

MODELOS MATEMATICOS EN SISTEMAS ACUICOLAS DE RECIRCULACIÓN (RAS): UNA REVISIÓN

Jesús Leonel Arce Valdez*; Osbaldo Aragón Banderas*; Luis Néstor Coria de los Ríos**;

Paul Antonio Valle Trujillo**; Yolocauhtli Salazar Muñoz ***

*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de la Región de los Llanos (ITSRL)

Calle Tecnológico #200 Ote. Guadalupe Victoria, Durango CP. 34700 Tel: (676) 882 3712

** Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana

Calz. del Tecnológico 12950, Tomas Aquino, Tijuana, B.C.CP. 22414 Tel: (664) 607 8400

*** Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Durango

Blvd. Felipe Pescador 1830, Nueva Vizcaya, Durango, Dgo. CP. 34080 Tel: (618) 829 0900

Email: jesus.av@regionllanos.tecnm.mx

RESUMEN.

En este artículo, se lleva a cabo una revisión de la literatura para analizar el modelado en sistemas acuícolas de recirculación. Se identificaron 38 artículos publicados entre 2009 y 2022, que emplean diversas tecnologías, como modelado matemático, lógica difusa, procesamiento de imágenes, Internet de las cosas (IoT) y máquinas de vectores de soporte. Estas tecnologías permiten el monitoreo y control de variables clave, como oxígeno disuelto, temperatura, pH y niveles de amoníaco y nitrato. Además, se automatizan procesos como el conteo y medición de poblaciones de peces. Los modelos matemáticos son esenciales para predecir el comportamiento de las poblaciones de peces y optimizar la producción en sistemas acuícolas. Estas tecnologías pueden mejorar la eficiencia y la toma de decisiones en la acuicultura.

Palabras clave: Modelado acuícola, Recirculación, Tecnologías acuícolas, Automatización, Modelos matemáticos, Control de calidad del agua.

ABSTRACT.

This article presents a literature review to analyze modeling in recirculating aquaculture systems. A total of 38 articles published between 2009 and 2022 were identified, employing various technologies such as mathematical modeling, fuzzy logic, image processing, Internet of Things (IoT), and support vector machines. These technologies enable monitoring and control of key variables such as dissolved oxygen, temperature, pH, and ammonia and nitrate levels. Additionally, processes like fish population counting and measurement are automated. Mathematical models are crucial for predicting fish population behavior and optimizing aquaculture production. These technologies can enhance efficiency and decision-making in aquaculture.

Keywords: Aquaculture modeling, Recirculation, Aquaculture technologies, Automation, Mathematical models, Water quality control.

1. INTRODUCCIÓN.

Este artículo presenta una revisión exhaustiva de la evolución de las técnicas de adquisición de datos y el modelado matemático utilizado en el control y predicción de sistemas de recirculación en acuicultura. La acuicultura ha experimentado un rápido crecimiento y se prevé que siga expandiéndose, impulsada por la creciente demanda de pescado y la disminución de la pesca de

captura [1] [2]. Sin embargo, también enfrenta importantes desafíos, como la calidad del producto, la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental [3]. Un enfoque prometedor para lograr una producción sostenible es el sistema de recirculación acuapónica, que combina la crianza de peces y vegetales en un sistema basado en la recirculación de agua [4] [5].

El modelado matemático se presenta como una herramienta valiosa para mejorar y optimizar los sistemas acuícolas y comprender la dinámica poblacional. Las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) han sido ampliamente utilizadas para construir modelos matemáticos, y han demostrado ser útiles en otras áreas de la ecología de poblaciones [6] [7]. Sin embargo, aún hay un amplio potencial por explorar en su aplicación en acuicultura y pesquerías [8].

Este artículo revisa las técnicas de adquisición de datos y modelado matemático utilizadas en el control y predicción de sistemas de recirculación en acuicultura, destacando su utilidad y el potencial por explorar.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Problema.

En [9] Rojas identifica tres problemas principales que pueden surgir en los sistemas acuícolas de recirculación (RAS). El primero se relaciona con la intermitencia en el suministro eléctrico, lo que puede detener los procesos de tratamiento del agua y requiere una rápida respuesta para evitar pérdidas totales. Se destaca la importancia de contar con respaldos energéticos adecuados para evitar estos inconvenientes.

El segundo problema se relaciona con el alimento utilizado en los sistemas RAS. Se enfatiza la necesidad de que el alimento mantenga su consistencia y no genere partículas micronizadas, lo que optimizará la eficiencia de las tecnologías de remoción de sólidos suspendidos y minimizará la turbidez del agua y el tercer problema, aunque menos analizado hasta ahora, está asociado con el uso de agua de mar o sal para salinizar los sistemas RAS, con el propósito de prevenir enfermedades o para procesos de esmoltificación.

En la búsqueda de mejorar la calidad del producto en la acuicultura, se ha incrementado el interés en investigar los factores que afectan el consumo de alimento en animales acuáticos [10]. En este sentido, la utilización de modelos

matemáticos podría ofrecer soluciones a los problemas mencionados. Mediante la simulación y predicción de diversos escenarios y condiciones, estos modelos permitirían evaluar el impacto de la intermitencia en el suministro eléctrico y tomar medidas preventivas. También sería posible analizar el comportamiento del alimento en los RAS y su influencia en la calidad del agua, lo que favorecería la optimización del tipo de alimento empleado. Asimismo, los modelos podrían simular el uso de agua de mar o sal y prever los riesgos de formación de compuestos tóxicos, ayudando en la elección de las sales adecuadas. En resumen, los modelos matemáticos se presentan como herramientas valiosas para predecir y prevenir problemas en los RAS.

