



UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS**

POSGRADO EN BIOCENCIAS

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION
AUTOMATIZADO, BASADO EN INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARA MEJORAR LA PRODUCCION
DEL CAMARON.**

TESIS

que para obtener el grado de:

DOCTOR EN BIOCENCIAS

presenta:

RAFAEL APOLINAR BÓRQUEZ LÓPEZ

Hermosillo, Sonora, México

15 de enero de 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Doctor en Biociencias** de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca de Ciencias Biológicas y de la Salud para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador del Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente

RAFAEL APOLINAR BÓRQUEZ LÓPEZ

Autor

DRA. NOHEMÍ GÁMEZ MEZA

Coordinadora del Programa de Doctorado en Biociencias

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION AUTOMATIZADO, BASADO
EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA MEJORAR LA PRODUCCION DEL
CAMARON

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

RAFAEL APOLINAR BÓRQUEZ LÓPEZ

APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis titulada "**Desarrollo de un sistema de alimentación automatizado, basado en inteligencia artificial para mejorar la producción del camarón**" presentada por Rafael Apolinar Bórquez López, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Biociencias.



Dr. Luis Rafael Martínez Córdova
Co-Director y Presidente



Dr. Ramón Casillas Hernández
Co-Director

Dr. José Antonio López Elías
Sinodal interno y Secretario



Dr. Ramón Héctor Barraza Guardado
Sinodal interno



Dr. José Cuauhtémoc Ibarra Gámez
Sinodal externo

DEDICATORIA

A mis padres Rafael Bórquez Olguín y Norma Alicia López Gastélum por haberme inculcado sus grandes valores, su paciencia y encaminarme hacia el mejor camino.

A mis hermanos Jesús José Bórquez López y Gabriela María Bórquez López por estar siempre a mi lado y apoyarme en todas mis decisiones.

A mis abuelos José Bórquez Ortega[†], Rosalina Olguín Núñez[†], Rodolfo López González[†] e Isabel Gastélum Espinoza por haber contado y contar siempre con su cariño.

A mis tíos que se adelantaron en el camino Apolinar Bórquez Olguín[†], Miguel Bórquez Olguín[†].

A mi tío Heriberto López Gastélum[†] por ser un ejemplo a seguir, su optimismo, buen sentido del humor, solidario y a luchar siempre como un guerrero.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Dr. Ramón Casillas Hernández y el Dr. Luis Rafael Martínez Córdova por haber creído en mí y apoyarme con unos de mis proyectos de vida, las cosas aprendidas por ellos son de gran valor tanto personal como profesional. Muchas gracias por su ayuda y asesoría durante estos cuatro años que sin ustedes esto no es posible. Al Dr. Ramón Héctor Barraza Guardado por su retroalimentación en mi trabajo y su disposición para ofrecer ayuda, Al Dr. José Antonio López Elías por su gran interés que mostro y además de ser una excelente persona, Al Dr. José Cuauhtémoc Ibarra Gámez por brindarme su ayuda en cada momento y materiales necesarios para la realización de mi trabajo. Gracias a todos ustedes por hacer mi trabajo de Doctorado una realidad.

A mis compañeros con los cuales conviví en estos cuatro años de Doctorado y que me compartieron también un poco de sus conocimientos.

RESUMEN

En el sistema de cultivo intensivo de camarón, el alimento formulado representa la principal fuente de nutrición y el principal costo de operación, por lo que un manejo adecuado del alimento permitirá mejorar la ecoeficiencia del cultivo. Basado en lo anterior, el objetivo general del presente trabajo fue diseñar y evaluar un sistema de alimentación dinámica considerando los cambios de temperatura, oxígeno disuelto, y utilizando la inteligencia artificial y las funciones matemáticas, para mejorar la alimentación del camarón. La implementación del sistema de alimentación se basó en lógica difusa. Para su evaluación fueron establecidos dos tratamientos experimentales y un control con sus respectivas réplicas, donde las variables temperatura y oxígeno disuelto fueron controladas. Durante los experimentos se utilizó alimento comercial formulado con el 35% de proteína, evaluando el consumo aparente, el factor de conversión (FCA), la tasa de crecimiento y la supervivencia del camarón. El oxígeno disuelto fue la variable que más influyó en el consumo de alimento (hasta en un 74%), con relación al control, en tanto que la temperatura influyó un 26% del consumo. El uso de la inteligencia artificial redujo significativamente ($P < 0.05$) el FCA hasta en un 35% comparado con el control, sin afectar la tasa de crecimiento y la supervivencia del camarón.

ABSTRACT

In intensive shrimp farming systems, formulated feed represents the main nutrition source as well as the major operative cost; its adequate management would permit improving the eco-efficiency of the culture. Based on that, the general objective of the present study was to design and evaluate a dynamic feeding system considering temperature and dissolved oxygen changes, and utilizing artificial intelligence and mathematical functions, to improve shrimp feeding. The implementation of the feeder system was based on fuzzy logic. For its evaluation were established two experimental treatments and a control with its respective replicates were established, where temperature and dissolved oxygen were controlled. During the experiment commercial formulated food was used (35% of crude protein), evaluating apparent food consumption, growth rate, feed conversion rate and shrimp survival. Dissolved oxygen was the variable that mostly influenced the feeding rate (74%) as compared to the control, while the temperature also did it, but in a lower grade (26%). The use of artificial intelligence reduced significantly ($P < 0.05$) the FCR by 35% compared to the control, without affecting growth rate and shrimp survival.

ÍNDICE GENERAL

	PÁGINA
APROBACIÓN	<i>i</i>
DEDICATORIA	<i>ii</i>
AGRADECIMIENTOS	<i>iii</i>
RESUMEN	<i>iv</i>
ABSTRACT	<i>v</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>viii</i>
INDICE DE TABLAS	<i>x</i>
ÍNDICE DE ECUACIONES	<i>xi</i>
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	4
1.1 Sistemas automatizados en la acuicultura	4
1.2 Sistemas de alimentación el cultivo del camarón	5
1.3 Estrategias de alimentación en el cultivo del camarón	6
II. HIPÓTESIS	8
III. OBJETIVOS	9
3.1 Objetivo General	9
3.2 Objetivos Específicos	9
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	10
4.1 Ubicación del Estudio	10
4.2 Descripción general del sistema de alimentación	10
4.3 Determinación de la tasa optima de alimentación	11
4.4 Efecto de la temperatura y el oxígeno disuelto en el consumo de alimento .	11
4.4.1 Efecto de la temperatura	12
4.4.2 Efecto del oxígeno disuelto	12
4.5 Desarrollo de un prototipo de alimentación basado en software y hardware	13
4.5.1 Descripción del hardware	13
4.5.2 Descripción del software	15
4.6 Desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad de agua	17
4.6.1 Descripción del hardware	17
4.6.2 Sensores de calidad de agua	19
4.6.2.1 Sensor de oxígeno disuelto	19
4.6.2.2 Sensor de temperatura	19
4.6.3 Desarrollo de software	19
4.7 Diseño, implementación y evaluación del sistema de control difuso	21
4.7.1 Diseño del sistema de lógica difusa	21

	PÁGINA
4.7.1.1 Entradas del sistema	22
4.7.1.2 Fusificación	23
4.7.1.3 Reglas difusas	24
4.7.1.4 Proceso de inferencia	25
4.7.1.5 Defusificación	25
4.7.1.6 Salidas del sistema	26
4.7.2 Evaluación de las estrategias dinámicas de alimentación	26
4.8 Análisis estadístico	27
V. RESULTADOS	28
5.1 Determinación de la tasa optima de alimentación	28
Tasa de alimentación	
5.2 Efecto del oxígeno disuelto y la temperatura en el consumo aparente	
5.3 Sistema de monitoreo de calidad de agua	
VI. DISCUSIÓN	
VII. CONCLUSIONES	
VIII. RECOMENDACIONES	
IX. LITERATURA CITADA	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Evolución de las técnicas de alimentación para los cultivos de camarón.	6
2	Diagrama a bloques del sistema automático de alimentación.	10
3	Diseño de experimento para la determinación de la tasa optima de alimentación.	11
4	Arreglo experimental para la determinación del efecto de la temperatura en el consumo aparente del alimento.	12
5	Arreglo experimental para la determinación del efecto del oxígeno disuelto en el consumo aparente del alimento.	13
6	Diagrama de flujo para el desarrollo del hardware para el prototipo de alimentación.	14
7	Diagrama de flujo para el desarrollo del software para el prototipo de alimentación.	16
8	Hardware utilizado para el monitoreo del índice de calidad de agua a) tarjeta de desarrollo Iteaduino/Arduino, b) depurador.	18
9	Diagrama de flujo del software para la comunicación con los sensores.	20
10	Funciones de pertinencia del índice de calidad de agua: (a) oxígeno disuelto, (b) temperatura, (c) pH y (d) índice de calidad de agua ICA. MB: muy bajo, B: bajo, N: normal, A: alto y MA: muy alto. (TMB: temperatura muy baja).	21
11	Estructura del modelo difuso utilizado para el desarrollo del sistema de alimentación.	22
12	Función de transferencia para el sistema difusa triangular, donde x es la variable de entrada; a, b y m, son las funciones de pertinencia.	23
13	a) Entrada difusa de la variable de temperatura (°C) y b) para oxígeno disuelto (mg/L); c) salida del sistema difuso como tasa de alimentación en porcentaje de biomasa (%).	24
14	Efecto de la tasa de alimentación en el peso final del camarón.	28
15	Relación de los compuestos nitrogenados con la tasa de alimentación.	
16	A) Efecto del consumo de alimento en función de la temperatura, B) Efecto del consumo de alimento en función del oxígeno disuelto.	
17	Comportamiento del índice de calidad de agua.	

- 18 Resultado de la simulación del controlador difuso.
- 19 Comportamiento de la temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de alimentación estática (% biomasa). MT: Temperatura media, MDO: Oxígeno disuelto medio and FP: Porcentaje de alimentación.
- 20 Comportamiento de la temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de alimentación estática (% biomasa). MT: Temperatura media, MDO: Oxígeno disuelto medio and FP: Porcentaje de alimentación.
- 21 Comportamiento de la temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de alimentación dinámica con lógica difusa (% biomasa). MT: Temperatura media, MDO: Oxígeno disuelto medio and FP: Porcentaje de alimentación.

