, sin ser afectada por la pandemia de COVID-19. En 2022, alcanzó un récord de 130.9 millones de toneladas, con un valor de 312.8 mil millones de USD. Esta cifra incluye 94.4 millones de

toneladas de animales acuáticos y 36.5 millones de toneladas de algas. Por primera vez, la producción acuícola de animales superó la captura, alcanzando 94.4 millones de toneladas en comparación con 91 millones de toneladas capturadas en años anteriores. El aumento en la producción acuícola de 2022 se debe principalmente a Asia, que representó el 87.9% del incremento total, seguido por contribuciones menores de otras regiones. Los peces representaron el mayor aumento en la producción, seguidos por los crustáceos y moluscos (FAO, 2024).

En la Figura 2. 1 se muestra la distribución y tendencia de la producción de especies acuáticas cultivadas, agrupadas por tipo principal, en los ámbitos de acuicultura continental, marina y costera, durante el periodo de 1990 a 2022.

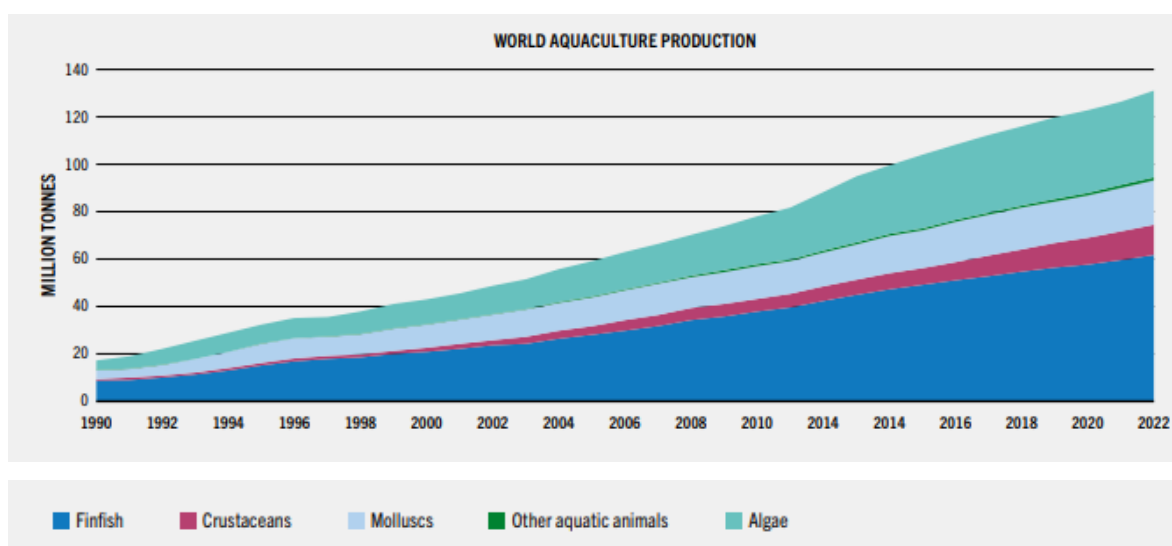


Figura 2. 1 Producción acuícola mundial 1990 – 2022. Fuente: FAO, 2024.

Además, este incremento ha tenido repercusiones positivas tanto en la economía como en la sociedad. Ha generado empleo y ha contribuido a la producción de alimentos de alta calidad destinados al consumo humano. Por su parte, la acuicultura desempeña una función esencial en los esfuerzos para combatir la hambruna al proporcionar alimentos y contribuir a mejorar la salud y la calidad de vida de las personas (Ovando Solís, 2013).

2.3 Acuacultura en México

En México, la expansión notable de la producción acuícola comercial ha sido evidente en los últimos años. Este aumento se atribuye al considerable potencial de desarrollo que la acuacultura posee en el país, respaldado por la abundancia de recursos naturales, como costas, lagunas y cuerpos de agua interiores, un clima propicio para el cultivo de diversas especies comerciales, la proximidad al principal mercado global de productos pesqueros (Estados Unidos) y la presencia de especies nativas con características excelentes para la acuacultura (Ovando Solís, 2013).

En México, la producción acuícola se distribuye en 23 de los 32 estados, destacando Morelos, Nayarit, Jalisco, Veracruz y Yucatán como los principales productores. Morelos lidera la producción, generando alrededor de 30 millones de peces anuales de 62 especies diferentes, con el 70% destinado a la exportación. Las especies prominentes incluyen camarón (261,958 toneladas) y Tilapia (101,749 toneladas), siendo Sinaloa y Nayarit los estados líderes en producción (SADER, 2022).

2.4 Cultivo de Tilapia

La Tilapia es un pez micrófago, es decir, que se alimenta de pequeñas partículas o microorganismos, también puede comer alimentos artificiales con una conversión aproximada de 1 a 1.8 kg, lo que significa que se necesitan 1.8 kg de alimento para producir 1 kg de pescado, cabe mencionar que esta eficiencia en el uso del alimento es rara en otras especies de peces. La especie tiene un crecimiento rápido e ininterrumpido en zonas donde la temperatura en invierno no sea inferior a 18 °C, aunado que su crecimiento se puede acelerar suministrando fertilizantes y alimento artificial, como granos y harinas (García Trejo, 2019; Melo Benavides, 2022).

La Tilapia es un pez ideal para la acuacultura industrial, ya que crece rápidamente y se puede adaptarse a diferentes ambientes. Además, se utiliza para una diversidad de propósitos como lo es la producción de fuentes de alimento, controlar las malezas acuáticas, y se presenta como un modelo biológico para la investigación (Jácome, et al., 2019).

Las tres especies de Tilapia más cultivadas en estanques son: la Tilapia de Mozambique (*Oreochromis mossambicus*), la Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y la Tilapia azul (*Oreochromis aureus*). Estas especies son populares por su rápido crecimiento, adaptabilidad y facilidad de cultivo. En México, se han realizado experimentos con tres especies de cíclidos nativos del estado de Tabasco y tres especies de Tilapia, los resultados de estos experimentos mostraron que los organismos alcanzan un tamaño comercial en un rango de 6 a 8 meses (Ferreira Santos, et al., 2019).

Por otra parte, la infraestructura empleada en los cultivos de Tilapia varía desde estanques de geomembrana, concreto o rústicos, hasta jaulas y estanques flotantes. La fuente de agua proviene de pozos, estanques, manantiales o ríos. La producción de Tilapia se realiza en ciclos de 5 a 6 meses, con uno o dos ciclos por año. El 62% de las granjas de Tilapia se dedica a la fase de engorda y el 38% combina engorda y crianza. La producción semi-intensiva constituye el 83% del total, mientras que la intensiva y extensiva representan el 14% y el 3%, respectivamente (Sosa, et al., 2016).

2.5 Alimentación de la Tilapia.

La Tilapia se alimenta de manera natural de organismos vivos presentes en su entorno acuático, tales como fitoplancton (plantas microscópicas), zooplancton (animales microscópicos) e insectos, cuya presencia se incrementa mediante la fertilización del agua. Además, es posible complementar su dieta con alimentos suplementarios, como raciones comerciales para pollos y cerdos, salvado de arroz, restos de cocina sin procesar, tortas de semillas oleaginosas y otros subproductos y desechos agrícolas (Saavedra Martínez, 2006).

El esquema de alimentación de la Tilapia es un tema complejo que aún no se ha aclarado por completo, la alimentación a saciedad (*Ad Libitum*) es una forma común de alimentar a las Tilapia, ya que se cree que optimiza el crecimiento de los peces. Sin embargo, investigaciones han demostrado que los costos de alimentación pueden reducirse suministrando a los peces una tasa del 70% de alimentación, sin disminuir significativamente el crecimiento (Aguilar Aguilar, 2010).

La relevancia de la alimentación en la estructura de costos de los sistemas de producción animal es fundamental, especialmente en aquellos donde la intensificación requiere el empleo de dietas y programas de alimentación a gran escala para optimizar el rendimiento productivo de los animales y su rentabilidad. Este contexto es igualmente aplicable a la producción industrial de Tilapia, donde en la actualidad se desarrollan y diseñan sistemas de alimentación que incorporan aspectos como el contenido de nutrientes, la disponibilidad de biomasa, la frecuencia de alimentación, el comportamiento alimenticio y el tipo de procesamiento (Aguilar Aguilar, 2010; Salazar Murillo, et al., 2023).

2.5.1 Estrategias de alimentación de la Tilapia

La evolución de la Tilapia y, por lo tanto, la eficacia en la utilización de los alimentos se ven influenciadas por múltiples factores, cuya regulación a menudo resulta complicada. Estos factores incluyen la cantidad de alimento suministrado, la temperatura, la densidad de siembra, el estrés, la disponibilidad de oxígeno, la competencia con otros peces, entre otros. Una de las relaciones más importantes para los criadores de peces es aquella que describe la conexión entre el crecimiento del pez y la cantidad de alimentos suministrados (Saavedra Martínez, 2006). A continuación, se describe como las distintas raciones de alimento afectan el crecimiento diario del pez:

- Ración cero (ayuno): Se produce una disminución en el crecimiento, lo que implica una pérdida de peso por parte del pez.
- Ración de mantenimiento: La cantidad de alimento suministrada apenas equilibra la pérdida de peso, lo que resulta en un estado en el que el pez no experimenta ni ganancia ni pérdida de peso.
- Ración máxima: A medida que se incrementa la cantidad de alimento destinado al crecimiento, el desarrollo del pez también aumenta hasta alcanzar un límite, más allá del cual el pez no seguirá ganando peso, sin importar cuánto alimento adicional se le suministre.
- Ración óptima: Se refiere al punto situado entre la ración de mantenimiento y la ración máxima, donde la relación entre el crecimiento y la cantidad de alimento es óptima, o de manera inversa, donde la relación entre la cantidad de alimento y el

crecimiento (factor de conversión) es mínima. En este punto, el pez experimenta un crecimiento con la máxima eficiencia, aunque este sea inferior al registrado en la ración máxima.

2.5.2 Factor de conversión alimenticia

El factor de conversión alimenticia (FCA) es la métrica más común para evaluar la eficiencia en la utilización del alimento. La FCA, influenciada no solo por la calidad de la dieta y las prácticas de manejo, sino también por la cantidad de alimento suministrado, muestra variaciones dependiendo de la edad del pez. Los valores óptimos se observan en peces jóvenes, y la FCA tiende a aumentar gradualmente a medida que el pez envejece, alcanzando su punto máximo cuando el pez alcanza su peso máximo y deja de crecer (Saavedra Martínez, 2006).

En la acuicultura, la alimentación representa un componente crucial que incide significativamente en el 60% de los costos de producción. Esto implica que el factor de conversión alimenticia, que evalúa la cantidad de alimento necesaria para producir 1 kg de carne, es más eficiente cuando se acerca a la unidad. Por otro lado, valores superiores a la unidad indican un mayor gasto en alimento, lo que puede provocar alteraciones en la calidad del agua (Zafra Trelles, et al., 2019).

Zafra Trelles, et al., (2019) encontró que con diferente alimento balanceado en un sistema cerrado se emplearon un total de 20.38 kg de alimento balanceado comercial, el cual tenía un contenido de proteína entre un rango del 35% al 28% y reportaron obtener una biomasa final de 14.04 kg, con un factor de conversión alimenticia de 1.4 kg.

Dado que el factor de conversión alimenticia depende directamente de la tasa de crecimiento, el estudio de las curvas de crecimiento de la Tilapia es esencial para comprender la relación entre la alimentación y el desarrollo de los organismos. Las cuales, permiten visualizar y proyectar los incrementos de biomasa en función del tiempo (Barragán, et al., 2017).

2.6 Crecimiento en peces

El crecimiento permite a los peces aumentar su tamaño y peso, lo cual impacta la dinámica poblacional al mejorar su supervivencia y fecundidad. Los peces de crecimiento rápido pueden evitar depredadores y reproducirse antes, aumentando su éxito reproductivo (Granados Flores, 2006).

La curva de crecimiento de los peces es típicamente sigmoidea, con un rápido aumento inicial seguido de una desaceleración en la adultez. Algunas especies pueden continuar creciendo después de alcanzar la madurez, influenciadas por factores ambientales y genéticos. En la Figura 2. 2, se muestra que el punto de inflexión de la curva marca el cambio de fase entre aceleración y desaceleración del crecimiento, representando el momento de máxima tasa de crecimiento absoluto (Arce Vega, 2014).

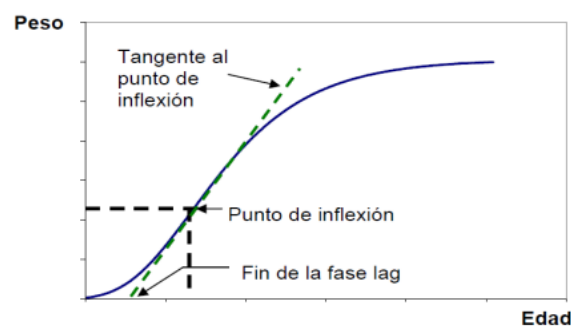


Figura 2. 2 Curva de crecimiento sigmoidea. Fuente: Arce Vega (2014).

El crecimiento de la Tilapia está influenciado por diversos factores que son difíciles de controlar, tales como la cantidad de alimento, la temperatura, la densidad de siembra, el estrés, la disponibilidad de oxígeno y la competencia con otros peces (Saavedra Martínez, 2006). Entre estos, la temperatura es fundamental, ya que afecta directamente su metabolismo y, en consecuencia, su desarrollo. Si bien la tilapia es un pez poiquiloterma, su metabolismo se ralentiza cuando las temperaturas son bajas, lo que impacta negativamente sus procesos fisiológicos (Kaneshima González, et al., 2022).

2.6.1 Coeficiente Térmico de Crecimiento (CTC)

En acuicultura, el estudio del efecto de la temperatura sobre el crecimiento de los peces se remonta a inicios del siglo XX. Behrdek, (1930) introdujo el concepto de unidades térmicas para analizar cómo la temperatura influye en el desarrollo y eclosión de los huevos en salmónidos. Posteriormente, Iwama & Tautz, (1981) ampliaron este concepto para estimar el crecimiento después de la eclosión. En 1998, Cho & Bureau propusieron el Coeficiente Térmico de Crecimiento (CTC), una medida de acumulación térmica que evalúa el crecimiento de los peces en función de la temperatura efectiva del entorno (Arce Vega, 2014). La adaptación de la fórmula para incorporar la temperatura efectiva a la que se expone el animal se expresa en la siguiente ecuación:

$$CTC = \left[\frac{Pf^{1/3} - Pi^{1/3}}{\sum^{\circ}Ce} \right] \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

Donde: CTC es el coeficiente de crecimiento térmico, Pf peso final y Pi peso inicial de la Tilapia y °C ef es la temperatura efectiva del agua y t es el tiempo.

2.7 Capacidad de carga de cultivo

Equilibrar la producción de alimentos con la preservación de la integridad de los ecosistemas acuáticos requiere calcular la capacidad de carga que estos pueden soportar durante el cultivo de peces (Rojas Carrillo & Aguilar Ibarra, 2012). Este concepto establece limitaciones, ya sea en términos del tamaño de una población debido a la disponibilidad limitada de recursos, o en la capacidad de los ecosistemas para absorber los desechos generados por actividades humanas (Riascos, et al., 2012).

En el ámbito de la acuicultura, la determinación de la capacidad de carga es un requisito esencial. Este concepto hace referencia al máximo número de individuos de la población cultivada que el entorno puede mantener durante un período determinado, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por los factores físicos y ambientales. La precisa evaluación o estimación de esta cantidad posibilita calcular con anticipación el potencial productivo de un cuerpo de agua, con miras a su posible uso en piscicultura, y ajustar los procedimientos

operativos para prevenir la degradación de la calidad del agua (Riascos, et al., 2012; Rojas Carrillo & Aguilar Ibarra, 2012)

Para poder estimar la capacidad de carga se han desarrollado modelos matemáticos que buscan mantener ciertos parámetros ambientales considerados críticos dentro de límites predefinidos y aceptables desde la perspectiva de la calidad del agua y el conjunto de organismos y procesos vinculados al lecho o fondo de un cuerpo de agua. Estos modelos adolecen de una característica crucial: la descripción explícita a lo largo del tiempo, ya que proponen una solución en estado estacionario, dado que las variables y los parámetros pueden experimentar cambios con el tiempo, como el incremento en la alimentación de los peces, crecimiento o muerte de los peces, aumento o disminución en la temperatura, entre otros factores (Riascos, et al., 2012).

2.8 Transferencia de peces

En poblaciones de Tilapia en granjas acuícolas, se ha observado que la variabilidad en el tamaño de los individuos propicia la formación de grupos sociales con relaciones de dominancia-subordinación. Este fenómeno resulta en que los peces de menor tamaño sean presionados por los de mayor tamaño, afectando su alimentación y crecimiento. Además, la competencia entre cohortes de diferentes tamaños genera estrés en los grupos subordinados, impactando negativamente en su ingesta de alimentos y eficiencia de conversión alimenticia. Para mitigar estos efectos, en las granjas de Tilapia se implementa la graduación de individuos por tallas, separando a los peces en grupos más homogéneos dentro del mismo estanque para mejorar la producción (Villavicencio, et al., 2017).

En el contexto de la acuicultura, donde el traspaso de peces, la capacidad de carga, la alimentación y otras características son fundamentales para el éxito del sistema, es esencial profundizar en el análisis de las interrelaciones entre estos elementos. Los sistemas dinámicos ofrecen un marco teórico sólido para analizar cómo las variables en la acuicultura evolucionan y se afectan mutuamente a lo largo del tiempo.

2.9 Sistemas dinámicos

La dinámica de sistemas se originó en los años 50 a raíz de un estudio encargado por una empresa estadounidense al MIT, liderado por Jay W. Forrester, la empresa estaba preocupada por los comportamientos contradictorios en la evolución de sus pedidos y los efectos negativos resultantes en la organización, después de resolver con éxito este problema, Forrester formalizó la metodología, inicialmente conocida como dinámica industrial. En la década de los 60, la aplicación de esta metodología se expandió más allá de los sistemas industriales, reconociendo su aplicabilidad a diversos sistemas sociales, debido a esta ampliación de su alcance, la dinámica industrial fue rebautizada como dinámica de sistemas, en esencia, la dinámica de sistemas guía el estudio de cómo las políticas, decisiones, estructuras y demoras se entrelazan para influir en el desarrollo y estabilidad de los sistemas (Cadenas Anaya & Guaita, 2020; González, 2016).