2.2. Sistemas acuícolas de recirculación (RAS).

Los sistemas de producción intensiva de peces, conocidos como RAS (Recirculating Aquaculture Systems), involucran una serie de pasos donde se aplica la limpieza y reciclaje del agua mediante diversas técnicas. Esto permite reutilizar el agua en el sistema. Los RAS están diseñados para eliminar partículas sólidas en el agua, como heces de peces, alimentos no consumidos y flóculos bacterianos [11]. También incluyen biofiltros nitrificantes que convierten el amoníaco excretado por los peces en nitrato [12], y dispositivos de intercambio de gases que eliminan el dióxido de carbono disuelto expulsado por los peces y/o añaden el oxígeno necesario para los peces y las bacterias nitrificantes [13].

La tecnificación de los RAS ha abierto amplias oportunidades para la investigación aplicada. Según [14], algunos de los principales parámetros que se deben medir en los RAS para evaluar la calidad del agua y la eficiencia de un sistema de recirculación cerrado son el oxígeno disuelto, el pH, el amoníaco y los nitritos. Estos parámetros tienen un impacto significativo en el crecimiento de los alevines, y su medición puede realizarse mediante la ganancia de peso, la tasa de crecimiento absoluto, la tasa de crecimiento específico, la conversión alimentaria y el coeficiente térmico de crecimiento. Estos indicadores son cruciales para evaluar la eficiencia del sistema y optimizar las condiciones de crianza en los RAS.

Los RAS ofrecen un enfoque avanzado para la acuicultura intensiva, y la medición y comprensión de los parámetros clave en estos sistemas son fundamentales para garantizar un crecimiento óptimo y una producción sostenible de especies acuáticas.

2.3. Modelos matemáticos.

Un modelo se define como una representación simplificada de un sistema real o proceso, utilizando ecuaciones que aproximan la relación estímulo-respuesta. Estos modelos son herramientas computacionales que permiten analizar y evaluar sistemas acuíferos, además de predecir sus respuestas ante estímulos como el bombeo en pozos o las acciones correctivas para abordar la contaminación [15].

En un estudio reciente, se presentan diversos métodos y técnicas utilizados en el modelado matemático, abordando aspectos como la formulación, validación y simulación. Se destaca la importancia de seleccionar adecuadamente las variables, representar los datos y comprender los resultados obtenidos. Se demuestra cómo el modelado matemático se convierte en una herramienta poderosa para la resolución de problemas y la toma de decisiones en este campo [16].

Los modelos matemáticos son fundamentales para comprender y predecir el comportamiento de sistemas acuíferos y son valiosos recursos para abordar desafíos y tomar decisiones informadas en el ámbito de la hidrología y la gestión de recursos.

2.4. Adquisición de datos en RAS.

La adquisición de datos es un proceso mediante el cual se realizan mediciones de fenómenos físicos y se registran para su posterior análisis. En el contexto de los RAS, se pueden distinguir dos formas de adquisición de datos: la tradicional manera manual y la utilización de tecnologías avanzadas como la industria 4.0 y las tecnologías de Internet de las cosas (IoT).

En los RAS, varios factores influyen en el crecimiento de la biomasa. Un estudio realizado en 2021 se centró en la alimentación de los alevines como objeto de investigación y llevó a cabo tres experimentos, variando la frecuencia de la ingesta. Los resultados demostraron que la alimentación tres veces al día resulta más beneficiosa [17]. La frecuencia de alimentación es crítica tanto para reducir costos como para mantener una buena calidad del agua [18]. La sobre alimentación puede causar desperdicio de alimento y deterioro de la calidad del agua, especialmente cuando hay partículas en suspensión, lo que a su vez lleva a una disminución en los niveles de oxígeno disuelto y un aumento en los niveles de amoníaco [19].

La adquisición de datos en los RAS es esencial para obtener información que permita tomar decisiones informadas y optimizar el rendimiento de la acuicultura. Un manejo adecuado de la alimentación y el monitoreo constante de la calidad del agua son aspectos cruciales para el éxito y la sostenibilidad de estos sistemas, así como para la creación de modelos matemáticos que describan la dinámica en dichos sistemas.

3. METODOS.

Para responder a las preguntas de la investigación se ha hecho una revisión de la literatura utilizando dos criterios de inclusión. El primero es el uso de palabras clave "Growth kinetics modeling of fish in recirculating systems", "Modeling water dynamics and distribution in recirculating aquaculture systems", "Mass and heat transfer models in recirculating systems", "Modeling water quality and nutrient dynamics in recirculating systems", "Optimization and control models in recirculating aquaculture systems", "Sensitivity analysis and scenario simulation in recirculating systems", "modeling in recirculating aquaculture systems," "recirculating aquaculture modeling review", donde se

encontraron estudios de modelado en sistemas acuícolas de recirculación.

Las búsquedas se hicieron mediante las bases de datos Google Académico, Redalyc, IEEE Xplore, World Wide Science, CONRICyT, ScienceDirect, Scopus. Después de realizar la búsqueda, se obtuvo un total de 38 artículos que van desde el año 2009 hasta el 2022, entre los cuales se encuentran en su mayoría extranjeras.

Además, se realizaron búsquedas en revistas especializadas en acuicultura, ingeniería ambiental, ingeniería acuática y temas relacionados para encontrar estudios y revisiones sobre el modelado en sistemas acuícolas de recirculación.