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
1	Resumen de materiales utilizados para el Sistema de monitoreo de índice de calidad de agua.	29
2	Ejemplo de valores lingüísticos para obtener las reglas base para oxígeno disuelto, temperatura, pH y Calidad de agua (WQI); TL: temperatura baja, TMB: temperatura muy baja. O: oxígeno disuelto, T: temperatura, p: pH; N: normal, B: bajo, MB: muy bajo, A: alto, MA: muy alto. Ejemplo; TMB: temperatura muy baja	32
3	Reglas difusas utilizadas: Muy bajo oxígeno (VLO), bajo oxígeno (LO), oxígeno normal (NO), alto oxígeno (HO), muy alto oxígeno (VHO), muy baja temperatura (VLT), baja temperatura (LT), temperatura normal (NT), alta temperatura (HT), muy alta temperatura (VHT), muy baja tasa de alimentación (VLFR), baja tasa de alimentación (LFR), normal tasa de alimentación (NFR), alta tasa de alimentación (HFR) y muy alta tasa de alimentación (VHFR)	36
4	Tasas de alimentación y su efecto en los parámetros productivos	40
5	Efecto de la temperatura sobre el consumo de alimento	43
6	Efecto del oxígeno disuelto sobre el consumo de alimento	43
7	Datos estadísticos de las funciones matemáticas	45
8	Efecto de la temperatura y óptimo nivel de oxígeno disuelto sobre el índice de calidad de agua.	46
9	Efecto de la temperatura y bajo nivel de oxígeno disuelto sobre el índice de calidad de agua	46
10	Resultados promedios de los parámetros productivos del cultivo. NOB: Niveles de oxígeno disuelto bajos, NON: niveles de oxígeno disuelto normales.	52
11	Cantidad de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y fosforo (P) descargado por cada tonelada métrica de camarón producido.	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Intersección (AND) para fusificación.....	23
Ecuación 2. Centro de gravedad para defusificación.	25
Ecuación 3. Tasa de alimentación (%) en función del oxígeno disuelto.....	34
Ecuación 4. Tasa de alimentación (%) en función de la temperatura.....	34

INTRODUCCIÓN

La acuicultura mundial tiene el desafío constante de aumentar la producción en respuesta a la creciente demanda de la población en un entorno con recursos naturales limitados. En la actualidad la acuicultura aporta 73.8 millones de toneladas, esto representa el 45% del suministro total en el mundo con un valor de 160,200 millones de USD. La producción mundial de crustáceos fue de 6.9 millones de toneladas (36,200 millones de USD) (FAO, 2016). Tan solo en América la producción total de crustáceos fue de 716,525 toneladas. México produjo en el 2016, 211,096 toneladas, de las cuales el estado de Sonora aportó 59,098 toneladas, equivalentes al 28% de la producción nacional. El panorama del crecimiento acuícola para el 2025 en México es de 54.2%, el consumo per cápita 2013 – 2015 fue de 12.8 kg y para el 2025 será de 14.9 kg, es decir, un incremento del 16.4% (FAO, 2016; SAGARPA, 2017).

Debido a manejos inadecuados de la actividad acuícola, tales como la sobrealimentación, se han presentado diversas problemáticas en la acuicultura mundial, como es el caso de la eutrofización ocasionado principalmente por el alimento no consumido y lixiviado (Martínez-Córdova *et al.*, 2009).

La alimentación puede llegar a representar hasta más del 50% de los costos operativos de una granja de camarón; a causa de esto, las estrategias de alimentación y optimización del alimento son importantes en el manejo de un cultivo. Se ha demostrado que las estrategias de alimentación tienen un efecto directo en la calidad del agua y salud de los animales (Casillas-Hernández *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2002). La calidad del agua es uno de los factores más importantes en un cultivo de camarón; se ha demostrado que los parámetros fisicoquímicos como la temperatura y el oxígeno disuelto, afectan directamente el consumo de alimento (Martínez-Córdova *et al.*, 2013).

En la actualidad, se han desarrollado y aplicado en ciencias biológicas nuevas herramientas matemáticas las cuales ayuden a tomar decisiones (Leo *et al.*, 2016; Nunes and Parsons, 2006; Wu *et al.*, 2015). Particularmente en el caso de la acuicultura, estas herramientas pueden ser aplicadas para ajustar las estrategias de alimentación en función de

los efectos de determinados parámetros tales como la temperatura y oxígeno disuelto en el consumo de alimento.

En los cultivos intensivos de camarón, la nutrición de los organismos cultivados depende altamente de los alimentos formulados (Tacon *et al.*, 2011). El desafío de intensificar los cultivos, es poder maximizar la eficiencia de la alimentación al mismo tiempo del cuidado de la salud de sistema de cultivo y el entorno ambiental (Nunes and Parsons, 2006). Hasta el momento, la mayoría de los acuicultores alimentan los camarones basados en tablas convencionales, las cuales consideran el peso y la biomasa de los organismos para ajustar la tasa de alimentación. Otra práctica es mediante charolas de alimentación en la cual la tasa es ajustada de acuerdo al consumo aparente de alimento (Casillas-Hernández *et al.*, 2007; Martínez-Cordova *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 2002). Recientemente, las investigaciones sugieren que una mejor estrategia de alimentación debe de considerar el consumo real y asimilación del alimento, dependiendo de las condiciones ambientales.

Diversas técnicas de automatización (ON/OFF, funciones matemáticas e inteligencia artificial) se encuentran disponibles en la actualidad, siendo la más económica y fácil de implementar aquella conocida como ON/OFF (“Encendido y Apagado”); sin embargo, dicha estrategia está limitada al uso de sensores, y su aplicación se hace imposible para procesos en los que la precisión es requerida. La técnica más utilizada de automatización debido a los tiempos y costos moderados de implementación es la que está basada en funciones matemáticas. La inteligencia artificial es la técnica más compleja y de alto costo de automatización, su implementación requiere de personal altamente calificado, pero su aplicación logra hacer más eficientes los procesos de operación donde se utiliza. La inteligencia artificial también es conocida como IA; es otra forma de modelación, en este caso para sistemas biológicos, utilizando métodos como redes neuronales o lógica difusa, máquinas de estados o algoritmos evolutivos. El término lógica difusa fue introducido en 1965 por Lotfi Asker Zadeh como una forma de abordar los problemas de sentido común. Introdujo los conjuntos difusos: primero, en y después. Desde entonces, muchas investigaciones abordaron temas relacionados con la lógica difusa (Zadeh, 1975, 1965). La lógica difusa permite que los conocimientos de expertos en la actividad a manejar, puedan ser representados en un sistema en basado en reglas: if – then (Soto-Zarazúa *et al.*, 2010). De acuerdo con Lee (2000), los

sistemas de inteligencia artificial ofrecen a los acuicultores una metodología validada para implementar el manejo de sistemas de manera intuitiva e inferencial. El éxito de las aplicaciones comerciales de la IA ha sido también en otras áreas diferentes a los cultivos acuícolas.

I. ANTECEDENTES

1.1 Sistemas automatizados en la acuicultura

El diseño y la aplicación de los sistemas automáticos en la acuicultura deben de ser específicos para cada localidad. Los cambios están determinados por muchos aspectos que pueden variar de una región a otra, teniendo en cuenta principalmente el presupuesto disponible, así como las características físicas y químicas de los sitios. Dado que el mercado de cultivos especializados en México es relativamente pequeño, a veces no podemos justificar la importación de tecnologías automáticas y de detección ya que los costos son demasiados altos al ser fabricados en países industrializados, por lo que el desarrollo de los sistemas automatizados y componentes de bajos costos, puede cumplir con las necesidades de la región, además de lograr ser de la misma o superior calidad.

La automatización de los sistemas acuícolas (semi-intensivo, intensivo, híper-intensivo y sistemas de recirculación) deben de ser diseñados para permitir:

- (1) Una densidad óptima de siembra de los organismos cultivados a través del control de parámetros críticos como temperatura y oxígeno disuelto.
- (2) Un mejoramiento en el factor de conversión de alimento considerando crecimiento específico para el ajuste más exacto de las tasas de alimentación.
- (3) Mejor mantenimiento en la calidad de agua controlando los parámetros más importantes para mantener los niveles deseados.
- (4) Reducir la eutrofización e híper-nutricación producida por los efluentes en los ecosistemas receptores.
- (5) Prevención del estrés y consecuentemente una mayor resistencia de los organismos cultivados a las enfermedades.
- (6) Reducción de capital humano y manejo, en una industria que involucra una gran cantidad de actividades y procesos.

1.2 Sistemas de alimentación el cultivo del camarón

En la actualidad, la forma de alimentar en muchos países es empírica, siendo la dosis calculada a través de tablas provenientes de los fabricantes de alimentos comerciales y en ocasiones ajustadas por experiencia del técnico. Estas tablas se basan en un porcentaje de la biomasa estimada en el estanque (que a su vez es calculada a partir del peso promedio y la supervivencia) y de la talla del organismo. Estas tablas de alimentación no consideran la productividad natural ni los factores bióticos y abióticos que puedan afectar el consumo del alimento (Casillas-Hernández *et al.*, 2007; Martínez-Córdova *et al.*, 1998).

Existen diversas formas de suministrar el alimento del camarón; la más utilizada en México es al boleó, la cual consiste arrojar el alimento sin control alguno, basándose únicamente en tablas de alimentación publicadas por los fabricantes de alimento artificial y en la experiencia del técnico responsable. La alimentación en charolas es otra técnica para administrar el alimento; su ventaja radica en que el personal responsable de alimentar tiene la oportunidad de verificar consumos aparentes, lo que les permite ajustar de mejor manera las tasas de alimentación.

En el mercado existen diversos sistemas automáticos para suministrar alimento en granjas; los más comunes y económicos son programados por tiempos. Estos tipos de alimentadores están basados en temporizadores también conocidos como “timers” o por tiempos, la técnica de automatización a la que pertenecen es la ON/OFF. Estos alimentadores consisten en programar la hora y el intervalo de tiempo de encendido. La evolución de los sistemas electrónicos y computacionales ha permitido el avance y desarrollo de nuevos equipos como lo son los alimentadores automáticos basados en sonidos (Smith and Tabrett, 2013). El mencionado alimentador funciona con la instalación de un hidrófono en puntos estratégicos del estanque, este sistema evalúa el espectro de frecuencias de audio en la que el camarón emite sonidos a través de sus masticaciones, donde a mayor número de masticaciones detectadas el sistema se enciende y calcula la cantidad de alimento a dosificar, además de estar limitado a algunos periodos debido a las mudas del camarón; cuando el camarón expulsa su exoesqueleto tiende a ir al fondo del estanque para protegerse dejando también de comer. Este sistema es costoso y su funcionamiento está diseñado para operar a partir de camarones juveniles (Ullman, 2017)

Los alimentadores automáticos con inteligencia artificial ya han sido reportados para su uso en cultivos de tilapia (Soto-Zarazúa *et al.*, 2010), no obstante, para los cultivos de crustáceos y en particular el de camarón, donde las condiciones y los requerimientos son distintos, su implementación aún está en vías de desarrollo. Los alimentadores automáticos con inteligencia artificial consisten en programar la experiencia del ser humano y almacenarla en un chip microcontrolador, además de ser retroalimentado por sensores de las variables fisicoquímicas más importantes del agua para los cultivos acuícolas como temperatura y el oxígeno disuelto. Estos alimentadores no están limitados a un número de entradas de variables, además de ser versátiles, permitiendo manejar los períodos de muda mediante software. En la Figura 1 se muestra un esquema de la evolución de las técnicas de alimentación.