Un sistema dinámico se caracteriza como un conjunto de elementos que, organizados, generan un comportamiento común que se desarrolla a lo largo del tiempo. Además, un sistema se define como un conjunto de componentes interconectados que trabajan juntos para cumplir una función específica (Gabriel Luciano, 2013).

La dinámica de sistemas permite entender cómo funcionan los sistemas complejos. Para ello, se centra en el estudio de las relaciones entre los elementos del sistema y cómo estas relaciones dan lugar al comportamiento del sistema, en otras palabras, identifica los elementos del sistema y sus relaciones lo que permite comprender cómo funciona el sistema en su conjunto y analiza cómo las acciones realizadas sobre el sistema afectan a su comportamiento permitiendo predecir cómo se comportará el sistema en el futuro (García & Sterman, 2003).

Como se muestra en la Figura 2. 3, los sistemas reciben información, energía o materia del entorno como entradas y proporcionan información, energía o materia como salidas. Cada sistema, al encontrarse dentro de uno más grande, puede constar de subsistemas y partes, al mismo tiempo que puede formar parte de un sistema superior. La existencia de límites o fronteras distingue o aísla a los sistemas del entorno, ya sea física o conceptualmente. La

naturaleza de un sistema como abierto o cerrado depende de si hay intercambio a través de su límite con el entorno (Imués Figueroa, 2013).

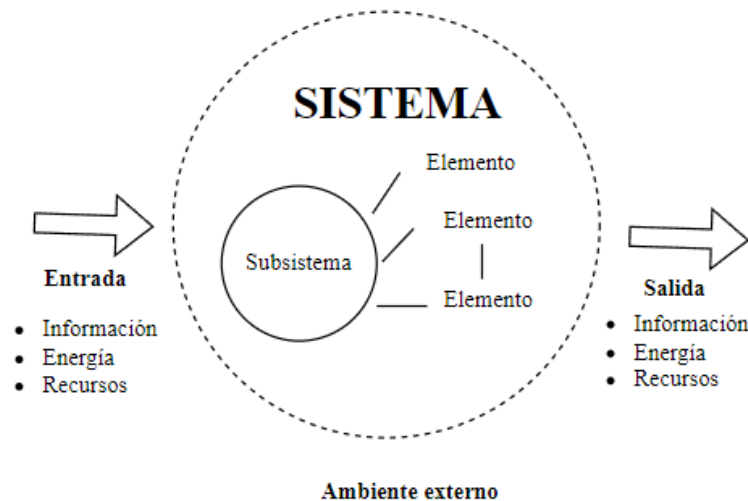


Figura 2. 3 Concepción general de un sistema físico. Fuente: Imués Figueroa (2013).

La frontera de un sistema define los elementos que están dentro y fuera de él. Cualquier elemento o componente que no esté bajo el dominio del sistema y no sea controlable se ubica fuera de su frontera, convirtiéndose en una entrada para el sistema. Aquello que no forma parte del sistema puede ser parte de su sistema superior o simplemente no estar relacionado (Imués Figueroa, 2013). El análisis típico de estos sistemas se lleva a cabo mediante modelos, que son representaciones simplificadas construidas extrayendo los elementos clave que influyen en el comportamiento del sistema, según sus objetivos específicos (Gabriel Luciano, 2013).

2.9.1 Modelo de un sistema

La información recopilada sobre las características, componentes, estructura y comportamiento de un sistema en relación con su entorno puede considerarse un modelo del sistema, lo que permite crear una representación comprensiva de dicho sistema (Cadenas Anaya & Guaita, 2020). Un modelo es una representación simplificada del funcionamiento de un sistema real, que incluye solo los atributos y las interacciones pertinentes con un nivel de precisión adecuado. Su objetivo principal es responder a preguntas específicas, elucidar teorías, evaluar hipótesis o describir una parte concreta del sistema (Soto Castillo, 2015).

Además, los modelos permiten realizar análisis de sensibilidad para identificar los elementos del sistema que pueden tener un impacto significativo en su comportamiento, ayudando a identificar los factores clave que influyen en el (García & Sterman, 2003).

Los modelos matemáticos son claros y concisos, ya que utilizan un lenguaje preciso y sin ambigüedades. Por su parte, los modelos de dinámica de sistemas son aún más explícitos, ya que exponen de forma clara las hipótesis sobre las que se basan y las relaciones entre sus elementos. Esto los hace susceptibles de discusión y revisión (Imués Figueroa, 2013). Antes de establecer relaciones algebraicas, es esencial crear un modelo conceptual que organice la información y facilite la comprensión de las interrelaciones entre los elementos del modelo. Este modelo conceptual, representado por un diagrama de bucle causal, actúa como un mapa claro del sistema, mostrando todos sus componentes y las interacciones entre ellos mediante elementos y flechas. Este enfoque no solo ayuda en la organización de la información, sino que también facilita el razonamiento sobre el comportamiento del modelo (Soto Castillo, 2015).

2.9.2 Diagrama causal

El diagrama causal es una representación gráfica que incluye todos los elementos esenciales del sistema y sus relaciones mutuas. Después de comprender las variables del sistema y las posibles relaciones causales entre ellas, se procede a visualizarlas en el diagrama. Las conexiones entre las variables se indican con flechas, y cada flecha lleva consigo un signo (+ o -) que señala el tipo de influencia que una variable ejerce sobre la otra (García & Sterman, 2003; Jaén, 2017).

Así cuando un incremento de A produce un incremento de B, o bien una disminución de A provoca una disminución de B, tendremos una relación positiva, lo representamos como se muestra en la Figura 2. 4:



Figura 2. 4 Relación positiva - diagrama causal. Fuente: García & Sterman, (2003).

Y cuando un incremento de A produce una disminución de B, o bien una disminución de A provoca un aumento de B, tendremos una relación negativa, lo representamos como se ilustra en la Figura 2. 5.



Figura 2. 5 Relación negativa - diagrama causal. Fuente: García & Sterman, (2003).

2.9.3 Retroalimentación causal

Los bucles de retroalimentación pueden manifestarse de manera positiva, como en los procesos de crecimiento, donde un resultado genera un incremento mayor, ya sea positivo o negativo. Estos bucles son intrínsecos y están vinculados, lo que conduce a la consecución de un objetivo deseado. Se corrige el rumbo en cada iteración cuando los resultados obtenidos no concuerdan exactamente con los previstos, hasta alcanzar el cumplimiento de la meta del sistema. En este tipo de modelos, la estructura y el comportamiento del sistema son indisolubles, lo que da lugar al concepto de causalidad, representado mediante diagramas circulares de causa-efecto o de retroalimentación (Jaén, 2017).

Una secuencia cerrada de conexiones causales recibe el nombre de bucle, retroalimentación o feedback. La clasificación de los bucles se basa en si el número de relaciones negativas es par (llamados bucles positivos) o impar (llamados bucles negativos) como se muestra en la Figura 2. 6, similar a la multiplicación ($-a \times b = -c$). Los bucles negativos actúan como estabilizadores de los sistemas, guiándolos hacia un objetivo específico, mientras que los bucles positivos los vuelven inestables, independientemente de la situación inicial. En la realidad, los sistemas suelen contener ambos tipos de bucles, y su comportamiento final dependerá de cuál predomine en un momento dado (García & Sterman, 2003).

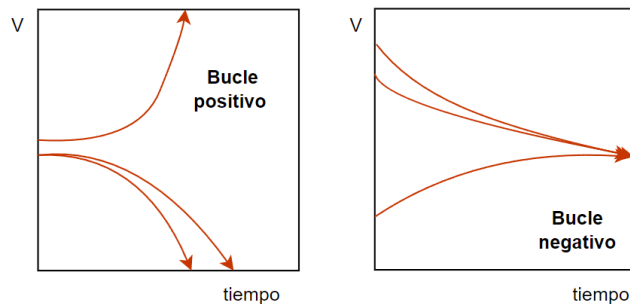


Figura 2. 6 Bucles de retroalimentación. Fuente: García & Sterman, (2003).

- **Factor limitativo o fronteras**

El factor limitativo es un componente del sistema que actualmente restringe el crecimiento del sistema. Este factor varía en cada momento, y con el tiempo, diferentes elementos del sistema pueden desempeñar el papel de factores limitativos, también son conocidos como fronteras del sistema (Soto Castillo, 2015).

- **Factores clave**

En un sistema, hay varios elementos clave que generalmente permanecen constantes a lo largo del tiempo. Estos elementos pueden utilizarse para lograr cambios significativos en el sistema con un esfuerzo mínimo y, a veces, pueden desencadenar comportamientos extremos en el sistema. La particularidad de estos factores clave radica en su ubicación en puntos o aspectos inesperados, lo que puede dar lugar a acciones contraproducentes. Explicar este fenómeno con un diagrama causal resulta complicado, ya que parece deberse más a la dificultad de interpretar el comportamiento de un sistema definido, donde el efecto de las interrelaciones supera la capacidad de análisis (Soto, 2015; García & Sterman, 2003).

Ponce et al., (2005) desarrollaron un modelo bioeconómico fundamentado en la teoría de la dinámica de sistemas. En dicho modelo, sostienen que este enfoque proporciona una representación simplificada pero objetiva de la dinámica de una actividad específica, permitiendo evaluar escenarios antes de tomar decisiones que conlleven cierto grado de riesgo. En este contexto, los sistemas dinámicos se revelan como una herramienta altamente beneficiosa en el ámbito de la acuicultura y pueden ser aplicados de diversas maneras, incluida la planificación en la producción acuícola. Los modelos dinámicos ofrecen la capacidad de prever la producción de peces considerando variables cruciales como la

temperatura del agua, la alimentación y la densidad poblacional. Este conocimiento resulta esencial para la toma de decisiones fundamentadas en lo que respecta a la planificación de la producción dentro de este sector específico (Dorantes de la O, 2022).

2.10 Planificación de la producción

La planificación de la producción es un proceso que se lleva a cabo de manera constante con el fin de anticipar y tomar decisiones que optimicen el uso de los recursos productivos. Este proceso se enfoca en las decisiones tácticas que se toman a mediano plazo para determinar las actividades y requerimientos que la empresa necesitará para cumplir sus propósitos, en otras palabras, se trata de un proceso continuo que busca mejorar la eficiencia y rentabilidad de la empresa mediante el uso adecuado y óptimo de sus recursos (Zuluaga Castro, 2020).

Kessler & Arlinghaus (2022), indicaron que la planificación de la producción es un problema que ha sido objeto de numerosos estudios, ya que permite a los fabricantes mejorar las ganancias de la empresa a través del uso eficiente de sus elementos de fabricación. Además de determinar los recursos necesarios para futuras operaciones de manufactura, el proceso de toma de decisiones en la planificación de la producción también permite coordinar eficazmente todas las actividades productivas para optimizar los objetivos empresariales. Esto a su vez permite que los recursos se asignen a la producción cuando sea necesario, al menor costo posible (Guzmán, et al., 2022)

El enfoque convencional de planificación de la producción sigue una estructura jerárquica para tomar decisiones y determinar los plazos involucrados. Este enfoque busca coordinar de manera vertical los objetivos estratégicos, tácticos y operativos. Además, se busca que exista una relación horizontal entre las distintas áreas de la empresa para una mejor organización (Zuluaga Castro, 2020). La clave para lograr un uso adecuado de la capacidad de la planta es mediante la planificación efectiva en combinación con la estricta programación de la producción, la mejora continua, así como empleados eficientes (Render & Heizer, 2014).

Durante muchos años, investigadores y analistas de la industria han presentado interés por la planificación de la producción. Para afrontar esta cuestión, se han propuesto varios enfoques

para formular y resolver problemas vinculados con la programación de producción, (Guzmán, et al., 2022) señalan que desarrollar modelos para problemas reales es complejo y la solución es difícil en la mayoría de los casos. Por lo tanto, se han creado diversas técnicas y métodos para encontrar diferentes soluciones.

Entre los distintos métodos para planificar la producción, algunos de los más comunes son:

- Planificación basada en la necesidad o en la demanda: este método usa los datos actuales de demanda de servicios para proyectarlos sobre el futuro. Simplemente se proyecta el pasado sobre el futuro, en otras palabras, explota datos históricos de ventas y pronostica la demanda futura para planificar la producción (Fernández, 2020).
- Planificación basada en el inventario: es un método que se basa en la cantidad de inventario disponible y como este puede ser utilizado para cumplir con la demanda, con la finalidad de minimizar las existencias en almacenes y de esta forma garantizar una producción eficiente (Álvarez Sánchez & Toledo Diez, 2018).
- Planificación just in time: es una filosofía de gestión de operaciones, enfocada en la producción de bienes o servicios justo en el momento en que se requieren, utilizando cantidades mínimas de inventario, eliminando desperdicios, dando hincapié a la mejora continua (Ríos Vallejos, 2020).
- Planificación MRP (Material Requirements Planning): el centro de atención aquí es la planificación de requerimientos de materiales, es un método lógico que dispone de datos de demanda y de inventario para estimar o calcular las necesidades de materiales, componentes o número de piezas para programar la producción (Peña Ramos, 2021).
- Programación de la producción por procesos: este método se utiliza en procesos de producción donde se sigue una secuencia fija de operaciones. Se basa en la planificación y control de la producción en función de las capacidades de cada proceso, y en asegurarse de que el proceso de producción fluya de manera suave y continua (Zuluaga Castro, 2020).

Moreno (2019) llevó a cabo el diseño de planeación de producción de truchas, con el objetivo de reducir costos, mortandad y sobrepoblación por medio del método planificación MRP, con la finalidad obtener respuesta a cuánto y cuándo pedir alevines para la producción de trucha, concluyendo que trabajar mediante sistemas de planificación se traducen en una administración más organizada y ordenada.

2.11 Programación de la producción

La planificación y programación de la producción son herramientas cruciales en la toma de decisiones para la mayoría de las empresas, estas herramientas pueden tener un impacto significativo en la productividad de un proceso. La meta de la planificación de la producción en la industria manufacturera es reducir los costos y el tiempo de producción. Para lograrlo, es necesario tomar decisiones sobre qué hacer, cuándo hacerlo, quién lo hará y qué equipo se utilizará. De esta manera, la programación de la producción en empresas de servicios como por ejemplo el transporte público, se centra en incrementar la eficiencia y disminuir costos de operación (De la Peña, 2021).

Render & Heizer (2014), señalan que cuando las empresas crean programas para satisfacer las necesidades de los clientes, el objetivo del programa de producción se enfoca en producir piezas en tiempos cortos de preparación, con poco trabajo en proceso y un alto uso de las instalaciones, considerando todos los recursos y equipos disponibles, tomando como punto de partida la planificación de la capacidad de la empresa.

2.12 Criterios de programación

Las buenas técnicas de programación deben ser sencillas, flexibles, realistas, fáciles de entender y llevar a cabo. La técnica adecuada de programación deriva de factores como los volúmenes de pedidos, la complejidad de las operaciones y trabajos, así como la importancia asignada a cada uno de los criterios descritos a continuación, (Render & Heizer, 2014).

1. Reducir al mínimo el tiempo de terminación.
2. Disminuir al mínimo el tiempo de espera del cliente

3. Aminorar los niveles de inventario.
4. Utilizar al máximo adecuadamente la capacidad de las instalaciones con base a la demanda.

La teoría de la programación se enfoca en encontrar la asignación más adecuada de los recursos limitados a las actividades a largo plazo. En los problemas de programación, se presentan situaciones donde hay una serie de trabajos que deben ser programados en máquinas que tienen ciertas restricciones, con el propósito de optimizar una función objetivo específica. El objetivo de la programación es establecer un programa que determine cuándo, cuánto y en qué máquina se realizará cada trabajo (Marín López, 2022).

La programación de la producción tiene dos fases: la secuenciación y la programación. La secuenciación implica la asignación de recursos en el tiempo para llevar a cabo un conjunto de tareas específicas, y se realiza después de la planificación de la producción, que establece los productos a fabricar, las cantidades y los recursos disponibles. La secuenciación es fundamental para el éxito de las empresas en la programación de la producción (Escobar John, 2020).

En otras palabras, el programa de producción se puede entender como una asignación de tareas o trabajos en máquinas (asignación), el orden temporal en el que se deben ejecutar un conjunto de tareas o actividades (secuenciación), por último, el resultado de los tiempos de inicio y fin de cada tarea o trabajo (programación).

2.13 Secuenciación de trabajos

Una vez que se asignan las actividades en un centro de trabajo, los gerentes de operaciones deben determinar el orden en que deben realizarse. Este proceso se conoce como secuenciación o “despacho” y se logra mediante la especificación de reglas de prioridad para liberar o despachar trabajos a cada centro o área de trabajo (Render & Heizer, 2014).

Chase & Jacobs (2014) denominaron secuenciación o secuencia por prioridades al procedimiento utilizado para establecer el orden de los trabajos en una máquina o centro de

trabajo. Las reglas de prioridad son utilizadas para determinar la secuencia de los trabajos, y pueden ser muy básicas, como ordenar los trabajos por tiempo de procesamiento, plazo o por orden de llegada.

2.14 Reglas de prioridad para secuenciar los trabajos

Tigreros Cardenas (2021), propuso que las reglas de prioridad son utilizadas principalmente en instalaciones centradas en el proceso con el objetivo de minimizar el tiempo de finalización, reducir el número de trabajos en el sistema y disminuir el retraso de los trabajos, al mismo tiempo que maximizan la utilización de las instalaciones, entre las reglas de prioridad más populares se encuentran:

1. FIFO (First In, First Out): Primero en entrar, primero en salir, las actividades se realizan en el orden en que llegan.
2. SPT (Shortest Processing Time): Tiempo de procesamiento más corto. En esta regla las actividades con los tiempos de procesamiento más pequeños se asignan primero.
3. EDD (Earliest Due Date): Fecha de entrega más próxima el trabajo. La fecha de entrega más cercana se establece primero.
4. LPT (Longest Processing Time): Tiempo de procesamiento más largo. Las actividades con los tiempos de procesamiento más extensos asignan primero.