Con base en la información analizada, se ha recopilado todo lo necesario para organizarla de manera concisa en 2 tablas. En la Tabla 1 se muestra la clasificación de cada artículo según la técnica de adquisición de datos utilizada, junto con los objetivos principales de las investigaciones y las variables manipuladas, así como el año de publicación. Por otro lado, en la Tabla 2 se analiza la tendencia de investigaciones recientes, dividiéndolas entre aquellas que emplean modelado mecanicista y las que utilizan sistemas de ecuaciones diferenciales.

3.1. Industria 4.0 y Tecnologías IOT

La Industria 4.0 se refiere a la automatización y digitalización de los procesos de producción, incorporando tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el big data, el Internet de las cosas, la robótica y la realidad aumentada, entre otras. En el campo de la acuaponía, la Industria 4.0 ofrece oportunidades para optimizar y controlar los procesos de producción, mejorar la eficiencia energética, reducir los costos y aumentar la calidad y cantidad de la producción.

Un método propuesto [20] para predecir los niveles de oxígeno disuelto en el agua de acuicultura en un sistema de acuaponía implica el uso de un modelo de red neuronal artificial (RNA). El modelo de RNA se entrena utilizando datos históricos de niveles de oxígeno disuelto y otros parámetros relevantes, como la temperatura del agua, el pH, los niveles de amoníaco y nitrato, y la tasa de flujo de agua.

La tecnología IoT, que consiste en una red de dispositivos interconectados que se comunican a través de internet para recopilar, analizar y compartir información en tiempo real, también encuentra aplicaciones en la acuaponía. En este campo, la tecnología IoT se emplea para monitorear y controlar parámetros críticos del sistema, como la calidad del agua, la temperatura, el pH y los niveles de oxígeno, entre otros. Además, puede automatizar la alimentación de los peces y las plantas, así como controlar el clima y la iluminación en los invernaderos.

Un ejemplo de aplicación describe el diseño de un sistema electrónico para la automatización de la crianza de peces. Este sistema incorpora una serie de sensores para medir los parámetros ambientales relevantes, como la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH del agua. También cuenta con una pantalla LCD para mostrar la información recopilada y una interfaz de usuario para ajustar los parámetros del sistema [21].

El sistema, logra un monitoreo y control preciso de los parámetros ambientales, lo que conduce a una crianza de peces más eficiente y rentable.

El uso de modelos de redes neuronales como la aplicación de tecnología IoT en la acuaponía representan avances significativos en el campo de la acuicultura moderna. Estas soluciones tecnológicas permiten una gestión más eficiente y sostenible de los sistemas de producción acuícola, contribuyendo al crecimiento y desarrollo de la industria.

3.2. Obtención de datos manual.

Guevara [22] menciona en su trabajo acerca de la investigación, análisis y adquisición de datos que permitieron monitorear parámetros importantes del agua en sistemas acuáticos. La temperatura del agua está influenciada por la absorción de radiación solar en las capas superficiales del líquido y está asociada a la energía cinética de las moléculas de agua. El oxígeno es el parámetro fisicoquímico más crucial en el cultivo de especies acuáticas. Por otro lado, la salinidad se refiere a la concentración total de iones disueltos en el agua y puede tener efectos significativos en el comportamiento post-larval, particularmente en la regulación osmótica. En el trabajo de Mesa Villegas titulado "Evaluación de la eficiencia de un sistema de acuaponía por biofiltración en el sistema RAS" [23], se llevó a cabo una evaluación de un sistema experimental de acuaponía que combinaba la producción de tilapia y diferentes tipos de lechuga durante un mes. El objetivo era evaluar la eficiencia de los sistemas acuapónicos en la remoción de algunos compuestos nitrogenados (NO_2 , NO_3 , NH_4) y comparar algunos parámetros fisicoquímicos (pH, O_2 , T°) con un grupo de control sin acuaponía. Para alcanzar estos objetivos, se instalaron cuatro unidades experimentales, dos con el sistema de acuaponía y dos como controles. Cada unidad experimental contenía aproximadamente 65 peces y 30 lechugas distribuidas en 3 camas flotantes. Se registraron los parámetros diariamente durante el tiempo del experimento y, cada semana, se pesaron los peces para determinar algunas variables zootécnicas.

Los resultados del estudio indicaron que en el sistema de acuaponía se logró una remoción de compuestos nitrogenados, y las variables zootécnicas de las tilapias en el tanque experimental fueron mayores en comparación con las del grupo control.

Estos trabajos demuestran la importancia de la adquisición y análisis de datos en la acuaponía, así como la eficacia de los sistemas acuapónicos en la remoción de compuestos nitrogenados y en el desarrollo zootécnico de las especies acuáticas, lo que confirma su potencial como una opción sostenible para la producción acuícola.

3.3. Acuicultura.

La acuicultura es una industria de rápido crecimiento en la producción de alimentos y juega un papel vital en satisfacer las necesidades de proteínas dietéticas para los humanos [24]. Se trata de la producción de seres vivos en el medio acuático, y ha surgido como un sector productivo primario paralelo a la

agricultura y ganadería. En los últimos 10 años, este sector ha experimentado un crecimiento notable a nivel mundial.