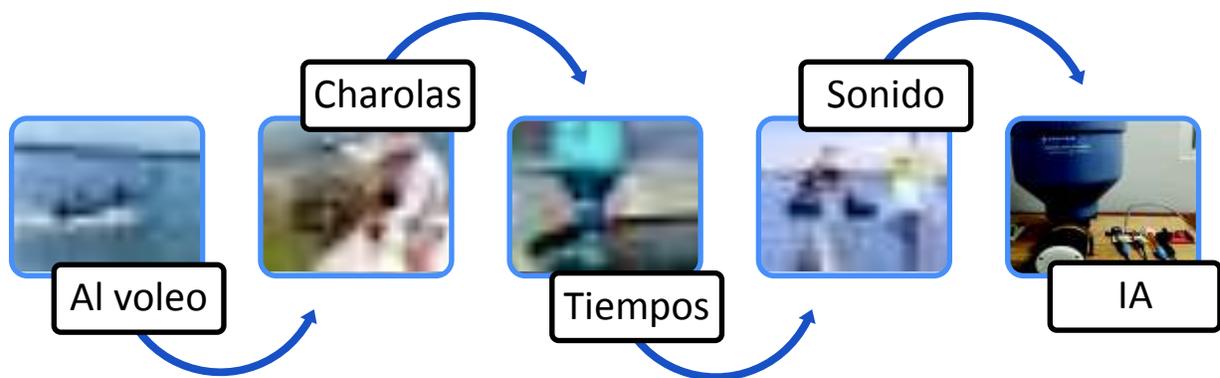


Figura 1. Evolución de las técnicas de alimentación para los cultivos de camarón.

1.3 Estrategias de alimentación en el cultivo del camarón

A través del tiempo se han desarrollado diversas estrategias de alimentación para el cultivo de camarón. La estrategia más común hasta hace poco tiempo, ha sido el uso de tablas de alimentación proporcionadas por los fabricantes de alimentos artificiales y ajustada en base a tallas por la experiencia del técnico de la granja (algunos verifican el consumo y reajustan la tasa de alimentación). La principal desventaja de la estrategia mencionada es que los ajustes se hacen verificando “algo que ya ocurrió”, sin embargo, el cultivo de camarón es un sistema

dinámico que está en constante cambio a través del tiempo al estar expuesto a las variables ambientales.

Otra alternativa para ajustar las tasas de alimentación, es en base a la productividad natural. Martínez *et al.* (1998), demostró que es posible reducir la tasa del 3% al 1.5% sin afectar el crecimiento y producción cuando la disponibilidad de la productividad natural supera los 40 g/m³.

La estrategia de alimentación en base a las condiciones climáticas considera los cambios de temperatura, más sin embargo es importante también considerar la disponibilidad de oxígeno disuelto ya que este factor es limitante para el consumo de alimento. En los estudios reportados no se ha hecho un análisis de sensibilidad para ver en qué porcentaje repercute el oxígeno disuelto y la temperatura en el consumo de alimento. Wyban *et al.* (1995), demostraron que a diferentes condiciones de temperatura el consumo de alimento se ve afectado de manera significativa.

II. HIPÓTESIS

Un sistema de alimentación dinámica para el camarón *Litopenaeus vannamei*, basado en inteligencia artificial, que ajuste la ración en función a cambios de temperatura y oxígeno disuelto, permitirá optimizar el consumo de alimento sin afectar la respuesta productiva del organismo.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema de alimentación dinámica considerando los cambios de temperatura y el oxígeno disuelto a través de la inteligencia artificial y funciones matemáticas, para mejorar la toma de decisiones y la competitividad en la industria del cultivo de camarón.

3.2 Objetivo específicos

- Evaluar a través de un bioensayo diferentes tasas de alimentación controladas por el equipo automatizado basadas en la biomasa del camarón y la calidad de agua para encontrar las tasas óptimas de producción.
- Evaluar a través de un bioensayo el consumo de alimento bajo diferentes condiciones de oxígeno y temperatura con el fin modelar y simular de forma dinámica las mejores tasas de alimentación.
- Desarrollar un nuevo prototipo de alimentación basado en software y hardware para el suministro del alimento en un cultivo intensivo de camarón.
- Desarrollar e implementar un sistema de adquisición de datos mediante el uso de sensores de oxígeno disuelto y temperatura para el monitoreo continuo de un cultivo de camarón.
- Implementar un sistema de control difuso con la aplicación de sensores de oxígeno y temperatura (calidad de agua) con el fin de mejorar la eficiencia de la alimentación.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación del estudio

El estudio fue realizado en las instalaciones del laboratorio de acuicultura del Instituto Tecnológico de Sonora Unidad Centro, situado en Ciudad Obregón, Sonora, México (27.48° 29' 2.1" N, 109.93° 56' 1.9" W).

4.2 Descripción general del sistema de alimentación

La nueva estrategia de alimentación propuesta, consta de tres etapas: (1) el desarrollo de un prototipo de alimentación con el uso de hardware y software (tasa de alimentación), (2) el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para el monitoreo continuo de calidad de agua (sensores) y (3) el desarrollo de un sistema de control con inteligencia artificial basado en lógica difusa (control difuso) como se muestra en la Figura 2.

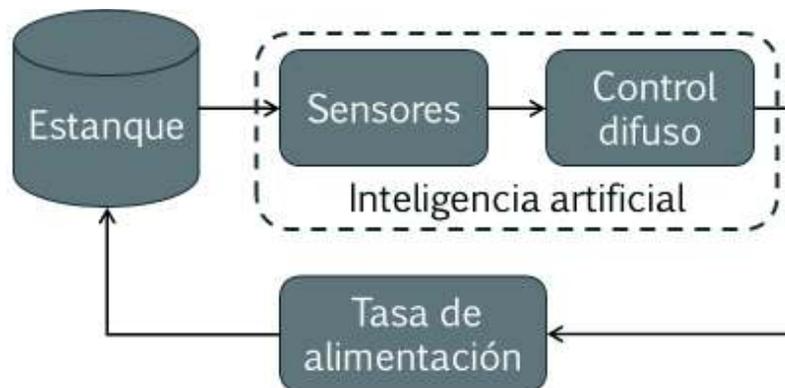


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema automático de alimentación.

4.3 Determinación de la tasa óptima de alimentación

Para establecer las tasas de alimentación experimental se consideraron las tablas de alimentación comercial (Vimifos 2013, Purina 2013, C.P. Group 1990, Nunes *et al.*, 2006) y algunas experiencias de granjas intensivas (com. per. de técnicos acuícolas y datos no publicados). La Figura 3. Muestra el diseño del experimento. Lo datos se analizaron mediante una prueba ANOVA a un $\beta = 0.95$; para el análisis posteriori se utilizó el método de TUKEY HSD. El paquete estadístico computacional utilizado fue Sigmaplot versión 11.0 para Windows.

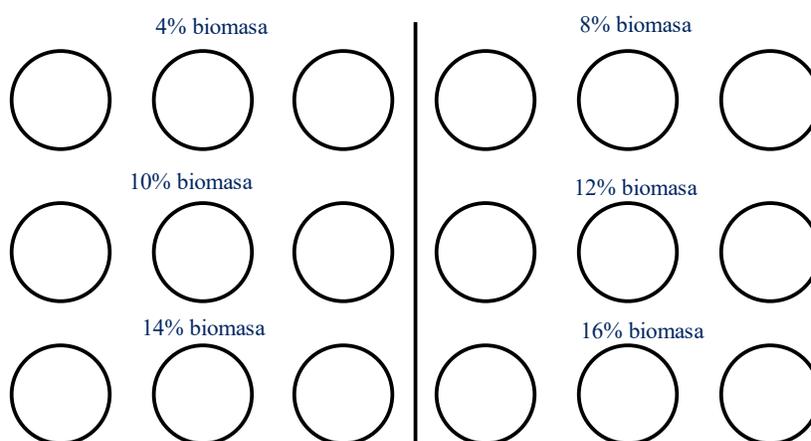


Figura 3. Diseño de experimento para la determinación de la tasa óptima de alimentación.

4.4 Efecto de la temperatura y el oxígeno disuelto en el consumo de alimento

El consume aparente de alimento fue calculado mediante la fórmula sugerida por Sick *et al.* (1973), como:

$$Ac(\%) = \frac{As - Anc}{As} \times 100$$

Donde Ac es el consume aparente, As es el alimento suministrado, y Anc es el alimento no consumido.

Mediante un análisis de sensibilidad se determinara el porcentaje que las variables ya mencionadas afectan el consumo aparente del alimento suministrado.

4.4.1 Efecto de la temperatura

Cuatro tratamientos se evaluaron por cuadruplicado, manteniendo el control de 4 temperaturas en habitaciones aisladas (22 ± 0.21 , 26 ± 0.54 , 30 ± 0.61 y $34\pm 0.43^\circ\text{C}$) a un nivel de oxígeno disuelto constante > 5 mg/L. Para mantener las condiciones de temperatura, se utilizaron unidades de aire acondicionado para los tratamientos de 22°C y 26°C . En los tratamientos con temperatura de 34°C y 36°C se utilizaron calentadores ambientales regulados por termostato; los controladores de temperatura fueron revisados constantemente cada 6 horas. Los organismos experimentales (juveniles de camarón con un peso medio de 0.96 ± 0.34 g) adquiridos de un laboratorio comercial, fueron colocados en 12 peceras a una densidad de 0.5 Org/L. Los animales fueron alimentados con un formulado comercial (35% de proteína) dos veces al día a una tasa de 20% de la biomasa por día. La Figura 4 muestra el arreglo experimental utilizado para determinar el efecto de la temperatura.