2.15 Secuenciación de trabajos en máquinas

La secuenciación de trabajos en máquinas, comúnmente conocida como *scheduling*, implica asignar los recursos disponibles en el tiempo de manera óptima para mejorar un aspecto específico del rendimiento (Tigreros Cardenas, 2021).

Existen varios algoritmos utilizados en la secuenciación de trabajos en la planificación de la producción. Algunos de los algoritmos más comunes son los siguientes:

- Secuenciación de una máquina, (algoritmo de Smith): la situación consta de una sola máquina y cada trabajo requiere solamente una operación, por lo que no hay problemas de asignación, pero sí de definir el orden en que deben ejecutarse los trabajos (secuenciación) (Fanjul Peyró, 2010).

- Secuenciación de n trabajos en 2 máquinas (algoritmo de Johnson): la regla de Johnson es una técnica que permite minimizar el tiempo de procesamiento de una serie de trabajos que pasan por dos centros de trabajo, además, reduce el tiempo de inactividad total en las máquinas (Render & Heizer, 2014). Para aplicar la regla de Johnson, es necesario seguir cuatro pasos:
 1. Se crea una lista de todos los trabajos y su tiempo de procesamiento en cada máquina.
 2. Se selecciona el trabajo con el menor tiempo de procesamiento. Si el menor tiempo de procesamiento está en la primera máquina, ese trabajo se programa primero; si está en la segunda máquina, se programa al final.
 3. Una vez que se programa un trabajo, se elimina de la lista.
 4. Por último, se aplican los pasos dos y tres a los trabajos restantes, trabajando hacia el centro de la secuencia.
- Secuenciación de N trabajos en M máquinas: este algoritmo toma en consideración las condiciones empíricas del sistema de manufactura, como el momento en el que se recibe una orden de producción, así como los recursos de procesamiento que pueden estar ocupados con trabajos u órdenes anteriores. En consecuencia, la secuencia de los lotes y los trabajos que los conforman se determina de acuerdo con la disponibilidad de los recursos de trabajo (Mirasierra Calleja, 2020).

Para llevar a cabo estos trabajos, resulta fundamental considerar ciertos supuestos fundamentales que establecen los parámetros adaptados a modelos específicos (Torres, et al., 2008). Estos supuestos incluyen:

1. Cada máquina realiza una única tarea a la vez, lo que implica que la siguiente tarea debe esperar hasta que el recurso esté disponible para su ejecución.
2. Los trabajos son autónomos entre sí, y sus respectivas tareas deben seguir una secuencia establecida.
3. Es indispensable contar con una descripción detallada de cada tarea con anticipación, obtenida a través de un análisis de métodos y tiempos.
4. Los tiempos de preparación de las máquinas no están influenciados por la secuencia de las tareas y se incluyen en los tiempos de ejecución.

5. Una vez que se inicia una tarea, no se interrumpe; en su lugar, se espera a que se complete antes de pasar a la siguiente actividad.

Guzmán, et al., (2022) sugieren que una eficaz planificación, programación y secuenciación de la producción son elementos clave para el desempeño de las empresas manufactureras. Debido a las demandas cambiantes del mercado, la producción se ha vuelto cada vez más desafiante, ya que las empresas buscan reducir el uso de recursos y ofrecer productos de calidad, al tiempo que responden rápidamente a las necesidades del mercado. Por otra parte, Madrid Plata (2019) menciona que, la secuenciación de actividades o tareas en la programación de la producción deben establecerse considerando las restricciones simultáneas, ya que estas pueden afectar la secuencia en la que se planifican o ejecutan las acciones.

2.16 Planificación de producción en piscifactorías

La planificación y programación de la producción en sistemas biológicos, como la acuicultura, presentan un desafío significativo debido a su gran complejidad (Luna, et al., 2020). La eficiencia en este sector está influenciada por una combinación de factores ambientales y biológicos, incluyendo la especie cultivada, la alimentación y los métodos de manejo utilizados en las granjas. Desde una perspectiva de ingeniería acuícola, la mejora de la eficiencia operativa se aborda principalmente desde una base biológica (Yang Youn, 2014).

Un ejemplo notable es la Tilapia, que ha logrado una difusión considerable en la acuicultura global. Según Rueda Liberato (2023), la Tilapia, en todas sus especies, es uno de los grupos de peces más importantes en la acuicultura, ubicándose en segundo lugar después de las carpas. Este pez se distingue por su rápido crecimiento con dietas balanceadas, su facilidad de reproducción y cultivo en sistemas intensivos y su capacidad para resistir tanto la baja calidad del agua como diversas enfermedades, lo que la convierte en una especie económicamente eficiente y de fácil manejo.

Otro punto es que al igual que en los sectores ganadero, agrícola y forestal, el crecimiento diario de las especies desempeña un papel fundamental en la producción de la industria acuícola (Hernández, et al., 2007). Prieto Mojica (2022) menciona que, monitorear el crecimiento de los peces es un aspecto crucial en la acuicultura, ya que está sujeto a múltiples variables, las cuales incluyen el peso de los peces, la temperatura del agua, los niveles de alimentación, la calidad y cantidad del agua y oxígeno, la composición de la dieta, la densidad poblacional y las condiciones del entorno.

Según el estudio de Hernández (2007), muestra que el tiempo de cosecha de peces y la cantidad de ración de alimento dependen estrechamente de la temperatura del agua y las fechas de siembra. Por otro lado, Nuñez, et al., (2021) afirma que la calidad del agua se establece a través de características fisicoquímicas, siendo la temperatura y el nivel de oxígeno dos de los aspectos más significativos. En el caso de la Tilapia (*Oreochromis niloticus*), las temperaturas ideales para su crecimiento oscilan entre 20 y 30 °C, aunque algunas especies pueden tolerar temperaturas más bajas. Sin embargo, por debajo de los 15 °C, el crecimiento se ve gravemente afectado, mientras que para una reproducción óptima se requieren temperaturas entre 26 y 29 °C (Rueda Liberato, 2023).

La concentración de oxígeno disuelto adecuada para la Tilapia se sitúa entre 5.0 y 7.0 mg/L, pero a medida que disminuye el nivel de oxígeno en el agua, la ingesta de alimento y el crecimiento de los peces se ven comprometidos. Además, existe una relación inversa entre la temperatura del agua y la solubilidad del oxígeno, ya que, a mayor temperatura, menor solubilidad del oxígeno. Paralelamente, el consumo de oxígeno por parte de los peces aumenta conforme lo hace la temperatura del agua, lo que exige un ajuste cuidadoso de las condiciones para mantener un equilibrio adecuado (Nuñez, et al., 2021).

González (2023), destaca que los productores pueden optimizar el crecimiento y la supervivencia de la Tilapia ajustando la temperatura del agua para maximizar el consumo de oxígeno y reducir los costos energéticos. Además, seleccionar peces de tamaño adecuado contribuye a mejorar la eficiencia del consumo de oxígeno y a minimizar la mortalidad, lo que beneficia tanto la productividad como la sostenibilidad del cultivo.

Por otra parte, Seginer, et al., (2008) indican que una de las alternativas para controlar la temperatura y la concentración del oxígeno disuelto es mediante el agua de refresco (recambios de agua en estanques), el cual es usado en los sistemas acuícolas de recirculación (RAS) principalmente para purgar las impurezas, los malos olores, agregar alcalinidad y regular parámetros fisicoquímicos. No obstante, mencionan que al realizar recambios de agua en estanques frecuentemente, los costos incrementan y para intentar disminuir la tasa de renovación de agua, es necesario recurrir a equipos especiales que permitan suministrar oxígeno y eliminar los metabolitos, como el amoníaco y el dióxido de carbono.

Finalmente, Yang Youn (2014), mediante un modelo matemático, estipuló que para poder divergir el tanque en el que se cultiva el límite de organismos, es importante determinar la biomasa máxima que se puede cultivar de manera efectiva en un cuerpo crítico permanente (CSC).

Además, el uso y asignación eficiente de estanques y recursos hídricos son factores cruciales para la toma de decisiones económicas debido a que la escala de inversión de capital en las instalaciones agrícolas es grande y el tamaño de instalaciones es limitado. En ese sentido el problema de la planificación de producción de combina con variables relacionadas con la ingeniería acuícola e ingeniería económica (Yang Youn, 2014).

Capítulo 3. Metodología

3.1 Descripción del lugar de estudio

La granja acuícola utilizada en este estudio se encuentra en la comunidad de Tierra Adentro, perteneciente a la Congregación de Joachín, en el municipio de Tierra Blanca, Veracruz. Está ubicada en las coordenadas 18°39'26" de latitud norte y 96°17'58" de longitud oeste, a una altitud de 63 m, con un área de influencia aproximada de 1000 hectáreas entre los paralelos 18°38'53" N y 18°39'51" N, y los meridianos 96°18'18.54" O y 96°16'43.34" O, en la zona UTM 14. La región tiene un clima cálido subhúmedo, con una temperatura promedio de 27.4 °C. La precipitación media anual es de 1573 mm, concentrándose principalmente en la mitad del año.

3.2 Tipo de investigación

La investigación llevada a cabo tiene un enfoque cuantitativo, por la naturaleza numérica y mensurable de los datos recopilados, y descriptiva por su capacidad para proporcionar un análisis detallado de cada elemento examinado, incluyendo sistemas y subsistemas, así como sus relaciones de dependencia e influencia.

3.3 Método de recopilación de información

A continuación, en la Figura 3. 1 se muestra el procedimiento empleado para llevar a cabo la revisión de la literatura, comenzando con la evaluación de 26 trabajos, empleando palabras clave generales como "planificación de la producción, simulación, acuacultura, modelos, gestión de la producción, optimización de la producción, herramientas de planificación, software", para determinar la pertinencia de los artículos para este estudio. Se limitó la selección de fuentes de información a libros, artículos y tesis de acceso abierto. Además, se decidió enfocar la búsqueda en material que su fecha de publicación fuera superior al 2012. Obteniendo como resultado 8 referencias de investigación que abarcan tesis y artículos científicos. Sin embargo, no se encontró evidencia de modelos que consideren la planificación de la producción en acuacultura bajo diversos escenarios de manejo.

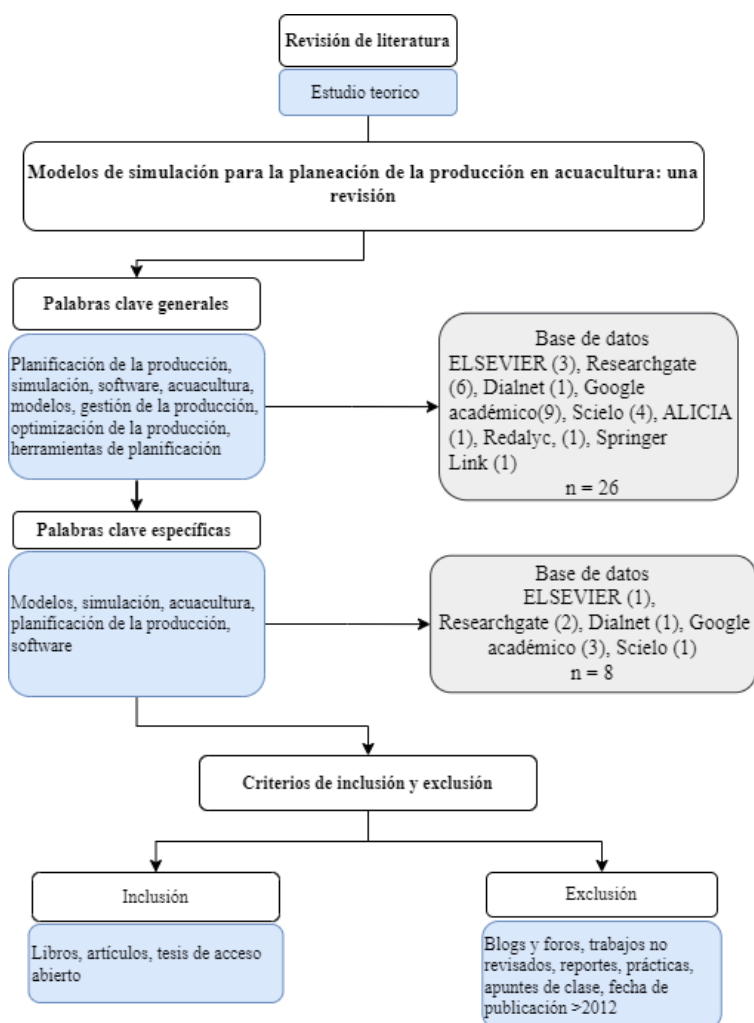


Figura 3. 1 Metodología de la revisión de literatura.

3.4 Abordaje metodológico

La programación de la producción comienza con una descripción conceptual y causal del sistema, identificando los componentes que lo conforman y las interacciones entre ellos. A continuación, se realiza la búsqueda, identificación y selección de modelos representativos más adecuados para los cálculos, tomando en consideración tanto datos históricos como propuestas basadas en la definición de parámetros seleccionados que constituyen el modelo. Esto permite establecer la capacidad de carga en los estanques de producción, estimar el tiempo de crecimiento, calcular el tiempo promedio de cosecha por lote y proyectar los costos de producción vinculados a cada ciclo de cultivo.

Una vez que el modelo ha sido validado con parámetros reales, se efectúan simulaciones del cultivo, implementando algoritmos de secuenciación para lograr una programación mensual que optimice el uso de recursos y tiempos de producción. Para asegurar su accesibilidad y facilidad de uso, el modelo se ha desarrollado en Microsoft Excel, ya que es una herramienta ampliamente disponible en la mayoría de los equipos, lo cual facilita su adopción y aplicación por parte de los usuarios.

3.4.1 Enfoque teórico del modelo

El modelo planteado se fundamenta en los enfoques de Ponce, et al., (2005) y Dorantes de la O, (2022), estructurándose en dos tipos de datos de entrada que permiten realizar simulaciones adaptadas y precisas. El primer tipo corresponde a las variables exógenas, las cuales representan factores externos sobre los cuales el modelo no tiene control directo, ya que están sujetos a influencias externas y eventos no predecibles. Por otro lado, el modelo incorpora parámetros dinámicos, configurables por el usuario, que facilitan la personalización de las simulaciones según las necesidades específicas de cada escenario (Dorantes de la O, 2022). Estos parámetros interactúan entre sí, generando una naturaleza dinámica en el modelo y permitiendo una mayor adaptabilidad y precisión en los resultados obtenidos.

El modelo, además, se organiza en cuatro submodelos principales: biológico, de manejo, de riesgo y económico como se muestra en la Figura 3. 2. Cada uno de estos submodelos está constituido por parámetros clave como el crecimiento de los organismos o la temperatura, entre otros, que se ajustan específicamente al proceso de engorda de Tilapia, proporcionando una evaluación exhaustiva de las variables biológicas, prácticas de manejo, factores de riesgo y aspectos financieros del sistema de producción.

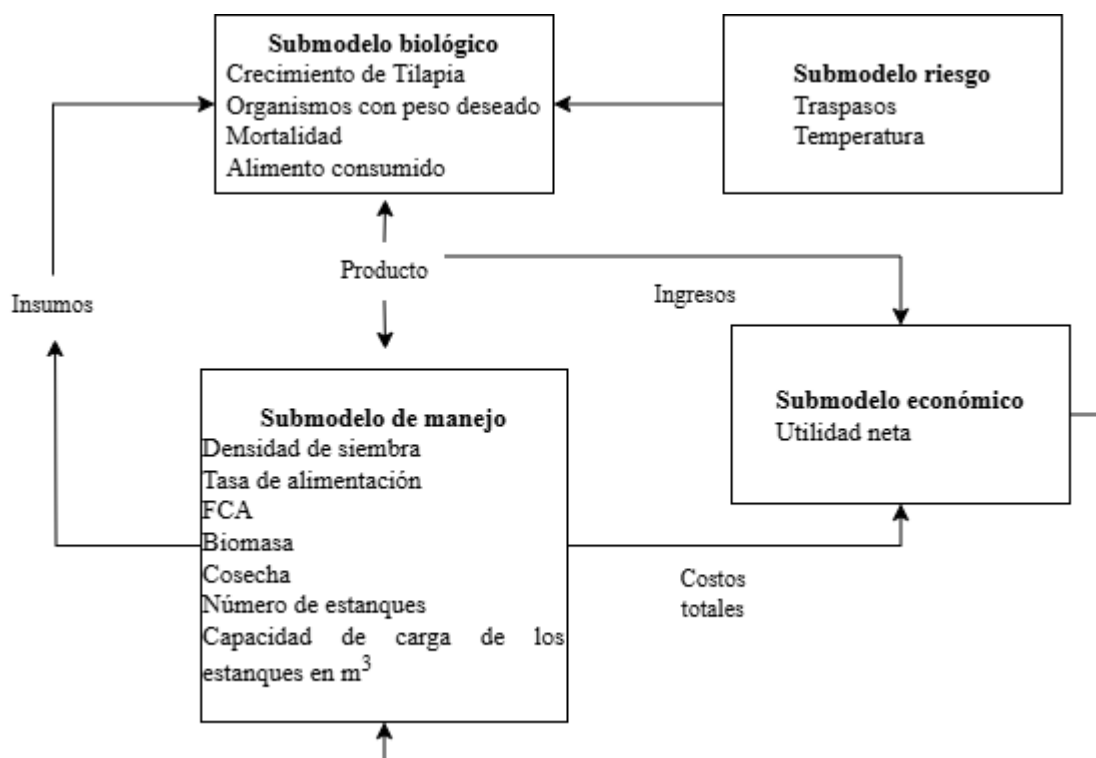


Figura 3. 2 Modelo conceptual e identificación de componentes. Adaptado de Ponce, et al. (2005).

3.4.2 Caracterización del sistema de producción

Con base al modelo conceptual se realizó la caracterización del sistema de producción utilizando un enfoque de dinámica de sistemas, basado en la modelación de la dinámica de ecosistemas propuesta por Scheel (1998) y Forrester (1961). Esta metodología permitió modelar y analizar la complejidad del sistema de producción, así como comprender las relaciones e interacciones entre sus componentes. Para ello, se realizó una descripción conceptual del modelo, identificando tanto los componentes del sistema como las interacciones entre ellos. Se desarrolló un diagrama conceptual y causal que representará las relaciones entre las variables clave del sistema y los bucles de retroalimentación. Esto facilitó la identificación de las interacciones críticas que influyen en el comportamiento general del sistema, proporcionando una base sólida para el análisis posterior.