Muchas de las prácticas utilizadas en el manejo de los cultivos de peces u otros organismos acuáticos han sido tomadas directamente de la agricultura tradicional. La acuicultura no es una producción "mágica", sino una producción más dentro de las ya existentes, que puede ayudar al productor a aumentar con éxito sus ganancias; siempre que los proyectos hayan sido planificados ajustadamente desde el punto de vista técnico y económico [25].

Chen Jie et. al, proponen un modo de cultivo con una tasa de flujo de agua de circulación variable para mejorar la eficiencia del uso del agua y la energía en los sistemas de acuicultura recirculante (RAS), se utiliza un control PID difuso combinado con el modelo de predicción gris, tomando la concentración de oxígeno disuelto como el objetivo de control [26].

En otro estudio [27], analiza el cálculo del crecimiento de los peces, se evalúan las más utilizadas (relativa, absoluta, específica) y se comparan cinco funciones de crecimiento no lineales (logística, Gompertz, Von Bertalanffy, Kanis y Schnute). Estos métodos se aplican a un conjunto de datos empíricos de 150 rodaballos hembras cultivados en un RAS durante 340 días. Los resultados muestran que las tasas de crecimiento relativa y específica son las más adecuadas para describir el crecimiento de los peces en diferentes etapas y condiciones ambientales.

Los sistemas acuapónicos presentan la integración multitrofica de tres biosistemas: peces, plantas y bacterias, los cuales se benefician mutuamente a través de un sistema cerrado de circulación de agua [28]. La técnica permite aprovechar los desechos orgánicos producidos por algún organismo acuático como fuente de nutrición para las plantas; y a su vez, al tomar estos desechos, mejoran la calidad del agua para los peces, actuando como filtro biológico.

En el artículo presentado por Carly Bobak y Herb Kunze presentan un sistema de EDO's que tiene como objetivo modelar matemáticamente la dinámica de población y concentración presentes en un entorno acuapónico. Presenta un problema inverso con datos de peces y plantas para demostrar la capacidad del teorema para recuperar estimaciones de parámetros [29]. El artículo [30], presenta un modelo de crecimiento de peces bioenergético para la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas en un estanque de oxidación de aguas residuales en Tailandia. El modelo de crecimiento de peces, formulado como una ecuación diferencial ordinaria, se introduce para comprender el comportamiento del crecimiento de peces debido a varios factores ambientales, como la demanda de oxígeno disuelto (DO), la temperatura del agua, la concentración de plancton, el amoníaco y la demanda bioquímica de oxígeno.

3.4. Modelo matemático de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO's).

Las EDO's son una herramienta valiosa para el estudio y modelado de la dinámica de sistemas biológicos. El modelado

matemático puede ser una herramienta poderosa para predecir la estructura poblacional de las especies involucradas en la acuicultura.

Las EDO's permiten la construcción de modelos matemáticos que, a su vez, pueden utilizarse para desarrollar herramientas como la regresión simbólica y las leyes de crecimiento y evolución, que se han reportado en la literatura de sistemas biológicos y poblacionales.

Aunque estas herramientas han sido ampliamente utilizadas en áreas de la ecología de poblaciones, su aplicación en el contexto de la acuicultura ha sido poco explorada. La implementación de un buen modelo dinámico que permita predecir el crecimiento de la biomasa de la Tilapia Gris podría reducir los riesgos de inversión y convertirse en una opción viable para su aplicación en sistemas de producción de alimentos [15].

3.5. Modelado tipo mecanicista

El modelado tipo mecanístico es un enfoque matemático que se basa en la comprensión de los procesos físicos, químicos o biológicos subyacentes de un sistema para describir su comportamiento. Es decir, este enfoque se centra en identificar las relaciones causales entre las variables involucradas en un sistema y utiliza este conocimiento para desarrollar ecuaciones matemáticas que describan cómo se relacionan las variables y cómo cambian a lo largo del tiempo.

Este enfoque de modelado es útil en la acuicultura y otras áreas de la biología porque permite a los investigadores simular y predecir cómo los cambios en una variable afectarán otras variables del sistema. Por ejemplo, si se comprende cómo se absorben los nutrientes en el tracto digestivo de un pez, se pueden desarrollar modelos matemáticos para predecir la cantidad de alimento que un pez necesita para crecer y desarrollarse correctamente [31].

3.6. Sistema de EDO's.

El modelado directo de sistemas de ecuaciones diferenciales es un enfoque matemático utilizado para describir el comportamiento de sistemas dinámicos en términos de ecuaciones diferenciales. Este método implica la identificación de todas las variables que influyen en el sistema y la formulación de ecuaciones diferenciales que relacionan estas variables entre sí. Luego, se utilizan técnicas matemáticas para resolver estas ecuaciones y predecir el comportamiento del sistema en el tiempo.

En el contexto de la acuicultura, el modelado directo de sistemas de ecuaciones diferenciales puede utilizarse para predecir la dinámica de variables como la biomasa de los peces, la calidad del agua y la concentración de nutrientes en un sistema acuático. Estos modelos pueden ser útiles para los acuicultores y los gestores de recursos acuáticos para optimizar el rendimiento de los sistemas de producción, minimizar el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de la acuicultura [32].

En [33], se propone un nuevo modelo de curva de crecimiento para describir el crecimiento biológico. El modelo se basa en la

evolución de la tasa de crecimiento relativo (RGR) como una función del tiempo. Este modelo es capaz de describir la dinámica de crecimiento del pez con más precisión que otros modelos existentes, como el logístico, el de Gompertz o el exponencial. Además, García, en el año 2021, propuso un modelo matemático para predecir el crecimiento de bacterias lácticas (LAB) en fermentación por lotes. El modelo se basa en una función polinomial de tercer grado que describe las cuatro fases observadas en el crecimiento de LAB: latencia, exponencial, estacionaria y muerte. Este enfoque permite entender la dinámica no lineal de LAB y sus dependencias que varían en el tiempo.