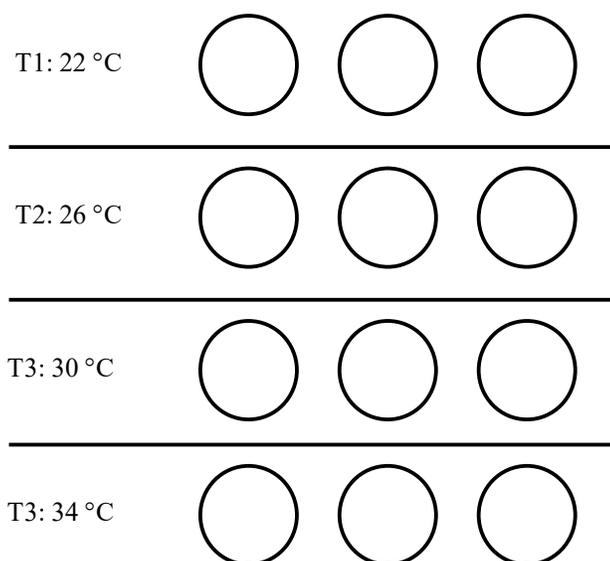


Figura 4. Arreglo experimental para la determinación del efecto de la temperatura en el consumo aparente del alimento.

4.4.2 Efecto del oxígeno disuelto

En la evaluación del efecto del oxígeno disuelto se realizaron tres tratamientos por triplicado, suministrando aire de forma controlada mediante el uso de las válvulas reguladoras para mantener la concentración de: 1-2 mg/L, 3-4 mg/L, y 5-6 mg/L, a una temperatura constante de

28±0.36 °C. Se utilizaron camarones juveniles con un peso promedio de 1.15±0.14g a una densidad de 0.5 animales/L como se muestra en la Figura 5. Fueron alimentados con un formulado comercial (35% de proteína), dos veces al día a una tasa del 20% de la biomasa durante 7 días.

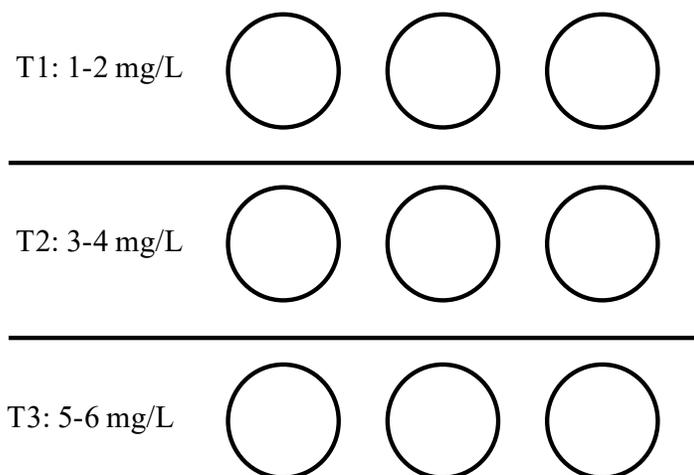


Figura 5. Arreglo experimental para la determinación del efecto del oxígeno disuelto en el consumo aparente del alimento.

4.5 Desarrollo de un prototipo de alimentación basado en software y hardware

Para desarrollar un nuevo prototipo para el suministro de alimento, se diseñó e implementó un software y hardware basado en las metodologías de Azam *et al.* (2009) y Simbeye *et al.*, (2014). El alimentador consta de un mecanismo dosificador llamado “tornillo sin fin” adaptado a un motor de corriente directa a 12 V, capacidad de almacenamiento de alimento de 20 kg diseñado para pellets de 1 – 10 mm.

4.5.1 Descripción del hardware

El hardware requerido para el control automático del alimentador fue diseñado mediante tarjetas digitales conocidas como microcontroladores a código abierto. El acoplamiento del hardware al sistema mecánico se hizo mediante el uso de un relevador. La Figura 6 muestra las etapas para la puesta en marcha del mecanismo dosificador. El sistema una vez que entra al

bloque de inicio, se queda en un ciclo llamado “loop” que es la espera de una señal para proceder a finalizar el diagrama de flujo, llegando a fin, de forma automática vuelve a inicio.

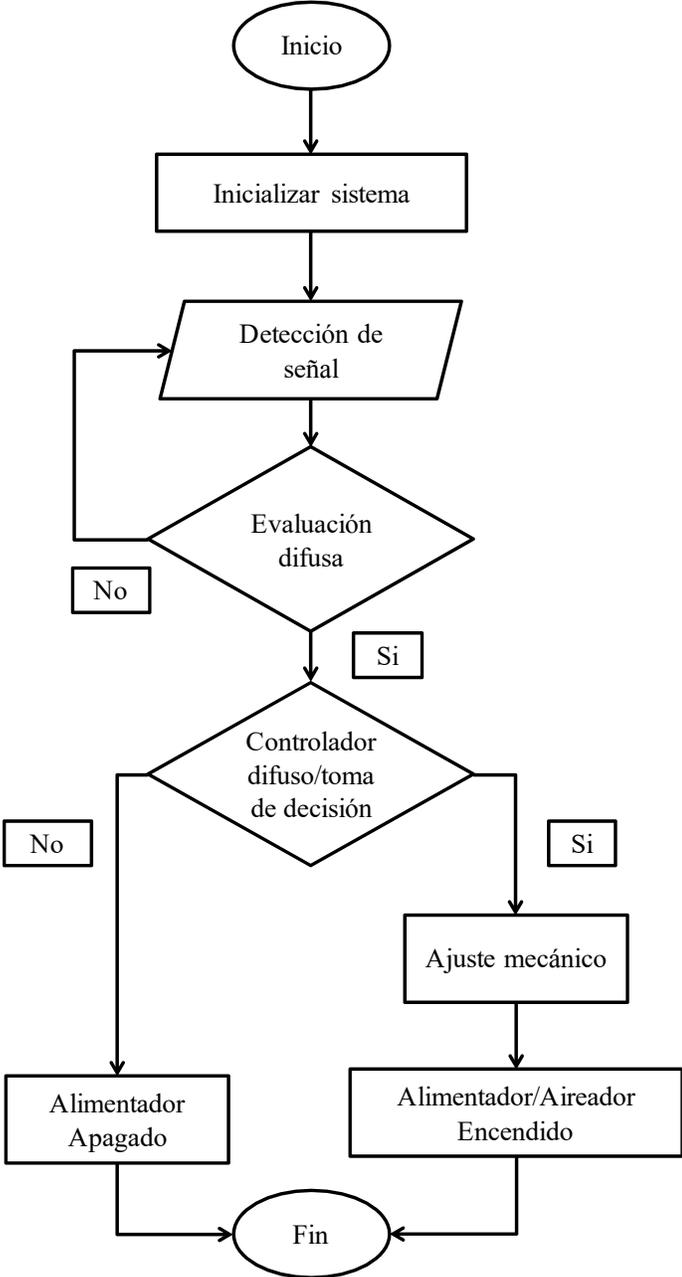


Figura 6. Diagrama de flujo para el desarrollo del hardware para el prototipo de alimentación.

4.5.2 Descripción del software

El sistema de interfaz gráfica (software) fue programado mediante el lenguaje de programación C#. La secuencia que se utilizó fue basada en la metodología de Simbeye *et al.*, (2014) como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 7. A través de la red inalámbrica de sensores se reciben los datos de las variables fisicoquímicas del agua para ser procesados, graficados y almacenados cada 10 minutos. Esto permite también la consulta de datos almacenados anteriormente para ser exportados y procesados por otro paquete computacional en caso de ser necesario.

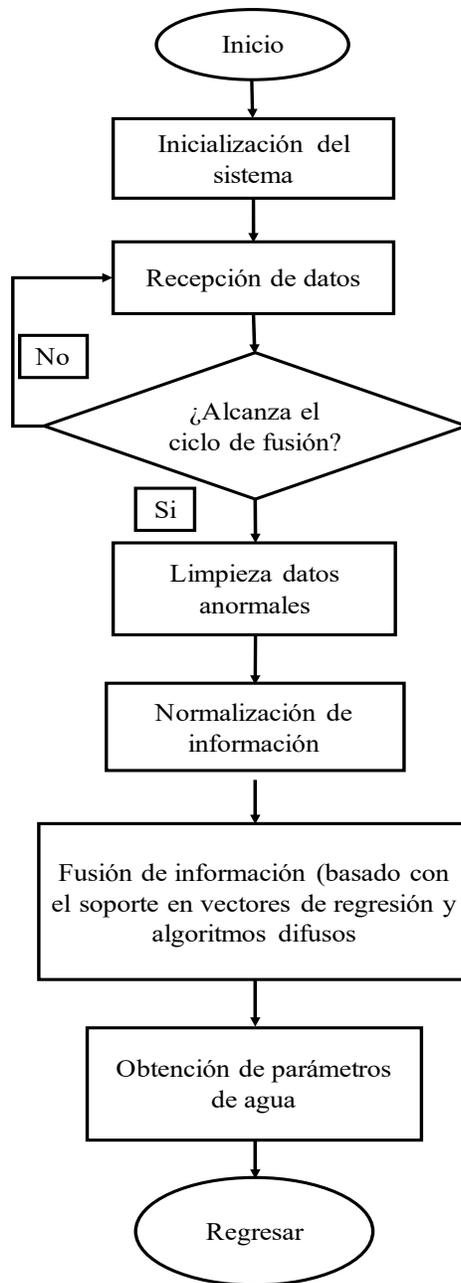


Figura 7. Diagrama de flujo para el desarrollo del software para el prototipo de alimentación.

4.6 Desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad de agua

4.6.1 Descripción del hardware

La implementación del sistema de monitoreo de calidad de agua fue basado en una plataforma de desarrollo Iteaduino/Arduino; las placas de desarrollo Arduino consisten en un microcontrolador fácil de utilizar (www.arduino.cc). Estas plataformas tienen la particularidad de ser sistemas a código abierto y son programadas en un lenguaje de programación similar a C++ (Mesas-Carrascosa *et al.*, 2015). En este estudio se utilizaron las plataformas Iteaduino/Arduino versión Mega que contienen un chip ATmega 2560 (hoja de especificaciones 2560, Atmel). Al ser de código abierto de Arduino, la placa utilizada es 100% compatible contando con las mismas características, con el mismo número de pines de entradas/salidas (56), modulador de ancho de pulso con resolución de 8 bit, un cristal oscilador de 16 MHz, puerto de comunicación serial universal UART, 256 KB de memoria flas, y 16 canales analógicos con resolución de diez bits. En la Figura 8 se muestra una fotografía de la placa electrónica (plataforma) utilizada y el depurador. El depurador empleado es fabricado por Atlas Scientific, con la función de introducir la información a la computadora y recibir las instrucciones del software; trabaja como un simple convertidor de USB a serial; con este dispositivo es posible energizar dispositivos externos que requieran alimentación de 5 voltios o 3 voltios de corriente directa. Los pines Rx y Tx como se pueden observar en la figura 2 son conectados a un transceptor inalámbrico ZigBee que es parte fundamental de la WSN, este transceptor fue alimentado con 3V del módulo depurador. Para un funcionamiento apropiado, fue realizado una calibración recomendada por los fabricantes de los sensores y se comparó con un equipo comercial, siendo este equipo comercial limitado al monitoreo continuo automático (data logging).