3.4.3 Origen de los datos

Para garantizar el correcto funcionamiento y la validación del modelo de programación de la producción, fue fundamental realizar ajustes basados en datos reales. Estos datos se obtuvieron tanto de bases de datos del sistema de producción de la U.P.A. como de entrevistas realizadas al gerente de la empresa.

- **Recolección de información histórica**

La obtención de datos históricos de la empresa incluyó información sobre el perfil térmico de los estanques y registros de producción. Esta información se obtuvo a partir de documentos internos de la organización, tales como reportes de producción, registros de ventas, inventarios e informes financieros.

- **Datos en tiempo real**

Para que el modelo de programación de la producción pueda evaluar distintos sistemas de engorda, los cuales presentan características biológicas, productivas y económicas diversas, se diseñó un esquema de “entrevista” que permite al usuario ingresar datos específicos en cada uno de los submodelos que componen el modelo general. Este mecanismo facilita la generación de diferentes escenarios y simulaciones, lo que permite adaptar el modelo a la información actual proporcionada por el usuario.

En la Tabla 3. 1 se muestra el apartado de las características de producción donde se introducen parámetros clave como el mes de siembra, peso inicial y final de los organismos, la fecha de siembra o cosecha deseada, el peso requerido para transferir las Tilapias a la etapa de engorda y el Factor de Conversión alimenticio, lo cual dará pauta simular en tiempo real.

Tabla 3. 1 Características generales de producción para planificar.

Características de producción	Cantidad	Unidad
Número de cultivo:	1	
Nombre del lote:	ITO/ERICK	
Mes de siembra:	Octubre	
Demanda mensual:	1000	kg
¿Cuál es el peso inicial de los organismos?:	1	gr

¿Cuál es el peso final estimado de los organismos?:	500	gr
¿Qué fecha desea utilizar para la planificación?:	Siembra	
¿Cuál es la fecha en la que va a sembrar?	01/01/2025	
Peso con el que desea transferir a engorda:	15	gr
Tasa de mortalidad considerada:	10.00%	(%/semana)
FCA observado de cultivos anteriores:	1.42	

En la Tabla 3. 2 se muestra los datos de entrada para obtener información sobre la capacidad de carga en los estanques de producción, donde se recopilan datos específicos de cada proceso, tales como: el número de estanques, la densidad teórica de operación deseada (mínima, media o máxima), la forma del estanque (circular o rectangular), el diámetro del estanque circular o la base (longitud) del estanque rectangular, la altura desde el suelo, y el espesor en estanques rectangulares (representando su ancho). Con esta información, se obtiene el cálculo del área, el volumen y la densidad teórica de cada estanque la cual ayuda a distribuir de manera eficiente la cantidad de organismos en función de su densidad óptima.

Tabla 3. 2 Datos de entrada para obtener información sobre la capacidad de carga en los estanques de producción para determinar la capacidad de carga.

Características de los estanques	Cantidad	Unidad
¿Cuántos estanques tiene disponibles para la etapa de siembra?	4	
¿Con qué densidad teórica desea operar (siembra)?:	máx.	org/m ³
Forma de los estanques de siembra:	Circular	
Diámetro de los estanques de siembra:	3.1	m
Altura de los estanques de siembra:	1.2	m
Espesor de los estanques de siembra:	0	m
¿Cuántos estanques tiene disponibles para la etapa de engorda I?	12	
¿Con qué densidad teórica desea operar (engorda I)?:	min	org/m ³
Forma de los estanques de engorda I:	Circular	
Diámetro de los estanques de engorda I:	6.1	m
Altura de los estanques de engorda I:	1.2	m
Espesor de los estanques de engorda I:	0	m
¿Cuántos estanques tiene disponibles para la etapa de engorda II?	3	
¿Con qué densidad teórica desea operar (engorda II)?:	máx.	org/m ³
Forma de los estanques de engorda II:	Circular	
Diámetro de los estanques de engorda II:	4	m
Altura de los estanques de engorda II:	1.2	m
Espesor de los estanques de engorda II:	0	m

Para obtener información sobre los costos de producción asociados a un período de cultivo, se responde a preguntas sobre costos indirectos (energía, agua, mantenimiento y alimentación) y costos directos (personal y materia prima), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. 3 Datos de la información económica para la obtención de los costos de producción.

Información económica	Cantidad	Unidad
¿Cuál es la potencia que utiliza su sistema de bombeo de agua?	40	HP
¿Cuántas horas se mantiene encendido el sistema de bombeo?	4	hrs
¿Cuál es el costo estimado que tiene por día?	\$ 0.60	\$/día
¿Cuál es la potencia que utiliza su sistema de aireación de agua?	5	HP
¿Cuántas horas se mantiene encendido el sistema de aireación?	12	hrs
¿Cuál es el costo estimado que tiene por día?	\$ 1.50	\$/día
¿Cómo realiza el pago de agua?	Mensual	
¿Cuál es el costo de agua?	0	\$/mensual
¿Cuál es el costo considerado para mntto por ciclo?	\$ 2,100.00	\$/ciclo
¿Cuál es el precio del alimento "WZ 4516 - 1.5 mm"?	\$ 32.80	\$/kg
¿Cuál es el precio del alimento "WZ 4010 - 2.5 mm"?	\$ 18.61	\$/kg
¿Cuál es el precio del alimento "WZ 3506 - 3.5 mm"?	\$ 12.90	\$/kg
¿Cuál es el precio del alimento "WZ 3006 - 3.5 mm"?	\$ 10.78	\$/kg
¿Cuál es el precio del alimento "WZ 2506 - 5.5 mm"?	\$ 10.13	\$/kg
¿Cuál es el número actual de trabajadores acuícolas?	1	
¿Cuántas horas diarias trabajan?	8	hrs/día
¿Cuántos días trabajan a la semana?	6	días/semana
¿Qué salario mensual perciben?	\$ 9,372.30	mensual
¿Contrata personal temporal/extra en este ciclo de producción?	No	
¿Cuál es la tarifa por salario de personal temporal?	0	\$/día
¿Cuál es la duración de la contratación temporal?	0	días
¿Cuál es el precio unitario de compra de los organismos a sembrar?	\$ 0.90	\$/org
¿Cuál es su costo estimado de ventas?	\$ 5,000.00	
¿Cuál es el precio de venta por kg de tilapia?	\$ 70.00	\$/kg

3.4.4 Modelo matemático representativo

El modelo matemático representativo se basa en cuatro submodelos principales: biológico, de manejo, de riesgo y económico. Estos submodelos permiten identificar y seleccionar las representaciones más apropiadas para los cálculos, integrando tanto datos históricos como parámetros específicos que definen el sistema.

Submodelo biológico

Este submodelo se centra en la función biológica del crecimiento en peso de la Tilapia, lo que permite simular la ganancia o pérdida de peso bajo diversas condiciones dentro del sistema de cultivo. Los modelos matemáticos seleccionados para este submodelo, desarrollados a partir de datos históricos y el uso del coeficiente de crecimiento térmico, incorporan factores clave como el peso inicial (al momento de la siembra), el peso final (en la cosecha), la temperatura, y el tiempo necesario para alcanzar el peso objetivo.

Crecimiento en peso mediante datos históricos

Utilizando registros históricos de producción, se desarrollaron curvas de crecimiento que representan el sistema a lo largo del tiempo. A partir de estas curvas, se seleccionaron los modelos matemáticos representativos que mejor y peor estiman los tiempos de cosecha mediante una matriz de priorización basada en los siguientes pasos:

1. Definición del objetivo: Seleccionar el modelo que mejor estime los tiempos de cosecha.
2. Identificación de criterios: Definir los factores relevantes para la selección.
3. Ponderación de criterios: Asignar una importancia relativa a cada criterio.
4. Evaluación y puntuación de opciones: Analizar y puntuar las opciones de modelos según cada criterio.
5. Selección de la alternativa prioritaria: Identificar el modelo que mejor se ajuste a los objetivos establecidos.

Crecimiento en peso mediante el coeficiente de crecimiento térmico

El crecimiento en peso también se estima mediante un modelo propuesto por Iwama & Tautz (1981), desarrollado por Cho & Bureau (1998) y ajustado por Atwood et al. (2003). Este modelo considera la temperatura efectiva en la zona de estudio y permite simular la ganancia y pérdida de peso en diferentes intervalos. La fórmula empleada es la siguiente:

$$CTC = \left[\frac{Pf^{1/3} - Pi^{1/3}}{(^{\circ}C\ ef * t)} \right] \quad \text{Ecuación 3. 1}$$

Donde: CTC es el coeficiente de crecimiento térmico, Pf peso final y Pi peso inicial de la Tilapia y $^{\circ}C\ ef$ es la temperatura efectiva del agua y t es el tiempo.

Determinado el CTC se puede despejar el peso final de la ecuación anterior:

$$Pf = [Pi^{1/3} + (CTC * ^{\circ}C\ ef * t)]^3 \quad \text{Ecuación 3. 2}$$

Supervivencia en el sistema

La supervivencia de los organismos en el tiempo se modela en función de la información del productor. El tiempo de cultivo se establece en función del período requerido para que la Tilapia alcance el peso de cosecha solicitado. La fórmula empleada para modelar la supervivencia es:

$$N_t = N_0 * e^{\left(-\frac{M_e}{t_c}\right)*t} \quad \text{Ecuación 3. 3}$$

Donde: 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 de cultivo y t es el tiempo.

Estimación de alimento consumido y ración alimenticia

Para estimar la ración alimenticia, se utilizó la proyección de alimento proporcionada por el proveedor de materia prima, adaptada a un lote de 4,000 Tilapias la cual se muestra en el Anexo 1, esta será ajustada conforme al coeficiente de crecimiento térmico. El objetivo es

determinar la cantidad óptima de alimento en función de la biomasa necesaria, proporcionando una guía sobre el consumo adecuado.

Submodelo de manejo

Este submodelo se centra en calcular la capacidad de carga óptima de los estanques, tomando en cuenta factores clave como la biomasa y el volumen del agua disponible. Estos parámetros permiten evaluar el equilibrio entre la cantidad de organismos y el espacio adecuado para su crecimiento.

Capacidad de carga

Para determinar la capacidad de carga en los estanques de producción, considerando variables como la biomasa y el volumen, se realizó un cálculo teórico de capacidad. Este proceso presentó un desafío debido a la diversidad de estanques, los cuales presentan distintas capacidades, se encuentran en diferentes fases de cultivo, y cuentan con densidades de siembra variables. Esta complejidad dificulta la programación en cuanto a qué sembrar, en qué estanques y en qué cantidades. Para optimizar estos cálculos, se desarrolló una herramienta en Microsoft Excel que permite realizar las estimaciones de manera rápida y precisa, de acuerdo con la disponibilidad de estanques en la empresa. Esta herramienta y sus resultados se presentan en el apartado correspondiente.

Los cálculos realizados se basan en las recomendaciones de densidad de siembra para sistemas semi-intensivos de tilapia, según lo establecido por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2021) en el Diario Oficial de la Federación (Tabla 3. 4).

Tabla 3. 4 Densidad de siembra para Tilapia. Fuente: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, (2021).

Etapas de cultivo	Superficie de cultivo (org/m ²)			Densidad de cultivo (org/m ²) Min.	Densidad de cultivo (org/m ²) media	Densidad de cultivo (org/m ²) máx.
Siembra	350	-	850	100	125	150
Pre - engorda	450	-	1500	20	35	50
Engorda	1000	-	5000	10	20	30

Biomasa

El cálculo de la biomasa a través del tiempo se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$B_t = N_t * Pp_t \quad \text{Ecuación 3. 4}$$

Donde B_t es la biomasa a través del tiempo t , N_t el número de sobrevivientes y Pp_t el peso promedio de la Tilapia en el tiempo t .

Factor de conversión alimenticia

El FCA es un parámetro esencial en la producción animal, ya que indica la cantidad de alimento necesaria para producir un kilogramo de carne, permite una evaluación precisa de la eficiencia alimenticia en relación con la producción de biomasa en cada ciclo de cultivo. Este parámetro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$FCA = \frac{\text{Alimento total}}{\text{Biomasa cosechada}} \quad \text{Ecuación 3. 5}$$

Donde: FCA es el factor de conversión alimenticia al final del ciclo.

Submodelo económico

Para la estimación de los costos de producción se realizó una clasificación de los costos proporcionados por la empresa en directos e indirectos. Dado que la alimentación es una variable crítica, se calcularon estos costos a partir de la proyección de alimentación corroborando que los datos de consumo fueran reales mediante la Unidad de Producción Acuática (U.P.A.).

A partir de esta información, se estableció la ecuación y se desarrolló una aplicación informática que incorpora de costos totales y la utilidad neta del cultivo, permitiendo calcular los costos en diferentes períodos de acuerdo con las necesidades de la empresa.

Los costos considerados directos incluyen:

- Personal
- Materia prima
- Gastos de venta

Los costos indirectos son:

- Energía de bombeo
- Energía de aireación
- Agua
- Mantenimiento
- Alimentación

La ecuación para calcular los costos totales es:

$$\text{Costos totales} = \text{costos directos} + \text{costos indirectos} \quad \text{Ecuación 3. 6}$$

Para determinar la utilidad neta, se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{Utilidad} = \text{ingresos} - \text{costos totales} \quad \text{Ecuación 3. 7}$$

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

$$CT_{alim} = \sum_{t=1}^n Alim_t * Calim_t \quad \text{Ecuación 3. 8}$$

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.

Submodelo de riesgo

En el submodelo de riesgo, el productor estableció que solo se llevará a cabo un traspaso de la fase de siembra a la fase de engorda con el objetivo de reducir al mínimo el riesgo de mortalidad, este se realizará cuando el alevín tenga un peso promedio de 25 gramos. Además, se considerará una temperatura mínima de desarrollo de 17 grados Celsius para garantizar un entorno adecuado para el crecimiento de los organismos, dato promedio anual dentro de los límites establecidos para el desarrollo de la Tilapia.

3.4.5 Selección de los escenarios a evaluar

En la simulación, la Tabla 3. 5 presenta la selección de escenarios a evaluar, considerando diversas variables que impactan el ciclo de producción. Estas variables incluyen el peso inicial y final de los ejemplares, la tasa de mortalidad prevista a lo largo del ciclo, la demanda

mensual y la fecha de siembra planeada por el productor. Las alternativas evaluadas se estructuran de la siguiente manera:

- a) Dos volúmenes de cosecha: 600 kg y 1200 kg.
- b) Tres periodos de cosecha al año para el volumen de 1200 kg.
- c) Nueve periodos de cosecha al año para el volumen de 600 kg.
- d) Pesos iniciales de 1, 3 y 4 gramos.
- e) Pesos finales variables entre 500 y 600 gramos.

Tabla 3. 5 Escenarios a evaluar considerando diversas variables que impactan el ciclo de producción.

Nombre del lote:	Peso inicial (g)	Peso final (g):	Mortalidad natural (M) durante el ciclo:	Demanda mensual (kg):	Fecha deseada de siembra	FCA observado en períodos anteriores
ERICK	1	500	9%	600	01/01/2025	1.42
JA	4	600	12%	600	16/02/2025	1.55
EA	1	550	5%	600	10/03/2025	2.66
IT	1	510	13%	1200	10/04/2025	1.72
ELENA	4	600	15%	600	05/05/2025	1.77
NICA	1	550	10%	600	01/06/2025	3.33
ADEL	1	580	18%	600	08/07/2025	1.7
JA	3	540	10%	600	11/08/2025	1.37
OA	1	530	11%	1200	05/09/2025	1.4
EA	1	600	8%	600	15/10/2025	2.5
ED	3	600	12%	600	12/11/2025	1.89
SARA	3	580	11%	1200	19/12/2025	2.2

Para los períodos en los que la demanda se incrementa, especialmente en abril, se consideró el aumento de la demanda debido a la celebración de Semana Santa en México, una temporada en la que, por tradición y estrategias de mercadeo, la demanda del producto aumenta significativamente. En este contexto, se estableció un escenario con 5 pedidos, cada uno con diferentes fechas de entrega y pesos finales de los organismos requeridos como se muestra en la Tabla 3. 6.

Tabla 3. 6 Escenarios propuestos para la secuencia de prioridad.

Pedido	Fecha estimada de entrega:	Peso final requerido:
P1	13/04/2025	500
P2	17/04/2025	600
P3	18/04/2025	550
P4	19/04/2025	580
P5	20/04/2025	650

3.4.6 Aplicar los algoritmos de secuenciación

Se revisaron los algoritmos de Smith, Johnson y Palmer de los cuales solo el de Johnson permitió aplicar una analogía, debido a que organiza la secuencia de trabajos en dos máquinas. Esta aplicación se centró en los meses de mayor demanda, durante los cuales se realizan entregas diarias. En este contexto, se asoció la etapa de siembra con la "Máquina 1" y la etapa de engorda con la "Máquina 2". La analogía se adapta a un proceso biológico, en el que cada etapa de crecimiento debe respetarse como un taller de flujo.

La metodología del algoritmo de Johnson se implementa de la siguiente manera, (Render & Heizer, 2014):

1. Se elabora una lista de todos los trabajos y sus tiempos de procesamiento en cada máquina.
2. Se selecciona el trabajo con el menor tiempo de procesamiento. Si este tiempo corresponde a la primera máquina, el trabajo se programa al inicio; si corresponde a la segunda máquina, se programa al final.
3. Una vez programado un trabajo, se elimina de la lista.
4. Estos pasos se repiten para los trabajos restantes, avanzando hacia el centro de la secuencia.

Dado que en la etapa de siembra todos los peces se transfieren con el mismo peso y tiempo de procesamiento, la secuenciación se aplicará exclusivamente a los tiempos correspondientes a la etapa de engorda (Máquina 2). Esto permite priorizar el uso de los estanques en función del peso deseado de los organismos, y se sigue la regla de secuenciación

FIFO (First In, First Out), donde las actividades se ejecutan en el mismo orden en que fueron introducidas. Así, se asegura que los lotes de peces se procesen y completen en el mismo orden en que iniciaron su crecimiento.