4. RESULTADOS.

La tabla 1 cita artículos que presentan diversas aplicaciones de tecnologías como el modelado matemático, la lógica difusa, el procesamiento de imágenes, el Internet de las cosas (IoT) y las máquinas de vectores de soporte en sistemas acuícolas y cultivos.

Estas tecnologías permiten monitorear y controlar variables importantes como el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y los niveles de amoníaco y nitrato en el agua. También permiten automatizar procesos como el conteo y medición de poblaciones de peces, lo que reduce el tiempo y mejora la precisión en comparación con los métodos manuales. Además, los modelos matemáticos pueden ayudar a predecir el comportamiento de las poblaciones de peces y a optimizar la producción en sistemas acuícolas. El uso de tecnologías en la acuicultura y la producción de alimentos puede mejorar la eficiencia, reducir riesgos y facilitar la toma de decisiones.

La tabla 2 muestra la tendencia de publicaciones en las que se puede observar que tanto los métodos mecanicistas como los basados en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) han sido estudiados casi a la par. En cuanto a sus similitudes en sus modelos, se puede resumir lo siguiente:

Los artículos que utilizan un modelo mecanicista tratan sobre el modelado matemático y la aplicación de tecnologías en sistemas biológicos, en particular en la acuicultura y la producción de alimentos.

Los artículos [47], [48], [50] y [54] tratan sobre el modelado matemático y la aplicación de tecnologías en sistemas acuícolas, mientras que los artículos [49] y [51] se centran en el uso de tecnologías para el conteo automático de poblaciones de peces. Los artículos [52] y [53] tratan sobre el modelado matemático de sistemas biológicos en general. Estos artículos demuestran la utilidad del modelado matemático y la aplicación de tecnologías para entender y mejorar el comportamiento de sistemas biológicos complejos.

Los artículos que utilizan EDO tratan sobre el modelado matemático de sistemas biológicos, en particular de poblaciones de peces. Los artículos [55], [56], [57] y [61] tratan sobre el modelado matemático de sistemas biológicos en general, mientras que los artículos [58], [59], [60] y [63] se centran en el modelado de poblaciones de peces, en particular de la tilapia del

Nilo (*Oreochromis niloticus*). El artículo [62] trata sobre el modelado de la dinámica ecológica de una población de tres especies de peces en la Bahía de Chesapeake.

Tabla 1. Adquisición de datos en RAS

Técnica utilizada para el censo de variables	Artículo		Variables censadas, descripción	Año
Uso de tecnologías		[20]	El modelo propuesto utiliza datos históricos de los niveles de oxígeno disuelto y otros parámetros relevantes, como la temperatura del agua, el pH, los niveles de amoníaco y nitrato, y la tasa de flujo de agua, para realizar la predicción.	2018
		[21]	Identificación y validación de modelos en sistemas reales utilizando "Control System Toolbox" de Matlab. Interfaz diseñada para simular escenarios y estimar variables en proyectos piscícolas. Control de calidad del agua.	2018
		[34]	Presenta un modelo para estimar el oxígeno disuelto en un estanque de crianza de tilapias utilizando lógica difusa, se mide mediante un sensor o un equipo de medición multivariados para acuicultura	2009
		[35]	Presenta un sistema automático de procesamiento de imágenes para contar y medir las dimensiones geométricas de alevines de tilapia gris. El sistema logra una alta precisión y reduce el tiempo de cálculo en comparación con el método manual	2018
		[36]	El artículo propone un sistema IoT para monitorear y reportar en tiempo real los parámetros de calidad del agua de la quebrada "Las Cebollas" en Oicatá. El sistema ayuda a tomar acciones proactivas para proteger el ambiente y los pobladores.	2019
		[37]	El artículo describe el diseño de un sistema acuapónico monitoreado mediante Internet de las cosas e inteligencia artificial. La arquitectura de 4 capas permite el monitoreo de variables y toma de decisiones relacionadas con aire, suelo, agua, plantas y animales, con posibilidad de implementación en diferentes escalas.	2020
		[38]	El artículo presenta un estudio exploratorio de sistemas acuapónicos en Yakarta, Indonesia, utilizando modelos matemáticos dinámicos. Los resultados indican que el sistema con tilapia y tomate tiene una mayor eficiencia en el uso de nutrientes y agua, lo que sugiere un potencial para la adopción de acuaponía en Indonesia	2021
		[39]	El artículo analiza el uso de máquinas de vectores de soporte optimizadas para predecir la mortalidad en peces tilapia, lo que podría mejorar la crianza de estos peces. Esta técnica de modelado y predicción ha demostrado ser exitosa en diversas aplicaciones	2021
		[40]	Presenta un sistema de monitoreo remoto para redes WLAN mediante una sonda basada en tecnologías de IoT. El sistema adquiere datos usando una Raspberry Pi 4, notifica telemetrías a un broker MQTT en HiveMQ, almacena datos en una base de datos y muestra los resultados en una dashboard en Grafana	2022
		[22]	Describe el diseño e implementación de un módulo para adquirir datos de la calidad del agua en sistemas acuícolas utilizando un multisensor orientado al IoT. El proyecto tiene como objetivo monitorear parámetros importantes del agua en la producción de camarón en Ecuador para mejorar la eficiencia y reducir riesgos en la acuicultura	2022
Manual		[45]	Presenta el diseño y desarrollo de un sistema para el control y monitoreo de un cultivo acuapónico a pequeña escala utilizando tecnología de Internet de las cosas (IoT). El sistema permite supervisar y controlar variables importantes del cultivo, lo que facilita la toma de decisiones y mejora la eficiencia del proceso acuapónico.	2021
		[41]	El sistema permite medir y manipular las variables de presión y temperatura para obtener el periodo de oscilación del densímetro, reduciendo el tiempo y mejorando la precisión en comparación con el control manual. También permite la adquisición de datos en tiempo real y el registro histórico de las mediciones	2014
		[42]	Presenta un sistema diseñado para automatizar la recirculación de agua caliente en el hospital IESS Latacunga utilizando hardware libre. El proyecto tiene como objetivo mejorar la eficiencia y eficacia del sistema de recirculación, permitiendo un mejor control y monitoreo de este.	2015
		[43]	Presenta un estudio sobre la evaluación de parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación utilizado para la producción de tilapia roja. El estudio analiza y evalúa parámetros como pH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, alcalinidad, nitratos, amonio total, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno	2018
		[44]	Describe el proceso de automatización de un cultivo vertical de <i>Pleurotus Ostreatus</i> para incrementar la producción de cuerpos fructíferos y analizar la producción de quitina. El artículo incluye el estado del arte de la investigación y el diseño del sistema de adquisición de datos de temperatura y humedad del cultivo.	2020