El papel del microcontrolador es gestionar y transmitir los datos de los sensores a una computadora. A través del multiplexor (controlado por el microcontrolador) se selecciona el sensor que se desea leer, transmitir, procesar y almacenar su dato. En la Tabla 1 se resumen los sensores utilizados para medir el oxígeno disuelto, temperatura y pH así como el hardware usado. Para asegurar un funcionamiento adecuado de los sensores, fueron calibrados acorde a las recomendaciones dadas por el fabricante. Las especificaciones técnicas de los sensores cumplen con los requisitos para ser utilizados en la acuicultura (www.atlas-scientific.com).



Figura 8. Hardware utilizado para el monitoreo del índice de calidad de agua a) tarjeta de desarrollo Iteaduino/Arduino, b) depurador.

Tabla 1. Resumen de materiales utilizados para el Sistema de monitoreo de índice de calidad de agua.

Producto	Descripción	Función
1 Tarjeta MEGA 2560	Tarjeta de desarrollo con microcontrolador ATMEL 2560.	Gestionar las lecturas de los sensores.
2 Módulos transceptores	XBee XBP24-BZ7UIT-004 red inalámbrica con alcance de una milla.	Transmitir la información vía inalámbrica.
1 Sensor de Oxígeno disuelto	Electrodo galvánico con ánodo de zinc y cátodo de plata.	Registro de datos de oxígeno disuelto.
1 Sensor de pH	Electrodo de plata con solución de referencia de cloruro de potasio.	Registro de datos de pH.
1 Sensor de temperatura	Sensor digital de temperatura con estándar de protección IP68.	Registro de datos de temperatura.
1 Depurador	Convertidor de datos de protocolo UART a USB.	Introducir los datos a la computadora.
1 Unidad de poder	Adaptador AC/DC con entrada de AC100~240V y DC9V 100mA de salida.	Proveer de energía eléctrica al sistema de monitoreo.
1 Computadora	Computadora personal HP modelo ProDesk 400 G1.	Procesar información, almacenamiento de datos.

4.6.2 Sensores de calidad de agua

4.6.2.1 Sensor de oxígeno disuelto

Para la medición de oxígeno disuelto fue utilizado un electrodo galvánico con ánodo de zinc y cátodo de plata. Las especificaciones técnicas son las siguientes: rango de medición de 0.01 a +35.99 mg/L, precisión de ± 0.2 , mg/L y tiempo de respuesta de ~ 0.3 mg/L/segundo. Circuito embebido con protocolo de comunicación UART e I²C. El circuito embebido del electrodo tiene compensación para temperatura, salinidad y presión atmosférica; su voltaje de operación es de 3.3 V a 5.0 V y es compatible con cualquier microcontrolador que soporte comunicación UART. La calibración es mediante una solución de referencia de 0 mg/L proporcionada por el fabricante (www.atlas-scientific).

4.6.2.2 Sensor de temperatura

Las características y especificaciones del sensor digital de temperatura consisten en: un rango de operación de -20°C to 133°C con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, índice de protección por arriba del estándar IP 68 y voltaje de operación de 3.3 V a 5.0 V de corriente directa. La comunicación con el microcontrolador es mediante el protocolo UART configurado a una velocidad de transmisión de 9600 baudios (www.atlas-scientific).

4.6.3 Desarrollo de software

El desarrollo del software se hizo en lenguaje C# y consta de tres bloques principales: Recepción de información, lógica difusa y almacenamiento de datos. En la recepción de la información el software solicita al microcontrolador los valores de los sensores y verifica que el dato no sea atípico para poder ser procesado como se muestra en la Figura 9. El sistema de lógica difusa se realizó basado en la metodología utilizada por Carbajal-Hernández et al. (2012). Las funciones de pertinencia utilizadas se muestran en la Figura 10. En la Tabla 2 se muestran los valores lingüísticos para obtener las reglas base de conocimiento. Un total de 125 reglas fueron programadas. Una vez que los datos recibidos del microcontrolador pasan por

los dos primeros bloques, la información es graficada y almacenada para ser consultada de ser necesario. El software toma lectura cada minuto y guarda el promedio cada 10 minutos.

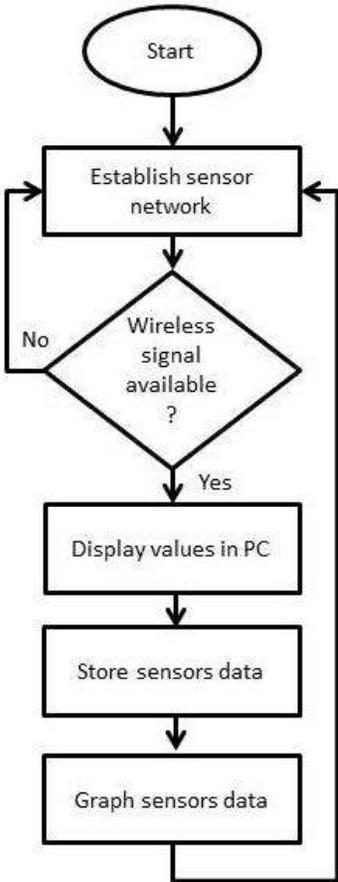


Figura 9. Diagrama de flujo del software para la comunicación con los sensores.

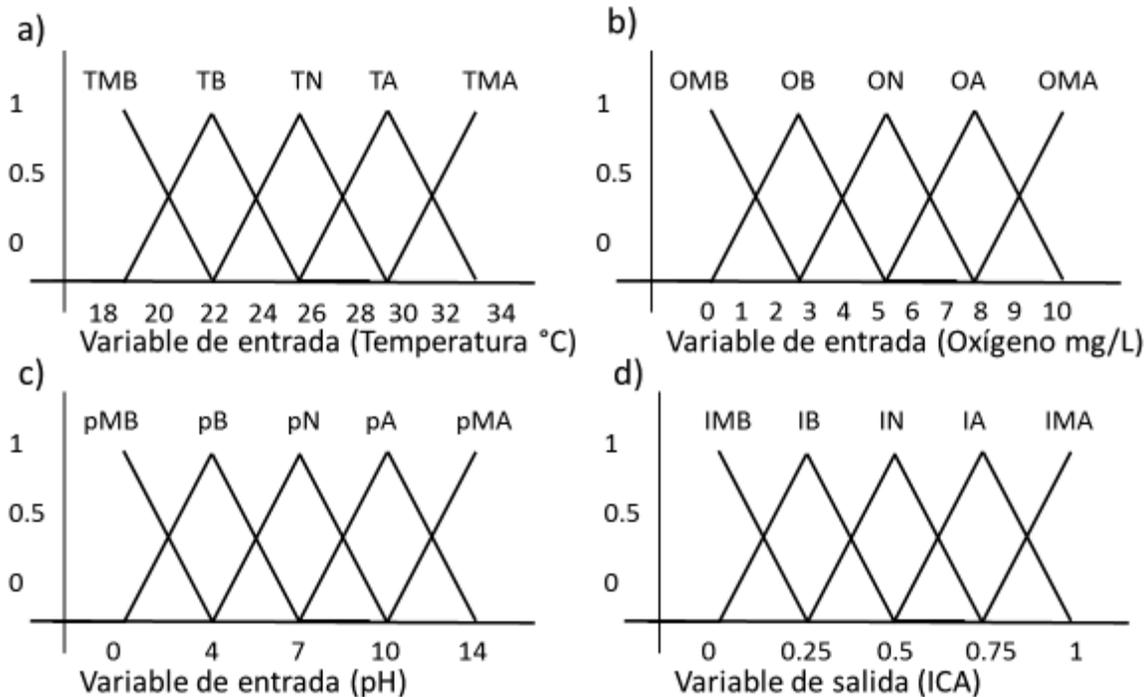


Figura 10. Funciones de pertinencia del índice de calidad de agua: (a) oxígeno disuelto, (b) temperatura, (c) pH y (d) índice de calidad de agua ICA. MB: muy bajo, B: bajo, N: normal, A: alto y MA: muy alto. (TMB: temperatura muy baja).

Tabla 2. Ejemplo de valores lingüísticos para obtener las reglas base para oxígeno disuelto, temperatura, pH y Calidad de agua (WQI); TL: temperatura baja, TMB: temperatura muy baja. O: oxígeno disuelto, T: temperatura, p: pH; N: normal, B: bajo, MB: muy bajo, A: alto, MA: muy alto. Ejemplo; TMB: temperatura muy baja.

Oxígeno disuelto	Temperatura	pH	ICA
ON	TN	pN	Excelente
OB	TN	pN	Bueno
ON	TMB	pMB	Regular
OMB	TMB	pMA	Pobre

4.7 Diseño, implementación y evaluación del sistema de control difuso

4.7.1 Diseño del sistema de lógica difusa

La lógica difusa es un paradigma muy útil para lidiar con conceptos difusos expresados por palabras difusas (es decir, bajo, medio, alto, poco, mucho, etc.) en términos computacionales y algorítmicos y como Loft A. Zadeh declaró: Lógica difusa significa “computar con palabras”

(Zadeh and Fellow, 1996). Pasando de estos conceptos generales, en ingeniería y en particular en el campo de sistemas de control, los investigadores desarrollaron el paradigma de modelado lógico fuzzy para abordar problemas de control en sistemas complejos con el objetivo de modelar la incertidumbre subyacente (Lee, 1990). Como línea de base para el esquema de control propuesto en nuestro trabajo se desarrolló el sistema difuso de tipo Mamdani que explota el razonamiento aproximado para controlar un sistema del mundo real, integrando el conocimiento proveniente de humanos expertos (Mamdani and Assilian, 1999). La estructura del modelo difuso utilizado para el alimentador automático se muestra en la Figura 11. La temperatura y el oxígeno disuelto son las entradas medidas en el cultivo de camarón que entran al bloque de fusificación. La tasa de alimentación es la salida que se obtiene del bloque de defusificación una vez que la entrada paso también por el bloque de inferencia y le fue asignada una regla de la base de conocimiento.