3.4.7 Aplicación informática para la programación de la producción de Tilapia

Uno de los principales objetivos y la visión detrás del desarrollo de la programación de la producción de Tilapia en distintos sistemas de cultivo es proporcionar al productor información detallada, precisa y fácilmente comprensible. El productor es el grupo objetivo de este estudio, y se busca orientarlo con datos que faciliten la toma de decisiones informadas.

Con el fin de simplificar la vasta cantidad de información y datos numéricos disponibles para los productores, se diseñó un formato que actúa como un resumen de los datos relevantes. Este resumen incluye información productiva, económica y operativa, como:

- a. Fechas de siembra, transferencia y cosecha
- b. Biomasa producida
- c. Peso promedio de los organismos a cosechar
- d. Número de organismos cosechados por ciclo
- e. Factor de conversión alimenticia mínimo
- f. Consumo aproximado de alimento
- g. Costos de producción
- h. Número de estanques y densidad teórica de organismos

También en la aplicación informática del programa de producción, se diseñó una hoja de cálculo en la que el productor introduce datos como el número de pedidos, la fecha de cosecha estimada (que, de forma análoga, correspondería a la fecha de entrega del pedido) y el peso final requerido de los organismos del lote. Con esta información, se determina el tiempo de crecimiento de los organismos, o, en términos del algoritmo, el tiempo de procesamiento de cada tarea, utilizando los datos históricos obtenidos. Además, se determina la fecha en la que debe realizarse la siembra o iniciar cada tarea, permitiendo así una programación anticipada de la producción.

Capítulo 4. Resultados

Para poder efectuar cada uno de los objetivos propuestos inicialmente se realizó la caracterización del sistema de producción mediante el enfoque de dinámica de sistemas, basado en la modelación de la dinámica de ecosistemas propuesta por Scheel (1998) y Forrester (1961), ya que permite analizar y modelar el comportamiento de sistemas interrelacionados a lo largo del tiempo.

En el modelado conceptual, se definieron cuatro submodelos: biológico, de manejo, económico y de riesgo. Estos submodelos fueron fundamentales como partida para entender las relaciones causales y los bucles de retroalimentación en el sistema, además de identificar puntos críticos donde estas interacciones pueden impactar significativamente el comportamiento general del sistema.

4.1 Caracterización del sistema de producción

El sistema de producción de Tilapia puede caracterizarse como un sistema abierto, dinámico y que sirve a un propósito, debido a que interactúa con su entorno al recibir información sobre la calidad del agua y la disponibilidad de alimento, y al emitir datos de producción o requerimientos de recursos. Esta interacción constante refleja su naturaleza abierta, permitiendo la incorporación de nuevos problemas y ajustes influenciados por el entorno. Además, el proceso modela el comportamiento de la población de peces, influenciada por variables como la alimentación, temperatura y biomasa, generando cambios en la estructura del sistema y en las relaciones entre sus elementos a lo largo del tiempo, como el crecimiento y la mortalidad de los peces. Además, es creado y diseñado por el hombre para satisfacer necesidades.

4.1.1 Identificación de los componentes del sistema y la interacción existente entre ellos.

El modelo concebido se encuentra ajustado y respaldado por el enfoque propuesto por Ponce, et al. (2005), centrado en la consideración de parámetros dinámicos. Estos parámetros,

susceptibles de ser definidos por el usuario del modelo, posibilitan la realización de simulaciones específicas. Al existir interacciones entre dichos parámetros, adquieren una naturaleza dinámica, lo que enriquece la capacidad predictiva del modelo. La estructura adaptada del modelo comprende tres submodelos distintos: biológico, de manejo, económico y de riesgo.

Dentro del submodelo biológico, el parámetro de variación (el crecimiento de la Tilapia) se ve influenciado por la temperatura del agua y las transferencias, dado que estas últimas aumentan la mortalidad. En el submodelo de manejo, se considera la capacidad de carga y el número de estanques, los cuales condicionan la densidad de siembra. Esta densidad, a su vez, se ve afectada por la tasa de alimentación y el FCA (Factor de Conversión Alimenticia), lo que incide en la producción final, que es la biomasa y la cosecha Figura 4. 1.

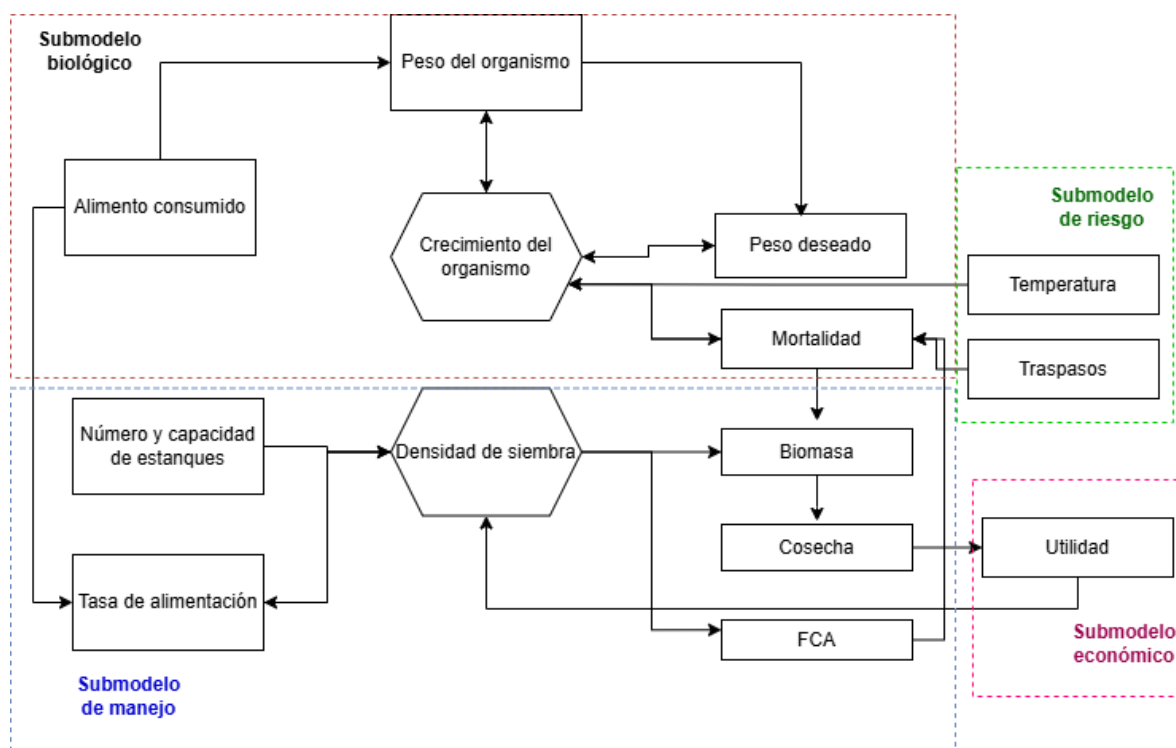


Figura 4. 1 Diagrama de flujo de la interacción de submodelos que conforman el sistema. Adaptado de Dorantes, (2022).

Para comprender de manera más detallada las relaciones causales y los lazos de retroalimentación positiva y negativa que pueden estar presentes en el sistema, así como de

los puntos críticos donde estas interacciones pueden generar cambios significativos en el comportamiento del sistema en su conjunto, se realizó el diagrama causal mostrado en la Figura 4. 2 mediante la modelación de la dinámica de ecosistemas de Scheel, (1998).

El ciclo de retroalimentación positiva muestra cómo variables como la temperatura óptima, la densidad de siembra y la capacidad de carga de los estanques afectan el crecimiento de las Tilapias. A medida que los organismos crecen, aumentan la biomasa cosechada y el número de tilapias, siempre limitado por el volumen y el número de estanques disponibles. Mientras que, el ciclo de retroalimentación negativa señala el requerimiento alimenticio y la eficiencia de la conversión alimenticia (FCA) determinan la cantidad de alimento necesario. Si la conversión no es eficiente, se necesita más alimento, lo que puede incrementar la mortalidad.

El diagrama también ilustra que es posible controlar el crecimiento y la supervivencia a través de trasposos y ajustes en el manejo de los estanques. Este sistema muestra cómo las variables interactúan en bucles de retroalimentación positiva (crecimiento) y negativa (control del sistema).

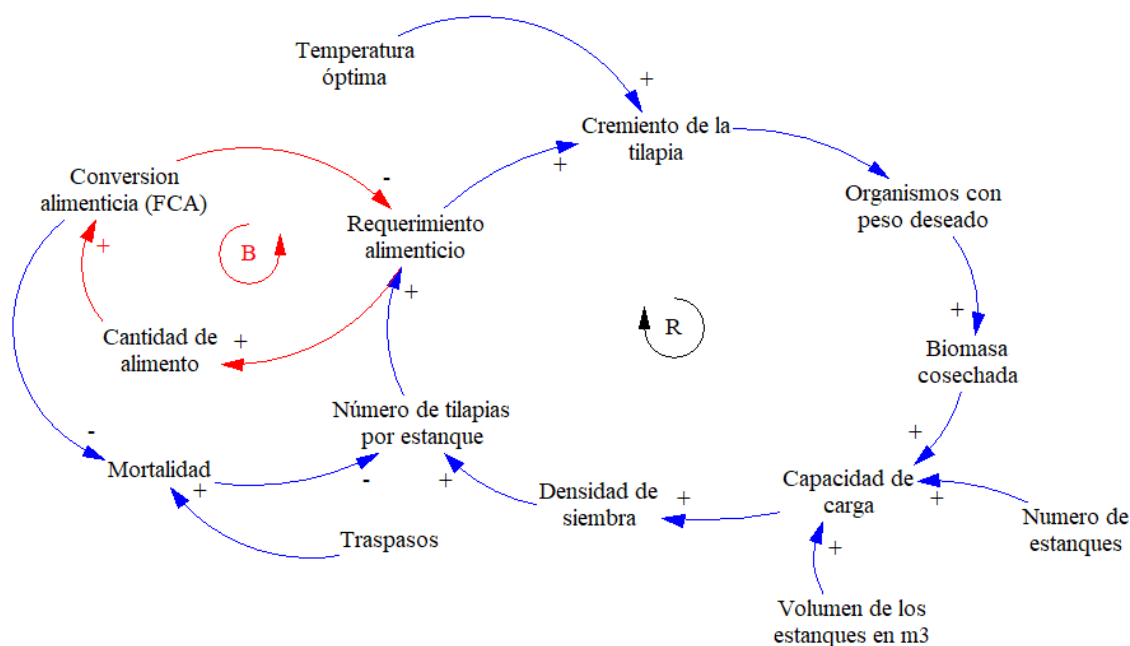


Figura 4. 2 Diagrama causal del sistema de producción de Tilapia.

4.2 Origen de los datos

Para lograr un funcionamiento y validación adecuados del modelo de programación de la producción, fue esencial ajustarlo utilizando datos reales provenientes del sistema productivo.

4.2.1 Recolección de información mediante datos históricos de la empresa

Los datos históricos recopilados incluyeron información sobre temperatura, cantidad de alimento y crecimiento de los lotes de organismos, los cuales se obtuvieron de los registros proporcionados por la empresa.

- **Datos históricos de temperatura**

Los datos del perfil térmico suministrados por la U.P.A. abarcan el intervalo temporal entre los años 2016 y 2019. Estos datos fueron objeto de análisis para determinar un promedio de temperaturas del agua de los estanques, categorizados por estación del año, (Tabla 4. 1).

Tabla 4. 1 Valores de la media de la temperatura por año/estación. Elaboración propia con información basada en Santana Carrión, (2023).

Año	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
2016			27.3	26.0
2017	29.3	29.8	27.1	25.6
2018	28.6		24.7	25.0
2019	27.1	27.1	27.1	25.9
μ=	28.3	28.5	26.5	25.6

- **Datos históricos del crecimiento de los organismos**

En el contexto del análisis del crecimiento de los organismos, la empresa suministró datos históricos de ocho lotes de producción de Tilapia durante un período comprendido entre los años 2016 y 2019, como se detalla en la Tabla 4. 2. Se evidencia que en el 50% de los lotes, la producción no alcanzó el objetivo establecido debido a interrupciones en el suministro eléctrico, lo que resultó en un aumento de la mortalidad de las especies. Esto se debió a la

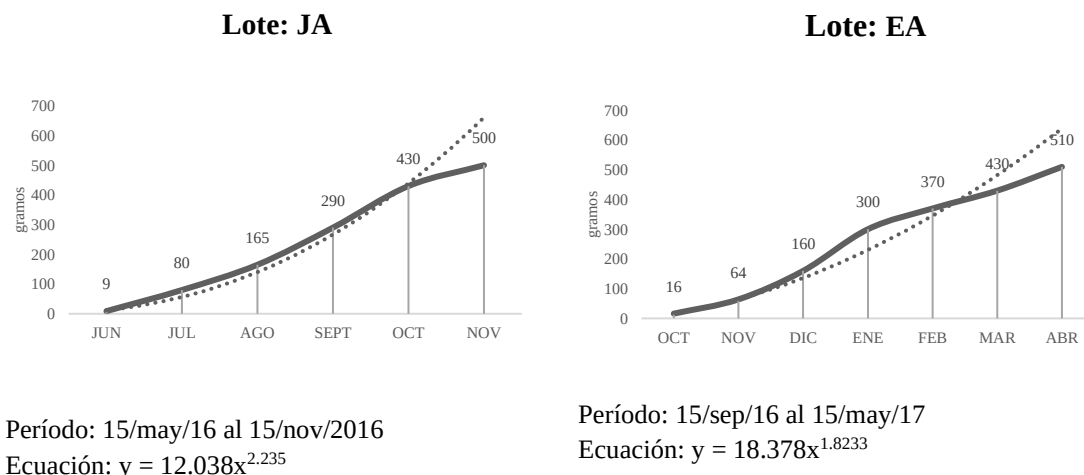
falta de funcionamiento de los aireadores, que son responsables de proporcionar oxígeno a los organismos, impactando directamente en la cantidad de biomasa cosechada.

Tabla 4. 2 Lotes de producción período 2016 – 2019.

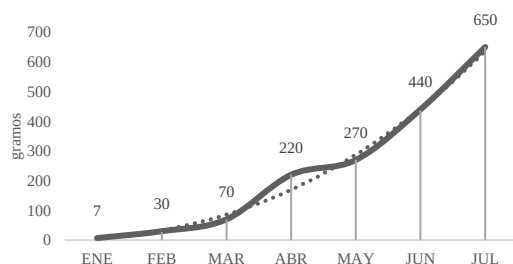
Periodo	Lote	Tamaño de lote (organismos)	Días de producción	Peso inicial (g)	Peso final (g)	FC A	Biomasa meta (kg)	Biomasa cosechada (kg)	Inconveniente
15/05/2016 - 15/11/2016	JA	4000	183	1	500	1.33	2000	2504	
15/09/2016 - 15/05/2017	EA	5000	213	1	510	1.5	2500	3076	
22/12/2016 - 27/07/2017	ED	5000	212	1	650	2.66	2500	908	Falla eléctrica
05/04/2017 - 17/10/17	ALICIA	5000	184	1	600	1.72	2500	2700	
17/07/17 - 17/01/18	ELENA	8000	215	1	550	1.77	4000	1930	Falla eléctrica
17/09/2017 - 15/05/2018	NICA	3000	212	3	500	3.3	1500	666	Falla eléctrica
5/12/2017 - 15/08/2018	ADELAIDA	5000	243	1	650	1.7	2500	1900	Falla eléctrica
15/11/18 - 15/07/2019	JA	4000	212	1	420	1.37	2000	2533	

Con base en los datos de la Tabla 4. 2, se generaron las curvas de crecimiento para los 8 lotes de producción de Tilapia, junto con sus respectivas ecuaciones de regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2), los cuales se presentan en la Tabla 4. 3.

Tabla 4. 3 Curvas de crecimiento históricos para estimar el tiempo de producción.



Lote: ED

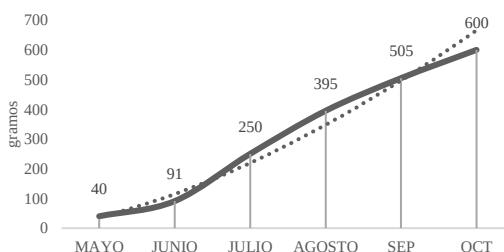


Período: 22/dic/2016 al 27/jul/17

Ecuación: $y = 6.4154x^{2.3625}$

R²: 0.9906

Lote: ALICIA

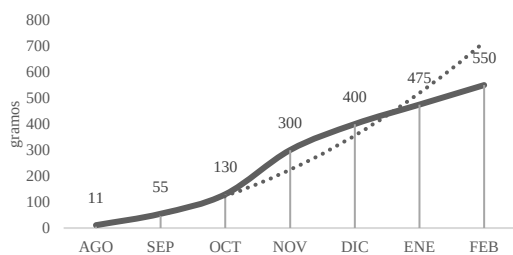


Período: 5/abr/17 al 17/oct/17

Ecuación: $y = 37.689x^{1.6028}$

R²: 0.9729

Lote: ELENA

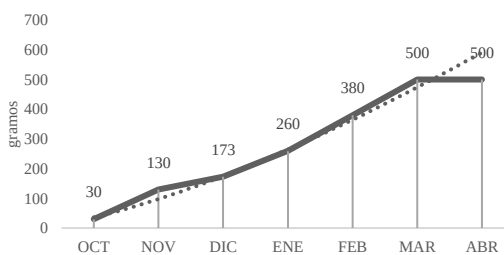


Período: 17/jul/17 al 17/ene/18

Ecuación: $y = 12.656x^{2.0732}$

R²: 0.9316

Lote: NICA

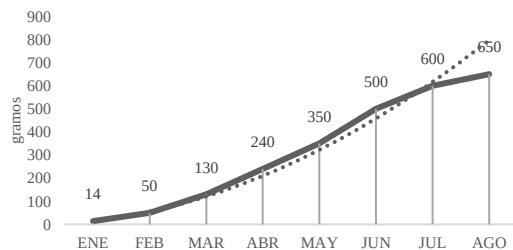


Período: 17/sep/17 al 15/may/18

Ecuación: $y = 36.106x^{1.4366}$

R²: 0.9642

Lote: ADELAIDA

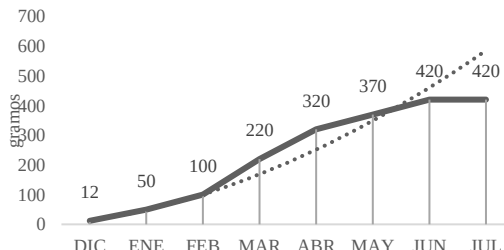


Período: 5/dic/17 al 15/ago/18

Ecuación: $y = 14.572x^{1.9249}$

R²: 0.9642

Lote: JA



Período: 15/nov/18 al 15/jul/19

Ecuación: $y = 14.06x^{1.7928}$

R²: 0.8918

4.3 Modelos representativos

Para poder determinar el tiempo de crecimiento promedio se llevó a cabo una selección del modelo de crecimiento más adecuado. Esta elección se realizó utilizando una matriz de priorización que evaluó distintos enfoques de estimación. La Tabla 4. 4 muestra la estimación de días de producción de cada modelo obtenido de las curvas de crecimiento (Tabla 4. 3), así como su error de estimación.