Los modelos matemáticos ayudan a comprender diferentes factores, como la alimentación, el medio ambiente y las interacciones entre especies, afectan el crecimiento y la

supervivencia de las poblaciones de peces. Además, estos modelos pueden ser útiles para optimizar la producción en sistemas acuícolas y para desarrollar estrategias sostenibles para la gestión de poblaciones de peces. Estos artículos muestran cómo el modelado matemático puede ser una herramienta valiosa para el estudio y la gestión de sistemas biológicos.

Tabla 2. Técnica de modelado

Tipo de modelado matemático	Artículo		Año de publicación
	Mecanicista	[54]	2014
		[46]	2009
		[33, 34, 47, 49]	2018
		[48]	2019
		[50, 51]	2021
		[52, 53]	2022
	Edos's	[30, 55]	2012
		[56]	2017
		[21, 57, 58]	2018
		[32, 59]	2019
		[60]	2020
		[61, 62, 63]	2021

5. DISCUSIÓN

La revisión de la literatura presentada en este artículo muestra la evolución de las técnicas de adquisición de datos y el modelado matemático utilizado en el control y predicción de sistemas de recirculación en acuicultura. Los resultados indican que tanto los métodos mecanicistas como los basados en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) han sido ampliamente estudiados y aplicados en sistemas acuícolas y cultivos.

El modelado matemático y las tecnologías como, la lógica difusa, el procesamiento de imágenes, el Internet de las cosas (IoT), permiten monitorear y controlar variables importantes en la acuicultura y la producción de alimentos, como el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y los niveles de amoníaco y nitrato en el agua. También permiten automatizar procesos como el conteo y medición de poblaciones de peces, lo que reduce el tiempo y mejora la precisión en comparación con los métodos manuales.

6. CONCLUSIONES

La revisión exhaustiva de la literatura presentada en este artículo arroja luz sobre la evolución de las técnicas de adquisición de datos y el modelado matemático en el control y predicción de en RAS. Se destaca que tanto los métodos mecanicistas como los basados en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) han sido ampliamente estudiados y aplicados en sistemas acuícolas y cultivos, lo que refleja la creciente importancia de la tecnología en este campo.

Las tecnologías mencionadas, han demostrado ser herramientas cruciales para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la

acuicultura y la producción de alimentos. Algunas ventajas clave de su aplicación incluyen:

Monitoreo Preciso y en Tiempo Real: Permite el monitoreo constante y preciso de variables críticas, como el oxígeno disuelto, la temperatura y los niveles de amoníaco y nitrato. Reduciendo el riesgo de condiciones subóptimas para los peces y mejora la toma de decisiones para la gestión del sistema.

Automatización Avanzada: La automatización de procesos, como el conteo y medición de poblaciones de peces, a través de tecnologías de procesamiento de imágenes y IoT, ahorra tiempo y aumenta la precisión en comparación con los métodos manuales. Esto es fundamental para la eficiencia operativa.

Predicción y Optimización: El modelado matemático se ha revelado como una herramienta para prever el comportamiento de las poblaciones de peces en función de diferentes factores. Que facilita la optimización de la producción y también permite el desarrollo de estrategias sostenibles de gestión de poblaciones de peces.

Sin embargo, es importante destacar algunas limitaciones y desafíos que se han encontrado hasta ahora:

Costos Iniciales: La implementación de estas tecnologías a menudo implica costos iniciales significativos, que pueden ser una barrera para las pequeñas operaciones acuícolas.

Requerimientos de Mantenimiento: Las tecnologías de monitoreo y automatización requieren un mantenimiento constante para garantizar su eficacia a largo plazo.

Seguridad Cibernética: La creciente dependencia de tecnologías digitales también aumenta la preocupación por la seguridad cibernética, especialmente en sistemas críticos como la acuicultura.