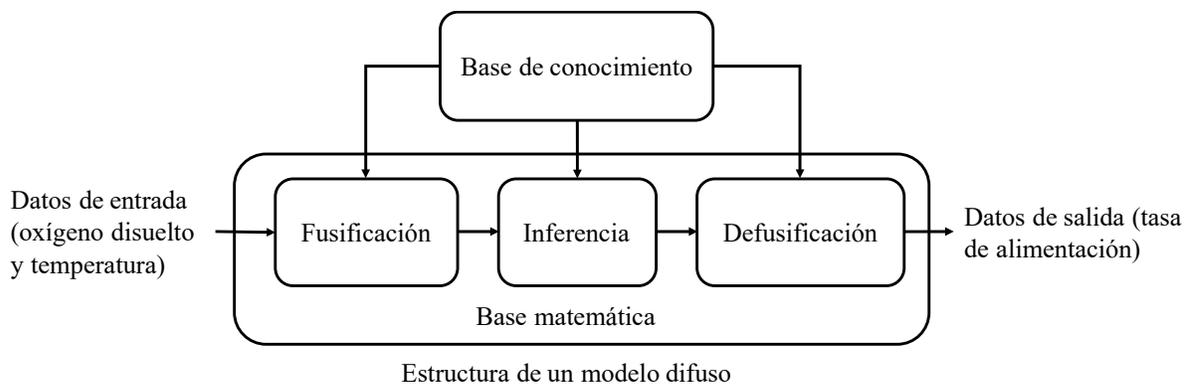


Figura 11. Estructura del modelo difuso utilizado para el desarrollo del sistema de alimentación.

4.7.1.1 Entradas del Sistema

El umbral de temperatura para este caso en particular se consideró en un rango de 18 a 34 °C; este umbral es el encontrando normalmente en las granjas comerciales de camarón. Para el oxígeno disuelto, el umbral considerado fue de 0 a 20 mg/L, que son los valores extremos que pueden ser encontrados en las granjas (Páez-Osuna y Valencia Castañeda, 2013; Martínez – Córdoba, 1999).

4.7.1.2 Fusificación

La fusificación se construye con diferentes formas de funciones de pertenencia o también llamadas funciones de membresía, ya sea lineal (trapezoidal o triangular) o no lineal. Las formas trapezoidales y triangulares son las funciones de membresía más utilizadas (Kusko, 1993). El desarrollo de los modelos difusos en el presente estudio procedió a través de varios pasos, incluyendo la fusificación del rango de entrada de parámetros fisicoquímicos y el rango de salida de modelos, así como la aplicación del método de "min" y "max" para "AND" y "OR". Para el alimentador automático, los valores de entrada fueron convertidos a funciones de pertinencia (μ ; valores entre 0 and 1) mediante la forma triangular como se muestra en la figura 12 y 13. Los operadores lógicos disponibles son unión (OR); interacción (AND); y negación (NOT) (Rajak *et al.*, 2016; Vadiati *et al.*, 2016). Para este caso en particular se aplicó la función AND como se muestra en la ecuación 1.

Ecuación 1. Intersección (AND) para fusificación

$$\text{Intersección (AND) } \mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$$

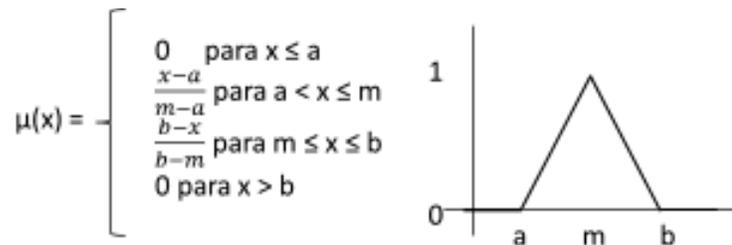


Figura 12. Función de transferencia para el Sistema difusa triangular, donde x es la variable de entrada; a , b y m , son las funciones de pertinencia.

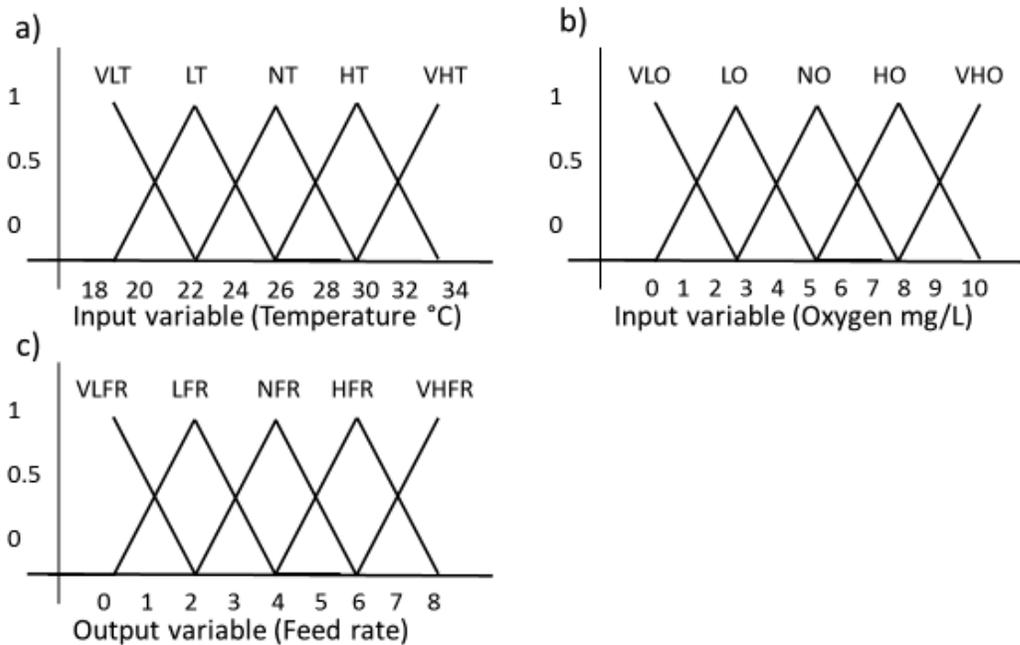


Figura 13. a) Entrada difusa de la variable de temperatura (°C) y b) para oxígeno disuelto (mg/L); c) salida del sistema difuso como tasa de alimentación en porcentaje de biomasa (%).

4.7.1.3 Reglas difusas

Base de reglas difusa. Una base de reglas difusa está compuesta por reglas matemáticas, difusas, como reglas proporcionadas por expertos y extraídas de los conjuntos de datos. Las reglas difusas en el sistema de inferencia traducen juicios de expertos, expresados en términos lingüísticos. Las formas de una norma matemática estándar se indican como "Si x_1 es A, y x_2 es B, entonces Y es B", donde A y B son términos lingüísticos definidos en los conjuntos universales de x_1 , x_2 e Y. La porción "if" se llama el antecedente, mientras que la parte "then" se llama el consecuente (Ross, 2012; Wang *et al.*, 2009). En este estudio se presentaron 25 reglas como se muestra en la tabla 3, donde **T es temperatura; O es oxígeno disuelto y FR es la tasa de alimentación.** Un ejemplo de una regla difusa es la siguiente:

If temperature is low (LT) and oxygen is low (LO), then low feeding rate (LFR)

Tabla 3. Reglas difusas utilizadas: Muy bajo oxígeno (VLO), bajo oxígeno (LO), oxígeno normal (NO), alto oxígeno (HO), muy alto oxígeno (VHO), muy baja temperatura (VLT), baja temperatura (LT), temperatura normal (NT), alta temperatura (HT), muy alta temperatura (VHT), muy baja tasa de alimentación (VLFR), baja tasa de alimentación (LFR), normal tasa de alimentación (NFR), alta tasa de alimentación (HFR) y muy alta tasa de alimentación (VHFR).

Temp/OD	VLO	LO	NO	HO	VHO
VLT	VLFR	VLFR	VLFR	VLFR	VLFR
LT	VLFR	LFR	NFR	NFR	NFR
NT	VLFR	HFR	HFR	HFR	HFR
HT	VLFR	HFR	HFR	HFR	HFR
VHT	VLFR	HFR	VHFR	VHFR	VHFR

4.7.1.4 Proceso de inferencia

La inferencia relaciona las entradas del sistema con la salida para representar las reglas que definirán el sistema. Estas reglas de inferencias nos ayudan a tomar decisiones (Vadiati *et al.*, 2016). El proceso de inferencia involucra tres patrones importantes, las funciones de membresía, operaciones lógicas y las reglas If-Then. Para este estudio se utilizaron las variables de entrada de calidad de agua para producir una variable de salida (dosis de alimento) (Tamilselvan and Aarthy, 2017).

4.7.1.4 Defusificación

El bloque de defusificación es utilizado para convertir un conjunto o valor difuso (números computacionales) en un número real mediante un proceso matemático. Para la defusificación se utilizó el método centro de gravedad (center of gravity) como se muestra en la ecuación 2 según la metodología presentada por Passino and Yurkovich (1998) y Soto-Zarazúa *et al.* (2010).

Ecuación 2. Centro de gravedad para defusificación.

$$\mu^* = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)dx}$$

4.7.1.4 Salidas del sistema

La variable de salida del sistema es la cantidad de alimento (tasa de alimentación) que se suministró al cultivo en términos de porcentaje de biomasa.

4.7.2 Evaluación de las estrategias dinámicas de alimentación

Camarones juveniles fueron colocados en tinas de 100 litros a una densidad de 15 camarones/tina (0.15 camarones/L) con recambio de agua del 8 – 10% por día.

Los camarones fueron alimentados con una dieta comercial con 35% de proteína, tres veces al día (0800h, 1300h y 1800h). Se emplearon charolas de alimentación, retirándose dos horas después el alimento no consumido, para ser cuantificado conforme a la metodología de Sick (1986). Se llevó un seguimiento de la temperatura y el oxígeno disuelto dos veces al día (1000h y 1700h) mediante un equipo portátil YSI 55. Para la evaluación de las estrategias dinámicas de alimentación, se utilizaron tres tratamientos con tres replicas cada uno, bajo las condiciones mencionadas anteriormente. El tratamiento de lógica difusa (FL), el tratamiento de funciones matemáticas (MF) y un tratamiento de control (TC).

Funciones matemáticas:

Las funciones matemáticas fueron determinadas de acuerdo al paquete computacional matemático MATLAB utilizando el toolbox de ajuste de curvas (The MathWorks, 2012). Las curvas que mejor se ajustaron al comportamiento observado en las pruebas de temperatura y oxígeno disuelto, fueron seleccionadas. El criterio de selección fue basado en: el coeficiente de determinación (r^2), la suma de cuadrados del error (SSE), y el error cuadrático medio (RMSE) (Li *et al.*, 2016) .