Tabla 4. 4 Estimación de días de producción y error de estimación mediante modelos obtenidos

Lote	Peso final	Días de producción	Estimación		% Error
			Modelo	Días de producción	
JA	500	183	$y = 12.038x^{2.235}$	160	12%
EA	510	213	$y = 18.378x^{1.8233}$	192	10%
ED	650	212	$y = 6.4154x^{2.3625}$	219	3%
ALICIA	600	184	$y = 37.689x^{1.6028}$	174	5%
ELENA	550	215	$y = 12.656x^{2.0732}$	219	2%
NICA	500	212	$y = 36.106x^{1.4366}$	187	12%
ADELAIDA	650	243	$y = 14.572x^{1.9249}$	223	8%
JA	420	212	$y = 14.06x^{1.7928}$	200	6%

Considerando la variabilidad inherente a los datos provenientes de múltiples lotes de producción, recopilados en distintos momentos y en condiciones diversas, se implementó una matriz de priorización. Esta herramienta se utilizó para discernir qué ecuación de crecimiento obtenida puede ser seleccionada y empleada como modelo matemático representativo. Este enfoque permitió una evaluación objetiva y sistemática de las ecuaciones disponibles, garantizando la elección de la más apropiada en función de criterios definidos.

1. Determinar el objetivo. El propósito de la matriz es elegir el modelo que mejor se ajusta al crecimiento a través del tiempo de los organismos.
2. Listado de criterios generados.
 - Duración del ciclo: Este criterio refleja la eficiencia temporal del modelo. Si un ciclo es más corto, podría ser preferible, ya que podría permitir una producción más rápida.

- % de error de estimación: Este criterio indica qué tan preciso es el modelo en predecir los resultados reales. Un porcentaje de error de estimación menor será preferible, ya que indicará que el modelo se ajusta mejor a los datos reales.
 - Peso final promedio: Este criterio refleja la calidad de la producción en términos de peso estándar. Siendo el peso promedio de los lotes de 550.
3. La puntuación empleada para la comparación de cada criterio se muestra en la Tabla 4. 5. Estos, se fundamentan en los datos recopilados de la Tabla 4. 4.

Tabla 4. 5 Puntuación para ponderación de criterios.

Puntuación	Duración del ciclo	% de error	Peso final promedio
Criterio			
10	6 meses	(0 - 4)	(540 - 560)
5	7 meses	(5 - 9)	(510 - 539), (561 - 591)
1	8 meses	(10 - 14)	(592 < x > 509)

4. El análisis de criterios y opciones se llevó a cabo mediante la matriz de ponderación final, presentada en la Tabla 4. 6, utilizando el método de consenso de criterio y se escogerá el modelo con el mayor puntaje.

Tabla 4. 6 Ponderación final de cada lote.

Lote	Modelo	Duración de ciclo	% error de estimación	Peso final promedio	Total =
JA	$y = 12.038x^{2.235}$	10	1	1	12
EA	$y = 18.378x^{1.8233}$	5	1	5	11
ED	$y = 6.4154x^{2.3625}$	5	10	1	16
ALICIA	$y = 37.689x^{1.6028}$	10	5	1	16
ELENA	$y = 12.656x^{2.0732}$	5	10	10	25
NICA	$y = 36.106x^{1.4366}$	5	1	1	7
ADELAIDA	$y = 14.572x^{1.9249}$	1	5	1	7
JA	$y = 14.06x^{1.7928}$	5	5	1	11

5. De acuerdo con los datos de la Tabla 4. 6, la ecuación que recibió la mayor ponderación fue el lote denominado "Elena". Este modelo se utilizará para estimar la duración de los ciclos de producción de Tilapia. Por otro lado, la ecuación que obtuvo el menor puntaje fue la de "Nica", la cual puede ser considerada representativa de un escenario pesimista. Esto sugiere que, mientras el modelo "Elena" ofrece una proyección optimista y viable, el modelo "Nica" proporciona una perspectiva más conservadora que puede ser útil para evaluar riesgos y planificar estrategias en condiciones menos favorables.

4.3.1 Validación de los modelos representativos

Para evaluar si el crecimiento de las Tilapias, al ser simulado, produce valores similares a los obtenidos en los datos reales disponibles, se llevó a cabo una simulación utilizando las ecuaciones obtenidas. El objetivo fue determinar el error de estimación y, de esta manera, analizar qué tan cercanos son los resultados simulados respecto a los datos reales utilizando los modelos representativos. La Tabla 4. 7, presenta un resumen o concentrado de los datos reales obtenidos, proporcionando una visión general de los valores observados en el crecimiento o duración del ciclo de producción en las condiciones estudiadas.

Tabla 4. 7 Escenario de producción con datos históricos.

Período	Días de producción	Peso inicial (g)	Peso final (g)	FCA	Biomasa meta (kg)	Biomasa cosechada (kg)	Inconveniente
15/05/2016 -15/11/2016	183	1	500	1.33	2000	2504	
15/09/2016 - 15/05/2017	213	1	510	1.5	2500	3076	
22/12/2016 - 27/07/2017	212	1	650	2.66	2500	908	Falla eléctrica
05/04/2017 – 17/10/17	184	1	600	1.72	2500	2700	
17/07/17 – 17/01/18	215	1	550	1.77	4000	1930	Falla eléctrica
17/09/2017 - 15/05/2018	212	3	500	3.3	1500	666	Falla eléctrica
5/12/2017 - 15/08/2018	243	1	650	1.7	2500	1900	Falla eléctrica
15/11/18 - 15/07/2019	212	1	420	1.37	2000	2533	

Estimación del tiempo de crecimiento promedio de cosecha

Para estimar el crecimiento en un escenario pesimista, se utilizó el modelo de crecimiento representado por la ecuación ($y = 36.106x^{1.4366}$), mientras que, en el escenario ideal, se empleó el modelo ($y = 12.656x^{2.0732}$), basado en datos históricos. Además, a través de las ecuaciones 3.1 y 3.2, se pronosticó el comportamiento del crecimiento en peso de los organismos, considerando la temperatura media del agua durante el ciclo productivo en la zona de estudio.

La Tabla 4. 8 presenta una evaluación basada en los datos reales, comparando la precisión de los tres modelos en relación con la duración del ciclo de producción. El análisis indica que, de los tres modelos, CTC es el que ofrece la estimación más precisa, con un error de solo el 3%.

Tabla 4. 8 Error de estimación de la simulación contrastando con datos reales.

Nombre del lote	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Duración del ciclo			
			Datos reales	NICA	ELENA	CTC
JA	1	500	183	187	177	189
EA	1	510	213	190	178	203
ED	1	650	212	212	193	217
ALICIA	1	600	184	212	193	203
ELENA	1	550	215	200	185	210
NICA	3	500	212	187	177	203
ADELAIDA	1	650	243	212	193	217
JA	1	420	212	166	162	175
		promedio	209	196	182	202
		% error		6%	13%	3%

Por otro lado, el modelo NICA, que representa un escenario pesimista, también muestra una precisión considerable, con un error del 6%. Esto lo convierte en una alternativa confiable para estimaciones que prioricen un enfoque conservador en la proyección del ciclo. En contraste, el modelo ELENA subestima la duración del ciclo, presentando un error del 13%. Aunque esto puede hacer que el modelo no sea adecuado para predicciones que requieran un ajuste cercano a los datos reales, podría ser útil para proyecciones en las que se busque un escenario en condiciones ideales.

Estimación de la biomasa cosechada y el factor de conversión alimenticia

Para validar las ecuaciones 3.4 y 3.5, correspondientes a la estimación de la biomasa y el factor de conversión alimenticia, respectivamente, se realizó una simulación comparada con los datos reales disponibles (Tabla 4. 7), donde más del 50% de los lotes no alcanzaron la meta esperada. En la Tabla 4. 9 se presentan los porcentajes de error, destacando que, en la mayoría de los casos, los valores de error son considerablemente altos. Sin embargo, en el caso del lote "ALICIA", donde no se presentaron inconvenientes en la producción, el error es bajo (6%), lo que indica que la estimación basada en datos históricos fue más precisa.

Tabla 4. 9 Estimación de error para biomasa cosechada y FCA.

Nombre del lote	<i>Datos reales</i>			Estimación con datos históricos		Estimación con CTC		Estimación Del FCA	
	<i>Demanda mensual (kg):</i>	<i>Biomasa cosechada (kg)</i>	<i>FCA</i>	<i>Biomasa cosechada (kg)</i>	<i>% error</i>	<i>Biomasa cosechada (kg)</i>	<i>% error</i>	<i>FCA</i>	<i>% error</i>
JA	2000	2504	1.33	1902.46	24%	2073.37	17%	1.14	14%
EA	2500	3076	1.5	2425.64	21%	2516.06	18%	1.24	17%
ED	2500	908	2.66	2853.69	214%	2966.99	227%	1.82	32%
ALICIA	2500	2700	1.72	2853.69	6%	2907.34	8%	1.35	22%
ELENA	4000	1930	1.77	4185.41	117%	4250.79	120%	1.39	21%
NICA	1500	666	3.3	1426.84	114%	1533.77	130%	2.15	35%
ADELAIDA	2500	1900	1.7	2853.69	50%	2966.99	56%	1.36	20%
JA	2000	2533	1.37	1520.13	40%	1625.92	36%	1.15	16%

4.3.2 Submodelo biológico

Para determinar la factibilidad de una programación de la producción escalonada se realizó una simulación mediante el siguiente escenario (Tabla 4. 10):

Tabla 4. 10 Escenario propuesto para la programación escalonada.

Nombre del lote:	Peso inicial (g)	Peso final (g):	Mortalidad natural (M) durante el ciclo:	Demanda mensual (kg):	Fecha deseada de siembra	FCA observado en períodos anteriores
ERICK	1	500	9%	600	01/01/2025	1.42
JA	4	600	12%	600	16/02/2025	1.55
EA	1	550	5%	600	10/03/2025	2.66
IT	1	510	13%	1200	10/04/2025	1.72
ELENA	4	600	15%	600	05/05/2025	1.77
NICA	1	550	10%	600	01/06/2025	3.33
ADEL	1	580	18%	600	08/07/2025	1.7
JA	3	540	10%	600	11/08/2025	1.37
OA	1	530	11%	1200	05/09/2025	1.4
EA	1	600	8%	600	15/10/2025	2.5
ED	3	600	12%	600	12/11/2025	1.89
SARA	3	580	11%	1200	19/12/2025	2.2

Determinación del tiempo de crecimiento promedio de cosecha

Según la Tabla 4. 11, el tiempo promedio de crecimiento hasta la cosecha se encuentra entre 187 y 207 días empleando los tres modelos representativos. Considerando que los datos más cercanos a la realidad son los obtenidos mediante el coeficiente de crecimiento térmico, se estima que, para el escenario propuesto, cada lote de cultivo tendría una duración promedio de crecimiento entre 182 y 224 días, dependiendo de las condiciones de temperatura en la zona al momento de su aplicación.

Tabla 4. 11 Tiempo promedio de los modelos representativos.

Nombre del lote	Demanda mensual (kg):	Duración del ciclo		
		NICA	ELENA	CTC
ERICK	600	187	177	196
JA	600	212	193	203
EA	600	200	185	189
IT	1200	190	178	182
ELENA	600	212	193	210
NICA	600	200	185	210
ADEL	600	207	190	217
JA	600	197	183	210

OA	1200	195	182	210
EA	600	212	193	224
ED	600	212	193	224
SARA	1200	207	190	210
Promedio:		203	187	207

Estimación de la supervivencia de los organismos, peso deseado

Dado que la empresa no cuenta con datos históricos de mortalidad, se utilizaron porcentajes estimados de forma aleatoria, basados en la información verbal recopilada (Tabla 4. 10). Los resultados del sistema dependen directamente de los datos de entrada proporcionados a la herramienta informática. Por ejemplo, un aumento en la mortalidad estimada reduce tanto el número de organismos como la biomasa cosechada. Como se observa en la Tabla 4.12, los resultados obtenidos al emplear el coeficiente térmico de la zona (CTC) muestran una menor cantidad de organismos y una producción reducida por ciclo. Esto se debe a las condiciones térmicas específicas de la zona de estudio, que influyen en el desarrollo y crecimiento de los organismos. Además, se calcula el peso promedio de los organismos, lo que permite estimar su peso al momento de la cosecha.

Tabla 4. 12 Estimación de la biomasa cosechada y mortalidad.

Nombre del lote	Mortalidad estimada (%)	Datos históricos		CTC		
		Organismos/ciclo	Biomasa cosechada (kg)	Organismos/ciclo	Biomasa cosechada (kg)	Peso promedio
ERICK	9%	1097	548.36	1086	551.3	507.65
JA	12%	1064	638.58	1058	647.48	612.17
EA	5%	1141	627.81	1140	657	576.19
IT	13%	2107	1074.79	2102	1106.18	526.27
ELENA	15%	1033	619.71	1019	630.46	618.55
NICA	10%	1086	597.19	1071	637.16	594.78
ADEL	18%	1002	581.35	977	572.97	586.57
JA	10%	1086	586.33	1070	579.26	541.28
OA	11%	2150	1139.5	2114	1192.25	564.1
EA	8%	1108	664.64	1094	678.03	620.02
ED	12%	1064	638.58	1044	670.58	642.34
SARA	11%	2394	1247	2150	1415.65	591.43

4.3.3 Submodelo de manejo

Este submodelo se centró en calcular la capacidad de carga óptima de los estanques, tomando en cuenta factores clave como la biomasa y el volumen del agua disponible. Estos parámetros permiten evaluar el equilibrio entre la cantidad de organismos y el espacio adecuado para su crecimiento.

Se determinó la capacidad de carga en función de la densidad teórica, así como de las características físicas de los estanques (forma, diámetro y altura) y la biomasa requerida. Con base en estos parámetros, se definió el número de estanques necesarios por cultivo y la cantidad de organismos por estanque según el escenario a simular. Como se muestra en la Tabla 4. 13, se logró cumplir con la meta de producción sin exceder la capacidad de carga establecida.

En el caso de los lotes denominados IT y OA, el análisis muestra que se requieren 3 estanques para alcanzar la meta de producción, aunque el módulo cuenta con 4 estanques. Esta diferencia indica que, dependiendo del modelo matemático empleado para la programación de la producción y la densidad de organismos establecida, puede haber cierta flexibilidad en el uso de los estanques disponibles. Estos factores deben ser considerados para optimizar el uso de los recursos y asegurar la sostenibilidad del proceso productivo.

Tabla 4. 13 Estimación del número de estanques y densidad teórica de los organismos.

Nombre del lote	Estanques necesarios			Organismos por estanque		
	Siembra	Engorda I	Engorda II	Siembra	Engorda I	Engorda II
ERICK	1	2	2	1319	659	659
JA	2	2	3	682	682	455
EA	1	1	2	1263	1263	632
IT	3	3	4	920	920	690
ELENA	2	3	5	706	471	282
NICA	2	2	2	667	667	667
ADEL	2	1	2	732	1463	732
JA	2	2	2	667	667	667
OA	3	4	4	899	674	674
EA	2	2	2	652	652	652
ED	2	2	2	682	682	682
SARA	3	4	4	899	674	674

Estimación del FCA y cantidad de alimento

El "FCA real" refleja el uso real del alimento para cada lote, mientras que el "FCA estimado" representa un valor teórico o esperado. Un FCA más bajo indica una mayor eficiencia, ya que se requiere menos alimento para producir el mismo crecimiento.

Como se muestra en la Tabla 4. 14 con las diferencias entre los valores reales y estimados, se puede evaluar el rendimiento de cada lote. Por ejemplo, algunos lotes como IT muestran un FCA real significativamente mayor (2.66) al estimado (1.33), lo cual indica un desempeño menos eficiente que el previsto. En cambio, lotes como JA tienen un FCA real cercano al estimado, lo cual sugiere una eficiencia más alineada con las expectativas, no obstante, cabe mencionar que el FCA estimado es considerado como el “mínimo necesario” ya que se encuentra calculado con base en la proyección de alimentación en un “sistema ideal”, el cual fue ajustado con el FCA real.

Al comparar los valores del FCA real con el FCA estimado mínimo, se pueden identificar áreas de mejora en los lotes menos eficientes. La alineación de los valores reales con los estimados mínimos podría permitir un uso más eficiente del alimento y reducir costos en la producción.

Tabla 4. 14 Estimación del FCA y alimento consumido.

Nombre del lote	FCA Real	FCA Estimado Mínimo	Alimento consumido
ERICK	1.42	1.19	1292
JA	1.55	1.32	1396
EA	2.66	1.79	2044
IT	1.72	1.33	2803
ELENA	1.77	1.44	1472
NICA	3.33	2.16	2310
ADEL	1.7	1.36	1331
JA	1.37	1.23	1313
OA	1.4	1.19	2526
EA	2.5	1.75	1919
ED	1.89	1.51	1573
SARA	2.2	1.65	3948

4.3.4 Submodelo económico

En el escenario seleccionado para evaluación, se obtuvo el margen de utilidad, lo cual permite identificar los lotes de cultivo que operan con mayor o menor eficiencia en términos de generación de utilidades en relación con los costos incurridos. En este estado de resultados, el margen de utilidad representa la ganancia antes de impuestos para cada lote de cultivo. Como se muestra en la Tabla 4. 15, todos los lotes generaron utilidades, con márgenes que varían entre el 41% y el 64%. Además, se observa que el 25% de los lotes alcanzaron una utilidad superior al 60%.