En cuanto a las tendencias futuras en el modelado y su uso en sistemas RAS, se espera que la investigación continúe en áreas como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, lo que podría mejorar aún más la capacidad de previsión y optimización. Además, se anticipa una mayor colaboración interdisciplinaria entre científicos de datos, biólogos marinos e ingenieros para abordar los desafíos y oportunidades emergentes en la acuicultura y la producción de alimentos. La sostenibilidad seguirá siendo una preocupación central, con un enfoque en la reducción del impacto ambiental y la producción responsable de alimentos de alta calidad. El futuro del modelado y la tecnología en la acuicultura es prometedor y seguirá desempeñando un

papel crucial en la mejora de la eficiencia y la gestión de estos sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Brugère, "Global aquaculture outlook in the next decades: an analysis of national aquaculture production forecasts to 2030," 2004. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/y5648e/y5648e.pdf>.
- [2] O. Board, "Sustaining marine fisheries. National Academies," 1999. [Online].
- [3] T. Watanabe, "Strategies for further development of aquatic feeds. Fish. Sci.," 2002, pp. 242-252.
- [4] M. Ulloa, "Evaluación de un sistema experimental de acuaponía," in *Avances en investigación agropecuaria*, 2005, pp. 1-5.
- [5] R. Tyson, "Reconciling Water Quality Parameters Impacting Nitrification in Aquaponics: The pH Levels.," *Estado de Florida Hort. Soc.*, 2004, pp. 79-83.
- [6] P. Edwards, "Misunderstandings, myths and mantras in aquaculture: its contribution to world food supplies has been systematically over reported," 2019, p. 103547.
- [7] B. Williams, "Analysis and management of animal populations," 2002.
- [8] J. A. Tyler, "Individual variability and spatial heterogeneity in fish population models," 1994, pp. 91-123.
- [9] P. Rojas Tirado, "RAS: Profundizarán en herramientas para medir calidad de agua microbiológica," 21 09 2018. [Online]. Available: <https://www.salmonexpert.cl/ras-profundizarn-en-herramientas-para-medir-calidad-de-agua-microbiologica/1297782>.
- [10] J. L. Zambonino, "Revista AquaTIC," 2006. [Online]. Available: <http://www.revistaaquatic.com/aquatic/art.asp?t=p&c=103..>
- [11] S. Chen, "Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and desing implications," 1993, pp. 143-155.
- [12] M. Gutierrez-Wing, "Biological filters in aquaculture: trends and research directions for freshwater and marine applications," in *Aquacultural engineering*, 2006, pp. 163-171.
- [13] J. Colt, "Applications of pure oxygen in fish culture," in *Aquacultural Engineering*, 1988, pp. 397-441.
- [14] A. Arnulfo, "Evaluación de los parámetros productivos y de calidad de agua en el cultivo de tilapia *Oreochromis niloticus* En sistemas de recirculación cerrada en laboratorio," 16 junio 2015. [Online]. Available: <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/1000/207.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [15] L. Konikow, in *Groundwater Modeling*, in *The Handbook of Groundwater Engineering*, 1999.
- [16] G. Leddert, "Undergraduate research in mathematical modeling," in *Journal of Mathematics and science: Collaborative Explorations*, 2021, pp. 17,39-52.
- [17] A. Fattah, "Impact of feeding system on the behaviour and performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)," in *Aquaculture*, 2021.
- [18] I. E. Behmene, "Feeding Level and Frequency Effects in Captive Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*)," in *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 2021, pp. 127-136.
- [19] S. Lall, "Nutrition, feeding, and behavior of fish," in *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, 2009, pp. 361-372.
- [20] Q. Ren, "A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system," in *Journal of Aquaculture Engineering and Fisheries Research*, 2018, pp. 67-75.
- [21] J. Díaz, "Diseño de un módulo electrónico para la crianza automatizada de peces mediante modelamiento matemático multiparamétrico," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000100103>.
- [22] E. C. Guevara Zambrano, "Diseño e implementación de módulo para adquisición de datos de la calidad del agua en sistemas acuícolas utilizando un multisensor orientado al IOT.," 2022. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23845/1/UPS-GT004092.pdf>.
- [23] L. Mesa Villegas, "Evaluación de la eficiencia de un sistema de acuaponía por biofiltración en el sistema RAS," 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/3185/1/20162114.pdf>.
- [24] A. Mahmoud, "The regulatory roles of yucca extract on the growth rate, hepatorenal function, histopathological alterations, and immune-related genes in common carp exposed with acute ammonia stress," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736287>.
- [25] D. E. Meyer, "Acuicultura," in *Introducción a la acuicultura*, Honduras, Zamorano, 2004.
- [26] C. Jie, "Intelligent Control and Management System for Recirculating Aquaculture.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECE48499.2019.9058567>.
- [27] V. Lugert, "A review on fish growth calculation: multiple functions in fish production and their specific application.," 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/raq.12071>.
- [28] S. Abdallah, "An Automatic Feeder with Two Different Control Systems for Intensive Mirror Carp Production.," pp. 2,18-32, 2014.
- [29] C. Bobak, "An inverse problem for a mathematical model of aquaponic agriculture.," 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4975642>.
- [30] N. Dampin, "Fish growth model for Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in wastewater oxidation pond," 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.042>.
- [31] J. García-Sabater, "Introducción al Modelado Matemático.," 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/158555>.
- [32] A. Vidal Meló, "El estudio de aplicaciones de los sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias a través de artículos científicos.," noviembre 2019. [Online]. Available: file:///C:/Users/Cool/Downloads/El_estudio_de_aplicaciones_de_los_sistemas_de_ecua.pdf.
- [33] M. Amiya Ranjan, "A new growth curve model for biological growth," 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15598608.2013.852030>.
- [34] F. J. Vilela López, "Diseño de un modelo de estimación del oxígeno disuelto en el estanque de crianza de tilapias de la UCP usando lógica difusa.," 2009. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/250>.
- [35] B. Mejía, "An Automatic System Oriented to Counting and Measuring the Geometric Dimensions of Gray Tilapia Fingerlings Based on Digital Image Processing.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/INTERCON.2018.8526426>.
- [36] L. Avendaño, "Sistemas IoT para supervisar la calidad en caudales superficiales, a partir de la normatividad ambiental," 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3448>.
- [37] J. C. Oviedo-Lopera, "Diseño de un sistema acuapónico monitoreado mediante internet de las cosas e inteligencia artificial.," 10 12 2020. [Online]. Available: <https://www.revistaespacios.com/a20v41n47/a20v41n47p05.pdf>.
- [38] N. B. Tarigan, "Explorative Study of Aquaponics Systems in Indonesia.," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su132212685>.
- [39] A. A. Ewees, "Optimized support vector machines for unveiling mortality incidence in Tilapia fish.," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.014>.
- [40] S. R. Correa Ruiz, "Implementación de un sistema de monitoreo remoto de indicadores de desempeño de conexiones de datos en redes WLAN mediante una sonda implementada con tecnologías de IOT.," 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/106be73c-6f81-4e2f-9caa-af2ad9eb68f3/content>.
- [41] J. J. Martínez Nolasco, "Sistema de monitoreo, adquisición de datos y control de un densímetro de tubo vibrante.," noviembre 2014. [Online]. Available: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/download/1442/1178>.
- [42] A. Meléndez, "Automatización de sistema de recirculación de agua caliente utilizando hardware libre en el hospital IESS Latacunga," diciembre 2015. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/19373>.
- [43] R. Valenzuela Vargas, "Evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un prototipo implementado en la producción de tilapia roja," 10 septiembre 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.usco.co/bitstream/123456789/3079/1/TH%20IA%2020253.pdf>.
- [44] A. Díaz Acero, "Diseño del sistema de control electrónico para la adquisición de datos de un cultivo vertical de *Pleurotus Ostreatus*," 2020. [Online]. Available:

- <https://revistas.sena.edu.co/index.php/sennova/article/download/4265/4452/20283>
- [45] J. E. Valencia Castillo, "Diseño e implementación de un sistema para el control y monitoreo de un cultivo acuapónico a pequeña escala basado en IOT," 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/9748b7d0-f3bc-477a-8551-1c3f5565ced1/content>.
- [46] W. Chen, "Coupled dynamics of energy budget and population growth of tilapia in response to pulsed waterborne copper," 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10646-012-0983-3>.
- [47] J. A. Sousa Júnior, "Mathematical modeling applied to the growth of tilapia in net cages in the sub middle of the Sao Francisco River," 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000500019>.
- [48] A. Lima, "Use of mathematical models in the study of bodily growth in GIFT strain Nile tilapia," 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000200005>.
- [49] B. Mejia, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/INTERCON.2018.8526426>.
- [50] R. Mahkeswaran, "Smart and Sustainable Home Aquaponics System with Feature-Rich Internet of Things Mobile Application. In internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence," 2020, pp. 369-383.
- [51] S. Zhang, "Automatic fish population counting by machine vision and a hybrid deep neural network model," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ani10020364>.
- [52] J. García-Sabater, "Introducción al Modelado Matemático," 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/158555>.
- [53] E. Rodríguez Talavera, "Differential equations system to describe bacterial growth, pH variation and lactic acid production in batch fermentation," 2021. [Online]. Available: http://revistaaristas.tij.uabc.mx/index.php/revista_aristas/article/view/101.
- [54] B. García, "Primary model for biomass growth prediction in batch fermentation," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/sym13081468>.
- [55] P. Valle Trujillo, *Análisis de sistemas biológicos*, Madrid, España: Universitaria Ramón Areces, 2012.
- [56] J. G. Villavicencio Pulido, "Dos Modelos para el Estudio de la Dinámica Poblacional de Peces Tilapia en Condiciones de Cultivo," 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.utm.mx/handle/123456789/169>.
- [57] G. Orlandoni-Merli, "Ecuaciones diferenciales de la física clásica. Interpretación y solución mediante dinámica de sistemas," 2018. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/5537/553756967006/html/>.
- [58] C. Bobak, "An inverse problem for a mathematical model of aquaponic agriculture," 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4975642>.
- [59] C. Jie, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECE48499.2019.9058567>.
- [60] A. Umar, "Modelling the growth of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) on fed diets formulated from local ingredients in cages," Septiembre 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/344238862_Modelling_the_Growth_of_Nile_Tilapia_Oreochromis_niloticus_on_Fed_Diets_Formulated_from_Local_Ingredients_in_Cages.
- [61] G. Leddert, "Undergraduate research in mathematical modeling," in *Journal of Mathematics and science: Collaborative Explorations*, 2021, pp. 17, 39-52.
- [62] I. Panayotova, "Modeling the ecological dynamics of a three-species fish population in the Chesapeake Bay," 2021. [Online]. Available: <https://scholarship.claremont.edu/codee/vol14/iss1/2>.
- [63] A. A. Ewees, "Optimized support vector machines for unveiling mortality incidence in Tilapia fish," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.0>