Tratamiento control:

El tratamiento control estuvo basado en una tabla de alimentación (Martínez-Córdova *et al.* 2013), la cual sugiere que camarones de 0.5 a 3g, deben alimentarse a una tasa del 6%; de 3 a 5 g, a 5%; de 5 a 10 g, a 4% y camarones por arriba de 10 g a 3%.

4.8. Análisis Estadístico

Lo datos se analizaron mediante una prueba ANOVA a una significancia de $\beta = 0.95$. Para el análisis *a posteriori* se utilizó el método de TUKEY de 1949. El paquete estadístico computacional utilizado fue Sigmaplot versión 11.0 para Windows.

V. RESULTADOS

5.1 Determinación de la tasa óptima de alimentación

Los resultados de la evaluación a través de un bioensayo bajo diferentes tasas de alimentación controladas por el equipo automatizado basado en el porcentaje de biomasa y calidad de agua para encontrar las tasas óptimas de producción se muestran en la Figura 14, donde se puede observar que el crecimiento aumenta proporcionalmente con la tasa de alimentación, hasta un valor del 10%, de ahí en adelante se estabiliza. En la Tabla 4 se muestra que conforme se aumenta la tasa de alimentación, también aumenta el FCA sin tener un incremento significativo en peso final del organismo, por lo que esto repercute en la calidad de agua.

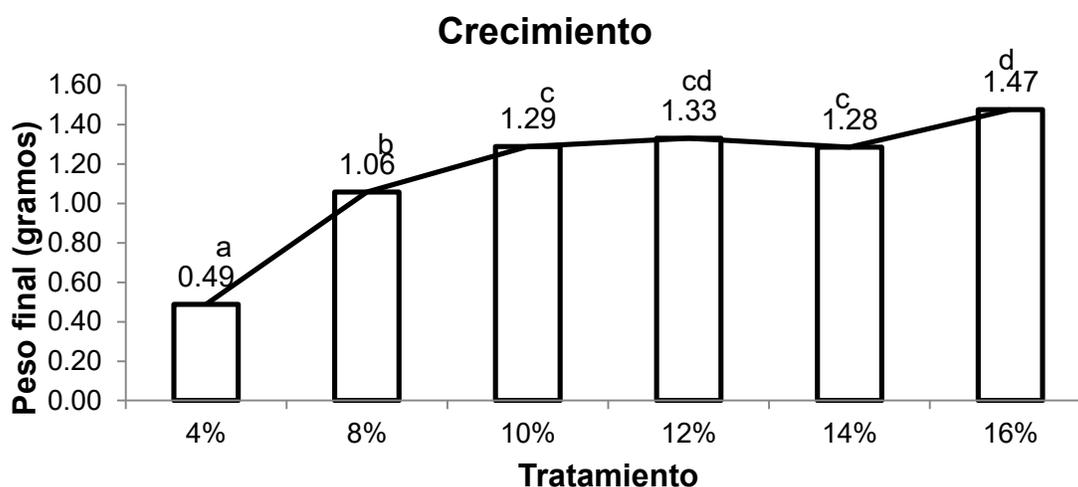
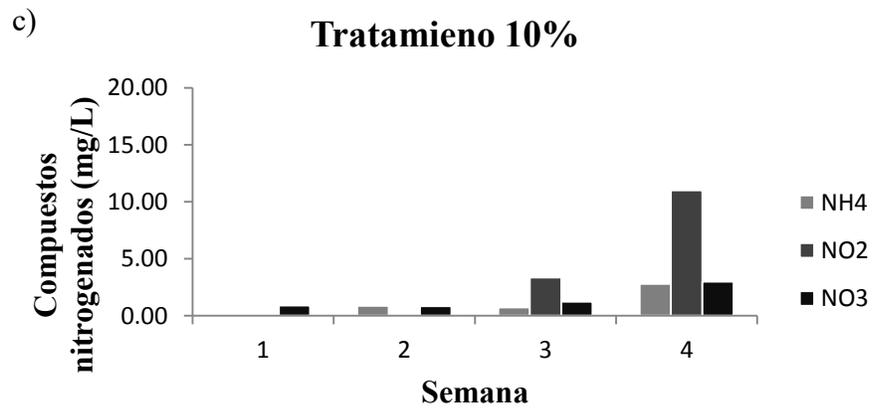
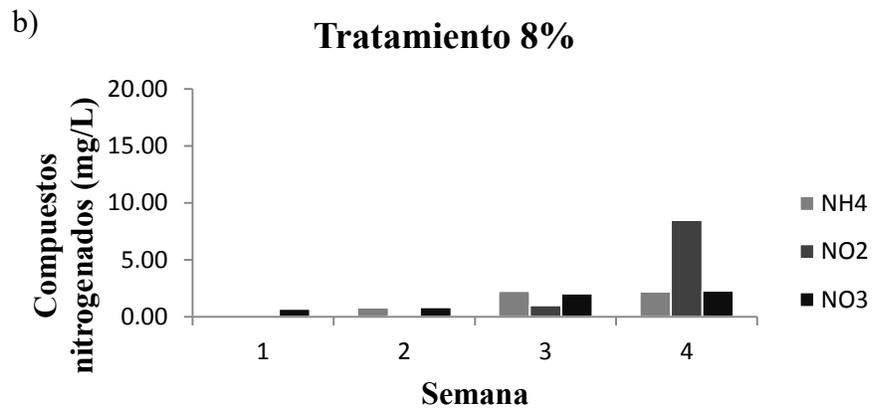
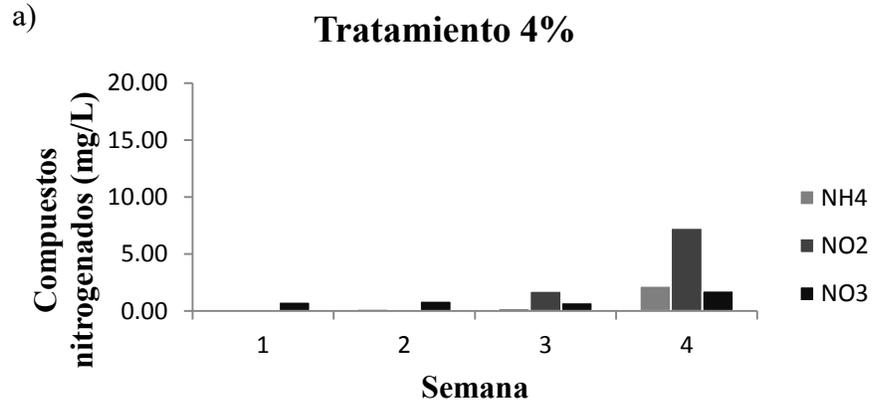


Figura 14. Efecto de la tasa de alimentación en el peso final del camarón.

Tabla 4. Tasas de alimentación y su efecto en los parámetros productivos.

Parámetro	Tratamientos					
	4%	8%	10%	12%	14%	16%
Tasa de alimentación						
Peso inicial (g)	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.18
Peso Final (g)	0.49	1.01	1.25	1.33	1.26	1.47
Biomasa total (g)	30.0	82.0	107.0	116.0	109.0	129.0
Entrada de alimento (kg)	37.4	127.4	190.1	233.0	304.4	361.5
FCA	1.25	1.55	1.78	2.01	2.79	2.80
Supervivencia calculada (%)	95	95	95	95	95	95

En la Figura 15 a), b), c), d), e) y f) se observan como incide una alta tasa de alimentación en la calidad de agua, sobre todo hacia el final de la corrida experimental (semana 4), por lo que se deduce que una excesiva alimentación afecta directamente la calidad de agua. Wickins, 1976 menciona que niveles superiores a 12 mg/L de nitritos (NO_2), afecta hasta en un 50% la supervivencia en un cultivo de camarón, por lo que es importante que la tasa de alimentación no supere los límites de NO_2 . Los tratamientos que presentaron un nivel de compuestos nitrogenados más alto fueron el de 16% (16 mg/L) y 14% (15.8 mg/L), los tratamientos de 10% y 12% obtuvieron niveles de 11 mg/L y 11.8 mg/L resultando los tratamientos de 4% y 8%, con los niveles más bajos (7.3 mg/L y 8.5 mg/L respectivamente).



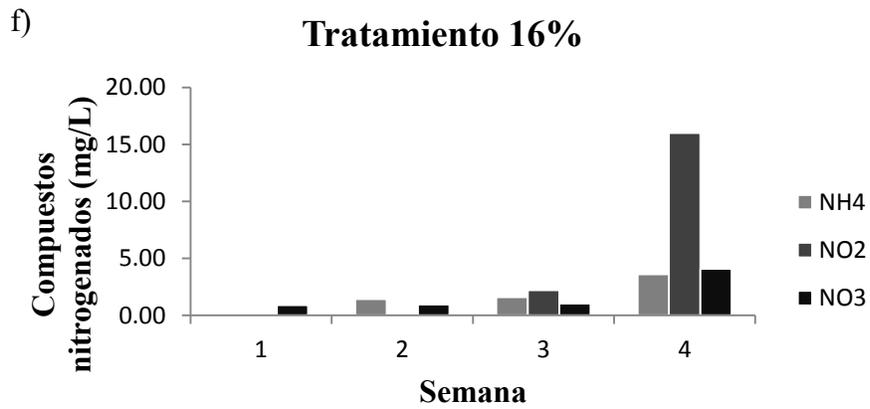
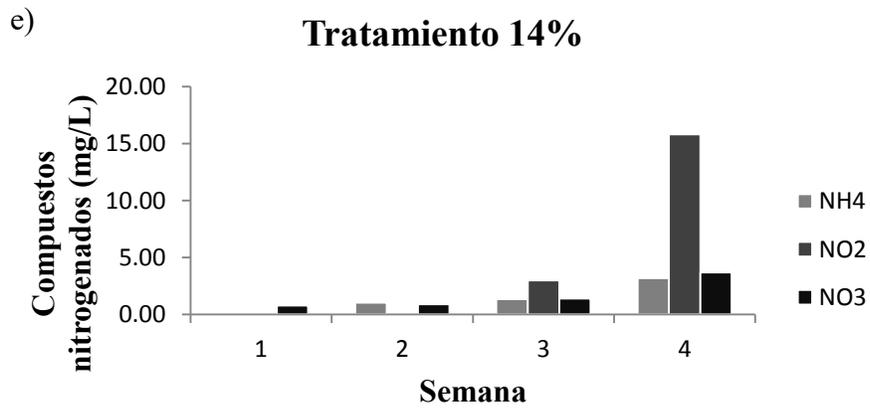
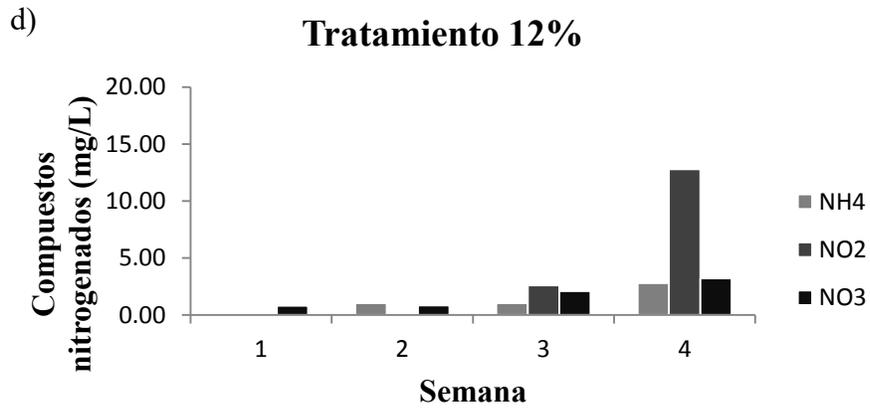


Figura 15. Relación de los compuestos nitrogenados con la tasa de alimentación.