Tabla 4. 15 Estimación de los márgenes de utilidad por lote.

No. Cultivo	Nombre del lote	Ventas		Costo de ventas		Utilidad	Margen de utilidad
1	ERICK	\$	38,385.11	\$	22,621.63	\$ 15,763.48	41%
2	JA	\$	44,700.79	\$	23,858.97	\$ 20,841.82	47%
3	EA	\$	43,946.80	\$	22,872.58	\$ 21,074.22	48%
4	IT	\$	75,235.22	\$	29,188.20	\$ 46,047.01	61%
5	ELENA	\$	43,379.68	\$	23,852.66	\$ 19,527.02	45%
6	NICA	\$	41,803.49	\$	23,055.01	\$ 18,748.48	45%
7	ADEL	\$	40,694.36	\$	23,235.89	\$ 17,458.47	43%
8	JA	\$	41,043.43	\$	23,647.12	\$ 17,396.31	42%
9	OA	\$	79,765.07	\$	30,994.31	\$ 48,770.76	61%
10	EA	\$	46,525.06	\$	23,021.63	\$ 23,503.43	51%
11	ED	\$	44,700.79	\$	23,633.49	\$ 21,067.30	47%
12	SARA	\$	87,290.08	\$	31,494.80	\$ 55,795.27	64%

4.4 Aplicación de los algoritmos de secuenciación para la secuencia de pedidos

Para aplicar algoritmos de secuenciación en la producción de Tilapias, se utilizó una analogía con el algoritmo de Johnson para ordenar trabajos en dos etapas: la siembra ("Máquina 1") y la engorda ("Máquina 2"). Este enfoque se centró en los meses de mayor demanda, con entregas diarias. La secuenciación se aplicó solo en la etapa de engorda, priorizando el uso de estanques según el peso deseado de los peces, siguiendo una secuencia FIFO, como regla de prioridad se considera que el lote que se tiene que entregar con el menor peso es el primero

que se asigna. Esto garantiza que los lotes se procesen y completen en el mismo orden en que comenzaron su crecimiento.

De acuerdo con el escenario evaluado, que consideró cinco pedidos orientados a satisfacer los picos de demanda, como los de Semana Santa, se determinó la secuencia de prioridad para los estanques, así como las fechas recomendadas para la siembra en los mismos, con el objetivo de garantizar que estén listos para las fechas de entrega establecidas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. 16, donde se evidencia, por ejemplo, que para el pedido 1, que requiere un peso de 500 gramos, se debe asignar como prioridad 1 en los estanques de producción, según el tiempo estimado de procesamiento. Además, se determinó que la siembra para cumplir con la demanda pronosticada debe realizarse el 08/10/2024, con cosecha programada para el 13/04/2025, el pedido 3, que requiere un peso de 550 gramos requiere prioridad 2 donde se debe sembrar el día 17/09/2024 y cosechar el 18/04/2025.

Tabla 4. 16 Secuencia de pedidos de producción.

Secuencia	P1	P3	P4	P2	P5
Fecha de siembra	08/10/2024	17/09/2024	01/10/2024	21/09/2024	07/09/2024
Fecha de cosecha	13/04/2025	18/04/2025	19/04/2025	17/04/2025	20/04/2025

4.5 Diseño de la aplicación informática para la programación de la producción de Tilapia

Se diseñó una aplicación informática que procesa los datos productivos, económicos y operativos relevantes para el productor, con el fin de programar la producción, entregando la información clara y concisa. Este resumen proporciona una visión clara del rendimiento del cultivo, lo que permite al productor tomar decisiones gerenciales informadas para optimizar su capacidad productiva y anticipar posibles escenarios desfavorables.

Los resultados se dividen en: resultados con datos históricos y el coeficiente de crecimiento térmico, costos de producción, número de estanques necesarios para el cultivo y secuencia de estanques para ordenes de pedido en temporada de mayor demanda.

Resultados con datos históricos y el coeficiente de crecimiento térmico

En la Figura 4. 3, se presentan los datos de entrada de producción necesarios para obtener la duración de ciclo de producción mediante tres modelos representativos, así como la biomasa a cosechar.

Características de producción	Cantidad	Unidad	Observaciones
Número de cultivo:	1		
Nombre del lote:	ERICK		
Mes de siembra:	Mayo		Seleccione una de las opc
Demanda mensual:	2000	kg	
¿Cuál es el peso inicial de los organismos?:	1	gr	
¿Cuál es el peso final estimado de los organismos?:	500	gr	
¿Qué fecha desea utilizar para la planificación?:	Siembra		Seleccione una de las opc
¿Cuál es la fecha en la que va a sembrar?:	01/01/2025		
Peso con el que desea transferir a engorda:	25	gr	
Tasa de mortalidad considerada:	5.00%	%/seman	
FCA observado de cultivos anteriores:	1.33		

Figura 4. 3 Datos de entrada para obtener la duración del ciclo.

Con base a los datos de entrada, se obtiene un resumen con los resultados que incluyen las "fechas clave de producción". Estas fechas comprenden los "días aceptables", que corresponden a un escenario menos favorable, y los "días adecuados", que reflejan un escenario ideal y factible bajo condiciones optimistas. Adicionalmente, se proporciona un resumen productivo que muestra los resultados esperados, tales como el número de organismos cosechados por ciclo, la biomasa cosechada y los organismos a sembrar, todo esto considerando la tasa de mortalidad establecida como se muestra en la Figura 4. 4.

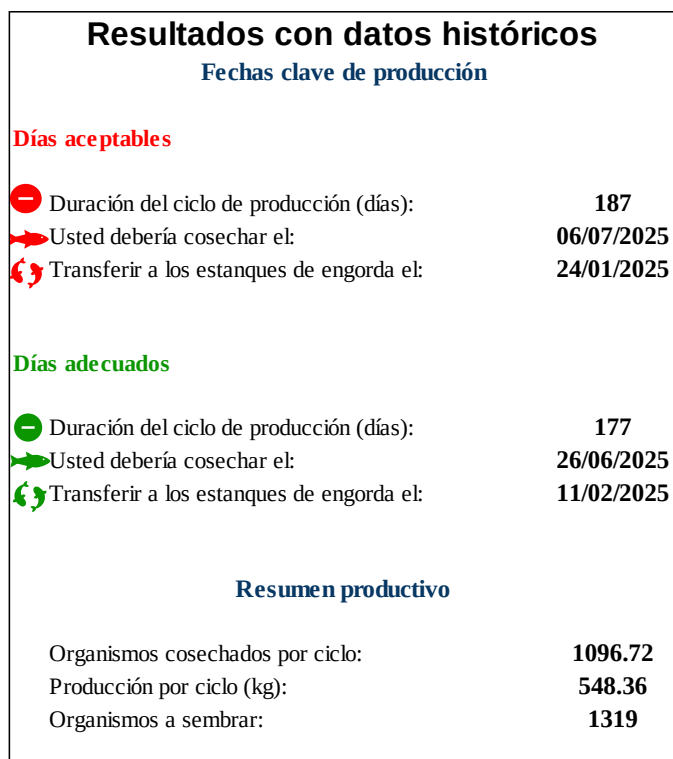


Figura 4. 4 Resultados con datos históricos

De manera similar, utilizando la información de entrada mostrada en la Figura 4. 3 y datos históricos de temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales (Figura 4. 5), la aplicación calcula la duración del ciclo de producción en función del perfil térmico de la zona. Además, proporciona como resultados el número de organismos cosechados por ciclo, el peso promedio de los organismos al momento de la cosecha, la biomasa esperada, el FCA mínimo por ciclo y el consumo aproximado de alimento, considerando tanto el número de organismos cosechados como el FCA (Figura 4. 6).

Histórico temperaturas mensuales en el agua			
Mes/Variable	°T media (°C)	°T mínima (°C)	°T máxima (°C)
Enero	25.33	23.2	26.8
Febrero	25.23	23.1	27.3
Marzo	27.10	24.5	29.8
Abril	27.23	24.8	28.5
Mayo	26.63	23.9	28.5
Junio	26.63	23.4	28.8
Julio	26.45	23.8	28.3
Agosto	26.52	23.6	28.4
Septiembre	26.59	23.4	28.5
Octubre	25.72	23.4	28.8
Noviembre	25.30	22.5	28.4
Diciembre	23.88	22.8	24.6

Figura 4. 5 Datos de temperatura de entrada

Resultados meta con CTC

Duración del ciclo de producción (días)	196
Organismos cosechados por ciclo	1086
Peso promedio de los org a cosechar (g)	507.65
Producción por ciclo (kg)	551.30
FCA mínimo / ciclo de producción	1.19
Consumo aprox de alimento (kg)	1291.85

Gráfica del coeficiente de crecimiento térmico:

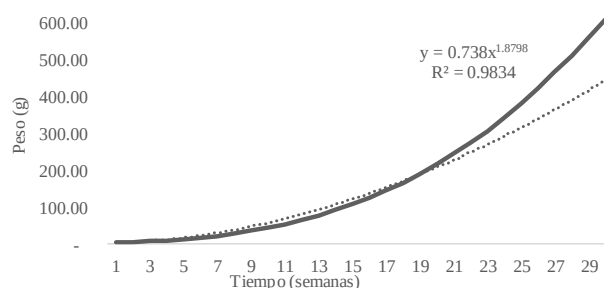


Figura 4. 6 Resultados meta con CTC

Resultados de los costos de producción

Para obtener los resultados de los costos de producción asociados a un cultivo, se ingresan los datos de entrada correspondientes a la información económica, como se ilustra en la Figura 4. 7. En este proceso, se incluyen tanto los costos indirectos, tales como energía, agua, mantenimiento y alimentación, como los costos directos, que comprenden personal y materia prima.

Información económica	Cantidad	Unidad	Observaciones
Costos indirectos: energía			
¿Cuál es la potencia que utiliza su sistema de bombeo de agua?	40	HP	Consultarlo con su proveedor
¿Cuántas horas se mantiene encendido el sistema de bombeo?	4	hrs	
¿Cuál es el costo estimado que tiene por día?	\$ 0.60	\$/día	
¿Cuál es la potencia que utiliza su sistema de aireación de agua?	5	HP	Consultarlo con su proveedor
¿Cuántas horas se mantiene encendido el sistema de aireación?	12	hrs	
¿Cuál es el costo estimado que tiene por día?	\$ 1.50	\$/día	
Costos indirectos: agua			
¿Cómo realiza el pago de agua?	Mensual		Seleccione una de las opciones
¿Cuál es el costo de agua?	0	\$/mensual	

Figura 4. 7 Datos de entrada para los costos de producción.

Como resultado, se obtienen los costos totales de producción, así como la utilidad a partir de los ingresos y los costos totales como se muestra en la Figura 4. 8.

Costos de producción

Costos indirectos				
Energía de bombeo	\$	2,145.60	👉	18%
Energía de aireación	\$	2,011.50	👉	17%
Agua	\$	-	👇	0%
Mantenimiento	\$	2,100.00	👉	17%
Alimentación	\$	5,912.23	👈	49%
TOTAL	\$	12,169.33		100%
Costos directos				
Personal	\$	9,372.30	👈	61%
Materia prima	\$	1,080.00	👇	7%
Gastos de venta	\$	5,000.00	👉	32%
TOTAL	\$	15,452.30		100%
UTILIDAD TOTAL = \$ 15,763.48				

Figura 4. 8 Resultados de costos de producción

Resultados del número de estanques necesarios para el cultivo

Para determinar el número de estanques y la densidad teórica de los organismos, se ingresan los datos de entrada correspondientes a cada etapa del proceso. Esto incluye el número de estanques disponibles y características específicas como el diámetro, la forma y la altura, tal como se muestra en la Figura 4. 9.

Características de los estanques	Cantidad	Unidad	Observaciones
Etapas: siembra			
¿Cuántos estanques tiene disponibles para la etapa de siembra?	1		
¿Con qué densidad teórica desea operar (siembra)?:	max		Seleccione una de las opciones
Forma de los estanques de siembra:	Circular		Seleccione una de las opciones
Diámetro de los estanques de siembra:	3.1	m	
Altura de los estanques de siembra:	1.2	m	
Espesor de los estanques de siembra:	0	m	

Figura 4. 9 Datos de entrada de las características de los estanques

En la Figura 4. 10 se muestran los resultados sobre la cantidad de estanques necesarios, así como la densidad teórica de organismos que deberían estar presentes en cada uno sin comprometer su integridad. También se incluye el porcentaje de estanques que no se utilizaron, en función de la disponibilidad. Se presentan dos alternativas: utilizar los estanques de engorda I (Módulo I) o engorda II (Módulo II), dependiendo de la disponibilidad

del productor. Si no hay suficientes estanques disponibles, se muestra un mensaje indicando la falta de capacidad:



Figura 4. 10 Resultados del número de estanques necesarios

Resultados de la aplicación de algoritmos de secuenciación para ordenes de pedido

Para obtener la secuencia de prioridad de los estanques para las órdenes de pedido con mayor demanda, se diseñó una pestaña en la aplicación informática en la que se introducen datos de entrada, como la fecha estimada de entrega y el peso final requerido Figura 4. 11. Con esta información, se calcula la secuencia prioritaria, tal como se muestra en la Figura 4. 12.

DATOS DE ENTRADA:

Número de pedidos:	5
---------------------------	----------

Introducir los datos deseados en las celdas vacías

Pedido	Fecha estimada de entrega:	Peso final requerido:
P1	13/04/2025	500
P2	17/04/2025	600
P3	18/04/2025	550
P4	19/04/2025	580
P5	20/04/2025	650

Figura 4. 11 Datos de entrada para obtener la secuencia de prioridad

DATOS DE SALIDA:					
Secuencia de prioridad de los estanques:					
	1	2	3	4	5
	<u>P1</u>	<u>P3</u>	<u>P4</u>	<u>P2</u>	<u>P5</u>
<i>Fecha de cosecha</i>	13/04/2025	18/04/2025	19/04/2025	17/04/2025	20/04/2025
<i>Fecha de siembra</i>	08/10/2024	17/09/2024	01/10/2024	21/09/2024	07/09/2024

Figura 4. 12 Resultados obtenidos de la secuencia de priorización

Capítulo 5. Conclusiones

En primer lugar, se revisaron diversos algoritmos de secuenciación, de los cuales se encontró que el algoritmo de Johnson es aplicable para planeación de la producción en la acuacultura, este permite establecer una secuencia prioritaria para el uso de estanques cuando aumenta la demanda, siguiendo la regla de prioridad FIFO. Sin embargo, surgieron limitaciones debido a que el proceso productivo se representa como un taller de flujo, donde las actividades siguen un orden estricto entre etapas, y los tiempos de procesamiento en la primera etapa (siembra) son constantes debido al peso promedio homogéneo de las Tilapias. Por ello, solo se secuenció la segunda etapa.

Por otra parte, el análisis del tiempo de crecimiento, basado en datos históricos y en el coeficiente térmico de crecimiento, permitió desarrollar dos modelos matemáticos para estimar los tiempos de crecimiento bajo distintos escenarios: "adecuado-pesimista" y "aceptable-optimista". Los resultados obtenidos para cada escenario fueron los siguientes:

- Escenario adecuado-pesimista (lote "NICA"): el tiempo promedio de crecimiento fue de 196 días.
- Escenario aceptable-optimista (lote "ELENA"): el tiempo promedio de duración del ciclo fue de 182 días.
- CTC (Coeficiente Térmico de Crecimiento): un promedio de 202 días.

Tras calcular el tiempo promedio de cosecha por lote en cada estanque de cultivo y compararlo con el modelo de crecimiento térmico, se percibió que la temperatura es una variable crítica ya que la duración del ciclo aumenta a medida que disminuye la temperatura, se demostró que el coeficiente de crecimiento térmico es el método más preciso para estimar la duración del ciclo, con un margen de error del 3% al compararlo con datos reales. Por otro lado, los costos de producción directos e indirectos asociados a un periodo de cultivo se encontraron que el 25% de los lotes alcanzaron una utilidad superior al 60%, demostrando de esta manera con la rentabilidad de la acuacultura a pesar de la limitada planeación de la producción.

Finalmente se diseñó una aplicación informática basada en Excel para la programación de la producción de Tilapia, que permite evaluar escenarios y realizar simulaciones basadas en datos reales, facilitando la toma de decisiones para una programación escalonada de la producción.

La principal contribución práctica y teórica de este trabajo radica en la demostración de que las herramientas de ingeniería industrial, como los algoritmos de secuenciación y la dinámica de sistemas, son viables de aplicar en la producción acuícola, aspecto que se refuerza por el limitado desarrollo de modelos para la planeación de la producción de Tilapia en la investigación, por ello las futuras líneas de investigación en este campo del conocimiento se enfrenta a una gran cantidad de desafíos, que van desde las limitaciones de datos, obstáculos técnicos, problemas de validación de los modelos específicos y complejidad de aplicaciones que hace que dichas aplicaciones no lleguen al acuicultor. Por lo tanto, se sugiere trabajar en comparar los resultados obtenidos y la base de datos disponibles hacia la generación de modelos de inventarios, investigación operativa y la inteligencia artificial que permitan la optimización de la producción para encontrar modelos que representen con mayor certidumbre al sistema real, en aspectos productivos y de calidad de agua, factores clave en la acuicultura.

Referencias

- Aguilar Aguilar, F., 2010. *Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja (Oreochromis Spp.) y tilapia nilótica (Oreochromis niloticus var. chitralada)*” alimentadas con dietas peletizadas o extruidas, Bogotá, D.C: Facultad de medicina, veterinaria y zootecnia.
- Aguilar, F., Afanador, G. & Muñoz, R. A., 2010. Efecto del procesamiento de la dieta sobre el desempeño productivo de tilapia nilótica (Oreochromis niloticus Var. Chitralada) en un ciclo comercial de producción. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 57(2).
- Álvarez Sánchez, Y. & Toledo Diez, M., 2018. Procedimiento metodológico para la planificación de inventarios: una propuesta para la enseñanza de la asignatura administración financiera a corto plazo. *Conrado*, Volumen 14.
- Aranda, L. S., 2007. *Comparación de crecimiento en agua marina y continental de Tilapia Roja Oreochromis spp. en tanques circulares cónicos.*, s.l.: s.n.
- Arango, G. P. A., 2020. *Maleta de herramientas de investigación en el aula para jóvenes rurales*, Pensilvania, Caldas: IES CINOC.
- Arce Vega, J. J., 2014. *Determinación de la tasa de alimentación para Tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus, Linnaeus, 1759) en condiciones comerciales corregida por el Coeficiente térmico de Crecimiento*, Costa Rica: Facultad de ciencias agroalimentarias.
- Barragán, A. y otros, 2017. Utilización de harinas vegetales para el desarrollo de dietas de pre-engorde y engorde de Tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus). *Revista electrónica de Veterinaria* , 18(9).
- Behrdek, J., 1930. Temperature coefficients in biology. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical*, 5(1), pp. 30-58.
- Cadenas Anaya, C. & Guaita, W., 2020. *Dinámica de sistemas, una metodología para la construcción de modelos de toma de decisiones en sectores agroindustriales*. Bogotá, Colombia: Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.
- Cervantes, A., Chiappa, X. & Dias, N., 2009. *Stella, software para modelación*, Yucatán : Universidad nacional autónoma de México.

- Chapman Stephen, N., 2006. *Planificación y control de la producción*. s.l.:Pearson educación.
- Chase, R. & Jacobs, R., 2014. *Administración de operaciones producción y cadena de suministro* s. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana editores S..A de C.V.
- Cho, C. Y. & Bureau, D., 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), pp. 199-210.
- Crespo Guerrero, J. M. & Jiménez Pelcastre, A., 2021. Hacia el desarrollo sostenible de la pesca y la acuicultura en México: marcos normativos, organización socioeconómica y desafíos. *Cuadernos geográficos*, 60(3), pp. 6-28.
- De la Peña, D., 2021. *Fundamentos de dirección de producción y operaciones*., s.l.: s.n.
- Dorantes de la O, J. C., 2022. *Bioeconomía del proceso de engorda de tilapia (Oreochromis niloticus) en un sistema de producción intensivo con tecnología biofloc en el altiplano Mexicano*, La paz, Baja California: Centro de investigaciones biológicas del noroeste, S.C..
- Egna, H. & Boyd, C., 1997. *Dinámica de los estanques en acuicultura* , s.l.: Dirección de acuicultura .
- Escobar John, W., 2020. Modelo matemático para la programación de la producción en compañías fabricantes de alambres y cables para la construcción. *Revista ESPACIOS*, Volumen 798, p. 1015.
- Fanjul Peyró, L., 2010. *Nuevos algoritmos para el problema de secuenciación en máquinas paralelas no relacionadas y generalizaciones*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- FAO, 2019. *The State of the World's Aquatic Genetic Resources for Food and Agriculture*.. [En línea] Available at: <https://www.fao.org/3/CA5256EN/CA5256EN.pdf>
- FAO, 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura* , Roma: Hacia la transformación azul.
- FAO, 2024. *The state of world fisheries and aquaculture*. Roma: Blue Transformation in action.
- Fernández, A. C., 2020. *Planificación y gestión de la demanda*.. s.l.:IC Editorial.

- Ferreira Santos, J. y otros, 2019. A comparative study on Nile tilapia under different culture systems: Effect on the growth parameters and proposition of new growth models. *Aquaculture*, Volumen 503, pp. 128-138.
- Forrester, J., 1961. *Industrial dynamics*, s.l.: Massachusetts Institute Of Technology.
- Gabriel Luciano, V., 2013. *Modelo piscícola integral y dinámico en el ejido de Tanaquillo, Municipio de Chilchota, Michoacán*, Michoacán: Centro indisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional.
- García Trejo, J., 2019. *Efecto de la Hiperoxigenación sobre la Calidad del Agua en un Sistema Biofloc para la Producción de Tilapia (Oreochromis niloticus)*, Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- García, J. M. & Sterman, J., 2003. *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. Primera ed. Barcelona: s.n.
- Genetics, A., 2021. *Proyección de alimento*, s.l.: Benchmark Genetics.
- Gentry, R. y otros, 2016. Offshore aquaculture: Spatial planning principles for sustainable development.. *Ecology and Evolution*.
- González, F., 2023. *Secretos del crecimiento de la tilapia; cómo la temperatura y el peso corporal afectan su consumo de oxígeno*, s.l.: Piscicultura global.
- González, G., 2016. Jay W. Forrester: pionero de la computación digital y dinámica de sistemas. *Prisma tecnológico*, 7(1), pp. 39 - 40.
- Granados Flores, K. M., 2006. *Estudio preliminar de edad y crecimiento de la Tilapia (Oreochromis niloticus X Oreochromis aureus), con base en escamas, en la Presa Fernando Hiriart Balderrama "Zimapán"*, Ciudad de México: Universidad Autónoma de México.
- Guzmán, E., Andres, B. & Poler, R., 2022. Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review. *Journal of Industrial Information Integration*, Volumen 27, pp. 100-287.
- Hernández, J., León, M. & León, C., 2007. The role of the water temperature in the optimal management of marine aquaculture. *European Journal of Operational Research*, 181(2), pp. 872-886.
- Imués Figueroa, M., 2013. Métodos estadísticos para el análisis sistémico de la producción acuícola. *Revista electrónica de ingeniería en producción acuícola*, VII(7).

- Iwama, G. K. & Tautz, A. F., 1981. A Simple Growth Model for Salmonids in Hatcheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Volumen 36, pp. 649-656.
- Jácome, J. y otros, 2019. Tilapia en Ecuador: paradoja entre la producción acuícola y la protección de la biodiversidad ecuatoriana. *Revista Peruana de Biología*, 26(4).
- Jaén, S., 2017. *Ayudas para la elaboración de diagramas causales*, Antioquia : Aprende en Línea.
- Kaneshima González, K., De La Cruz Barrueto, K. N. & Ponciano Quezada, M. Á., 2022. juveniles, Efecto de la temperatura en el crecimiento de de *Oreochromis niloticus* tilapia en un sistema de recambio acuícola (RAS). *Manglar*, 19(1), pp. 39-44.
- Kessler, M. & Arlinghaus, J., 2022. A framework for human-centered production planning and control in smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, Volumen 65, pp. 220-232.
- Luna, M., Llorente, I. & Cobo, Á., 2020. Aquaculture production optimisation in multi-cage farms subject to commercial and operational constraints. *Biosystems Engineering*, Volumen 196, pp. 29-45.
- Madrid Plata, Z. J., 2019. *Propuesta de un algoritmo evolutivo para problema de secuenciación de la producción en ambiente de manufactura Flowshop con restricción de tiempos de alistamiento*, s.l.: s.n.
- Marín López, P. A., 2022. *Programación de la producción de resortes automotrices basado en la teoría de restricciones en la empresa Vanderbilt.*, Ecuador: COHORTE.
- Marques, B., Tomás, I., Soto, G. & Zaixso, H., 2020. Efectos de la densidad de siembra y el desdoble sobre el crecimiento y la supervivencia en un cultivo suspendido experimental del mejillón *Mytilus platensis* D'ORBIGNY. *Marine and fishery sciences* , 33(1), pp. 5-19.
- Melgar, C., 2012. *Evaluación de la tecnología EM en granjas acuícolas comerciales en Tabasco, México*, México: El Colegio de la Frontera Sur.
- Melo Benavides, J. L., 2022. *Estudio de la densidad óptima para la crianza de tilapia roja (Oreochromis sp) en la parroquia Fátima, provincia y cantón Pastaza*, Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Mirasierra Calleja, V., 2020. *Modelos exactos para la secuenciación de máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de cambio*, Valencia: Departamento de Estadística e Investigación.

- Morales, A., 1991. *La tilapia en México. Biología, cultivo y pesquerías*. Primera ed. México, D.F.: A.G.T. Editor, S.A..
- Morecroft, J. D. W., 2007. *Strategic Modelling and Business Dynamics. A Feedback Systems Approach*. Segunda ed. s.l.:Wiley.
- Nuñez, H., Vargas, R., Guerra, I. & Ramos, E., 2021. Efecto de la temperatura sobre el consumo de oxígeno en Tilapias del Nilo con diferentes fenotipos de comportamiento. *Revista Científica Universitaria*, 10(2).
- ONU, 2015. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/agenda2030>
- Ovando Solís, M., 2013. La acuicultura y sus efectos en el medio ambiente. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 2(3), pp. 61-80.
- Palomo, V., 2021. Así contribuye el pescado de acuicultura a los ODS y la sostenibilidad ambiental. *Eroski Consumer*, 14 Octubre.
- Peña Ramos, L. D., 2021. *La planificación de requerimiento de materiales (MRP) y su impacto en la productividad en empresas de producción: una revisión de la literatura científica en el periodo 2010-2020..* s.l.:Universidad Privada del Norte.
- Ponce, M. D., Víctor, H. J. M. & Gasca, L. E., 2005. *Viabilidad económica del policultivo de tilapia nilótica y langosta australiana en el estado de Yucatán, México*, Mérida: Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Prieto Mojica, C. A., 2022. *Influencia de factores biológicos y ambientales sobre el desempeño reproductivo de Cachama blanca (Piaractus orinoquensis) y Tilapia Roja (Oreochromis spp).*, Colombia: Universidad de ciencias aplicadas y ambientales.
- Pulido, E. A., 2012. Principales causas de mortalidad en cultivos intensivos y superintensivos de tilapia en Colombia.. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola*, 6(6).
- Render, B. & Heizer, J., 2014. *Principios de administración de operaciones*. Novena ed. México: PEARSON Educación.
- Riascos, J., Díaz, D., Beltrán, L. & Gutiérrez, F., 2012. Modelo dinámico para estimar la capacidad de carga. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), pp. 135 - 145.

- Rielo Zurita, J., 2013. *Desarrollo de un modelo matemático para la evaluación del proceso de crecimiento y engorde en los cultivos comerciales de dorada (Sparus aurata, L.)*, Valencia: Universidad de Valencia.
- Ríos Vallejos, A. V., 2020. *Planificación de la producción y lean manufacturing de la empresa Brala SAC*, Punta Piedra: s.n.
- Rodríguez, F. Y., De la Cruz, R. O., Herrera, L. L. J. & Gómez, A. B., 2019. Mejora del proceso de cultivo de especies acuícolas en la empresa pesquera de Sancti Spíritus. *Centro azúcar* , 46(3).
- Rojas Carrillo, P. M. & Aguilar Ibarra, A., 2012. Estimación de la capacidad de carga en el cultivo de peces en jaulas en el Lago de Pátzcuaro, México. *Ciencia Pesquera*, 20(2), pp. 23-34.
- Rueda González, F. M., 2011. Breve historia de una gran desconocida: La acuicultura. *Eubacteria: Especial biología marina*, Issue 26, pp. 1-2.
- Rueda Liberato, A. C., 2023. *Evaluación de tres densidades de cultivo de Oreochromis niloticus (tilapia nilotica) en acuaponia en condiciones de laboratorio*, s.l.: Universidad Nacional Agraria de la selva.
- Rural, S. d. A. y. D., 2021. *ACUERDO mediante el cual se aprueba la actualización de la Carta Nacional Acuícola*. *Diario Oficial de La Federación*, s.l.: s.n.
- Saavedra Martínez, M. A., 2006. *Manejo del cultivo de Tilapia*, Managua, Nicaragua: UASAIID.
- SADER, 2022. *Acuicultura en México*, México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Salazar Murillo, L., Chacón, V. A. & Herrera, M. J. I., 2023. Crecimiento, eficiencia y composición de tilapia (*Oreochromis aureus*) alimentada con lombriz roja (*Eisenia fetida*). *Nutrición Animal Tropical*, 17(1), pp. 1-35.
- Santana Carrión, W. M., 2023. *Implementación de metodología six sigma en una granja acuícola para la mejora de calidad de agua en estanques de producción*, Orizaba, Veracruz: Tecnológico Nacional de México.
- Scheel, M. C., 1998. *Modelación de la dinámica de ecosistemas*. Primera ed. México: Trillas.
- Sosa, V. C. y otros, 2016. Diagnóstico del estado actual de los sistemas de producción acuícola con respecto al medio ambiente en México. *Latin american journal of aquatic research*, 44(2).

- Soto Castillo, C., 2015. *Evaluación económica de las estrategias de cosecha del cultivo del *Haliotisrufescens* mediante un modelo de simulación bioeconómica*, Valparaíso: Universidad Católica de Valparaíso.
- Suconota, T. E. J., 2024. *Estandarización del proceso de producción de balanceados para tilapias en Balanceados Exibal-Chambo*, s.l.: Universidad Nacional de Chimborazo.
- Tigreros Cardenas, I. D., 2021. *Propuesta para la programación de producción en máquinas paralelas con tiempos de alistamiento en una empresa del sector agroindustrial*, s.l.: UCEVA.
- Torres, A. J. H., Ahumada, Q. D. S. & Medina, G. V. H., 2008. Programación y control de piso mediante la modificación del algoritmo de Kaspi-Montreuil y teoría de colas para un ambiente Job Shop. *Ingeniería*, 13(1), pp. 27-41.
- Villavicencio, G., Nila, C. & Guerrero, L., 2017. Dos modelos para el estudio de la dinámica poblacional de peces Tilapia en condiciones de cultivo. En: *Modelos matemáticos en Biología, Ciencias Sociales e Ingeniería*. s.l.:s.n.
- Yang Youn, E., 2014. Mathematical Model of Aquaculture Facility Utilization. *JF M S E*, 26(2), pp. 444-454.
- Yang Youn, E., 2015. Production planning in fish farm. *KSFBA*, 3(46), pp. 129 - 141.
- Zafra Trelles, A. M. y otros, 2019. Conversión y eficiencia alimenticia de *Oreochromis aureus* var. *suprema* (Cichlidae) con diferente alimento balanceado en sistema cerrado, Trujillo, La Libertad, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), pp. 815-826.
- Zuluaga Castro, C. A., 2020. *Planeación de la producción*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.

Anexos

Anexo 1 Proyección de alimento

Semar	Días x Se	Peces x Tanq	Peso Inicial	Peso Final	Biomasa x Tanq	DENSIDAD SIEMBRA	Tasa de Alimentación	Alim. X D	Alim. X Se	Alim. Acumula	Comidas x	Alim. X Com	Tipo de Alimento	CANTIDAD TOTAL	PRECIO X KILO DE ALIM	TOTAL
		No.	g	g	Kg	TANQUE		Kg	Kg	Kg	No.	Kg				
1	7	4,000.00	1	4	16.00	118.0	10%	1.600	11	11	8	0.200	WZ 5515 - Harina			
2	7	4,000.00	4	8	32.00	118.0	9%	2.880	20	20	8	0.360	WZ 5515 - Migaja 1			
3	7	4,000.00	8	25	98.80	118.0	7.6%	7.469	52	52	8	0.934	WZ 4516 - 1.5 mm			
4	7	4,000.00	25	41	165.60	118.0	5.5%	9.141	64	116	8	1.143	WZ 4516 - 1.5 mm			
5	7	4,000.00	41	58	232.40	118.0	4.4%	10.226	72	188	8	1.278	WZ 4516 - 1.5 mm	187.85 Kg	32.8	6,161.55
6	7	4,000.00	58	83	332.40	118.0	3.6%	11.966	84	272	6	1.994	WZ 4010 - 2.5 mm			
7	7	4,000.00	83	108	432.40	118.0	3.3%	14.269	100	372	6	2.378	WZ 4010 - 2.5 mm			
8	7	4,000.00	108	133	532.40	118.0	3.2%	17.037	119	491	6	2.839	WZ 4010 - 2.5 mm	490.76 Kg	18.609	9,132.53
9	7	4,000.00	133	158	632.40	118.0	3.0%	18.656	131	621	6	3.109	WZ 3506 - 3.5 mm			
10	7	4,000.00	158	183	732.40	118.0	2.8%	20.507	144	765	4	5.127	WZ 3506 - 3.5 mm			
11	7	4,000.00	183	208	832.40	118.0	2.5%	20.810	146	911	4	5.203	WZ 3506 - 3.5 mm			
12	7	4,000.00	208	233	932.40	118.0	2.2%	20.513	144	1,054	4	5.128	WZ 3506 - 3.5 mm	1,054.16 Kg	12.895	13,593.39
13	7	4,000.00	233	258	1,032.40	118.0	2.1%	21.680	152	1,206	4	5.420	WZ 3006 - 3.5 mm			
14	7	4,000.00	258	283	1,132.40	118.0	2.0%	22.648	159	1,364	4	5.662	WZ 3006 - 3.5 mm			
15	7	4,000.00	283	308	1,232.40	118.0	1.9%	23.416	164	1,528	4	5.854	WZ 3006 - 3.5 mm			
16	7	4,000.00	308	333	1,332.40	118.0	1.8%	23.983	168	1,696	4	5.996	WZ 3006 - 3.5 mm			
17	7	4,000.00	333	358	1,432.40	118.0	1.7%	24.351	170	1,867	4	6.088	WZ 3006 - 3.5 mm	1,866.71 Kg	10.776	20,115.62
18	7	4,000.00	358	383	1,532.00	118.0	1.7%	25.278	177	2,044	4	6.320	WZ 2506 - 5.5 mm			
19	7	4,000.00	383	408	1,632.00	118.0	1.6%	26.112	183	2,226	4	6.528	WZ 2506 - 5.5 mm			
20	7	4,000.00	408	433	1,732.00	118.0	1.6%	26.846	188	2,414	4	6.712	WZ 2506 - 5.5 mm			
21	7	4,000.00	433	458	1,832.00	118.0	1.5%	27.480	192	2,607	4	6.870	WZ 2506 - 5.5 mm			
22	7	4,000.00	466	491	1,964.00	118.0	1.5%	29.460	206	2,813	4	7.365	WZ 2506 - 5.5 mm			
23	7	4,000.00	499	524	2,096.00	118.0	1.4%	29.344	205	3,018	4	7.336	WZ 2506 - 5.5 mm			
24	7	4,000.00	532	557	2,228.00	118.0	1.4%	31.192	218	3,237	4	7.798	WZ 2506 - 5.5 mm	3,236.69 Kg	10.131	32,790.90