5.2 Efecto del oxígeno disuelto y la temperatura en el consumo aparente

La Tabla 5 presenta el efecto de la temperatura en el consumo del alimento. Se observó que conforme aumentó la temperatura, aumentó también el consumo de alimento; a 22 °C el consumo fue del 44.19%, teniendo una diferencia del 29.81% con respecto al observado a 30 °C, siendo esta temperatura considerada dentro del umbral óptimo para un cultivo de camarón (28°C – 30°C); debido a esto, se tomó dicho nivel como referencia. Con el nivel más alto (34°C) se obtuvo un consumo del 92.18% que corresponde un incremento del 18.18%, a 26 °C la disminución en el consumo fue de 11.56%, representando el 62.44% de alimento consumido. La Tabla 6 presenta el efecto del oxígeno disuelto en el consumo del alimento; en el umbral óptimo, el alimento consumido fue el 60.11% del total suministrado, al bajar 2 unidades el oxígeno, el consumo se ve afectado en un 13.28%, y en un 24.81% al reducirse el nivel de oxígeno a 1 mg/L. En valores por arriba de la concentración óptima, el consumo del alimento se estabiliza.

Tabla 5 Efecto de la temperatura sobre el consumo de alimento.

Temperatura (°C)	% de alimento Consumido	Diferencia (%)
22	44.19	-29.81
26	62.44	-11.56
30	74.00	---
34	92.18	+18.18

Tabla 6 Efecto del oxígeno disuelto sobre el consumo de alimento.

Oxígeno disuelto (mg/L)	% de alimento Consumido	Diferencia (%)
0	0	---
1 - 2	33.96	-26.15
3 - 4	46.29	-13.28
5 - 6	60.11	---

En la Figura 16 A, se muestra el consumo de alimento en función de la temperatura. Se observa una tendencia lineal positiva conforme aumenta la temperatura, por lo que un polinomio de primer orden puede describir matemáticamente el comportamiento del consumo de alimento en función de la temperatura. En la Figura 16 B) se presenta el consumo del alimento en función del oxígeno disuelto, el cual presenta un comportamiento sigmoide, se observa que al llegar a niveles $\geq 5\text{mg/L}$, el consumo de alimento se estabiliza. La ecuación 3 (temperatura) y 4 (Oxígeno disuelto) son las funciones matemáticas que describen el efecto de la temperatura y oxígeno disuelto en el consumo del alimento; el % alimento suministrado está en función de la biomasa; OD es el valor de oxígeno disuelto y T el de la temperatura. En la Tabla 7 se muestran las características estadísticas de ambas ecuaciones; para ambas funciones matemáticas se tuvo una $r^2 > 0.99$ y un $SSE < 0.2$ lo que permite un ajuste adecuado para calcular los efectos en tiempo real durante un cultivo de camarón. Mediante el análisis de sensibilidad realizado para las funciones matemáticas y lógica difusa, se demuestran que un bajo nivel de oxígeno disuelto es el factor que más influye en la tasa de alimentación con un 74%, seguido por la temperatura con un 26%.

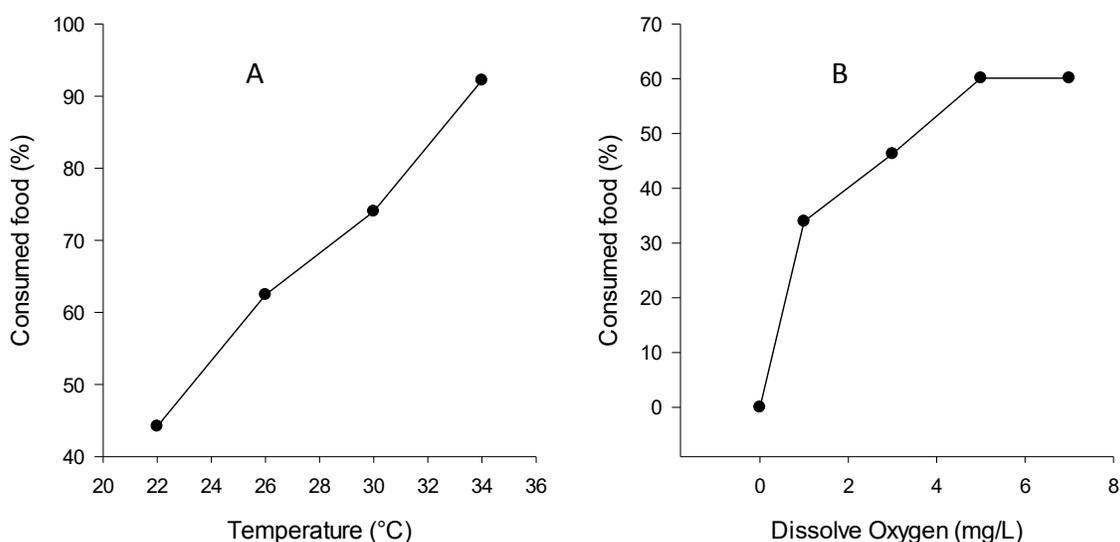


Figura 16 A) Efecto del consumo de alimento en función de la temperatura, **B)** Efecto del consumo de alimento en función del oxígeno disuelto

Ecuación 3. Tasa de alimentación (%) en función del oxígeno disuelto.

$$\% \text{ alimento} = \frac{(5.264 * OD + 0.001642)}{(OD + 0.4333)}$$

Ecuación 4. Tasa de alimentación (%) en función de la temperatura.

$$\% \text{ alimento} = 0.1944 * T - 0.7346$$

Tabla 7. Datos estadísticos de las funciones matemáticas.

	Ecuación 3	Ecuación 4
r ²	0.994	0.9927
SSE	0.104	0.0221
RMSE	0.228	0.1053

5.3 Sistema de monitoreo de calidad de agua

En la Figura 17 se muestra el comportamiento grafico del promedio diario del índice de calidad de agua de un total de 24 datos almacenados por día de cada variable, se puede observar que en el intervalo de 31 °C a 34 °C el ICA se encuentra en un valor de 0.62 lo que determina una buena calidad de agua al tener una sola lectura fuera del umbral deseado. Cuando los niveles de oxígeno bajaron, el ICA también se ve afectado llegando a valores de hasta 0.37 lo que indica que la calidad de agua es pobre al tener dos variables fuera de los niveles deseados. Se logra observar que en el rango de 30 a 25 °C sube el valor ICA a un nivel máximo de 0.876 indicando una excelente calidad de agua al constatar que los rangos de las variables monitoreadas son los deseados. Este comportamiento coincide con el reportado por Hernández *et al.* (2011). Al llegar la temperatura a niveles de 24-21 °C el índice baja su valor a 0.625, lo que indica una calidad de agua buena, más sin embargo cuando se tomaban valores bajos de oxígeno, el índice bajó a niveles de 0.375, que corresponden a una regular calidad de agua. Uno de los aspectos más relevantes a resaltar en este trabajo es la implementación física de estos sistemas logrando el monitoreo en tiempo real en un cultivo, ya que anteriormente solo se contaban con datos reales de granjas pero procesados por computadora a través de un

usuario. En la Tabla 8 se muestra la relación que existe en el índice de calidad de agua a diferentes temperaturas y niveles de oxígeno disuelto y pH estables para un cultivo de camarón, se puede observar que a temperatura alta (33.02 ± 0.55 °C) el índice de calidad de agua es de 0.62, considerado este como bueno, seguido por una temperatura óptima para un cultivo de camarón (29.20 ± 0.56 °C), en donde se obtiene el índice más alto de 0.83 lo que indica una excelente calidad de agua, mientras que a temperatura baja (23.37 ± 1.33 °C) el índice fue de 0.74, lo que indica una buena calidad. En la Tabla 9 se muestra la relación que existe en el índice de calidad de agua a diferentes temperaturas, nivel de oxígeno disuelto bajo (2.19 ± 0.53 mg/L) y pH estable (8.22 ± 0.12), los resultados indican que a temperatura alta y nivel bajo de oxígeno el índice de calidad de agua se encuentra en un valor de 0.40, indicando como un índice regular al tener dos variables fuera de los umbrales óptimos para el cultivo de camarón, para una temperatura optima el índice de colocó en 0.62 y para temperatura baja se obtuvo un valor de 0.50 siendo una calidad de agua regular.

Tabla 8. Efecto de la temperatura y óptimo nivel de oxígeno disuelto sobre el índice de calidad de agua.

Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Índice de calidad de agua
33.02 ± 0.55	7.27 ± 0.87	8.31 ± 0.23	0.62 ± 0.00
29.20 ± 0.56	8.31 ± 0.92	8.06 ± 0.19	0.83 ± 0.06
23.37 ± 1.33	9.88 ± 0.19	8.17 ± 0.06	0.74 ± 0.10

Tabla 9. Efecto de la temperatura y bajo nivel de oxígeno disuelto sobre el índice de calidad de agua.

Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Índice de calidad de agua
33.33 ± 0.52	2.19 ± 0.52	8.33 ± 0.17	0.40 ± 0.05
28.83 ± 0.43	2.24 ± 0.92	8.13 ± 0.16	0.62 ± 0.02
22.63 ± 1.23	2.14 ± 0.16	8.21 ± 0.04	0.50 ± 0.13

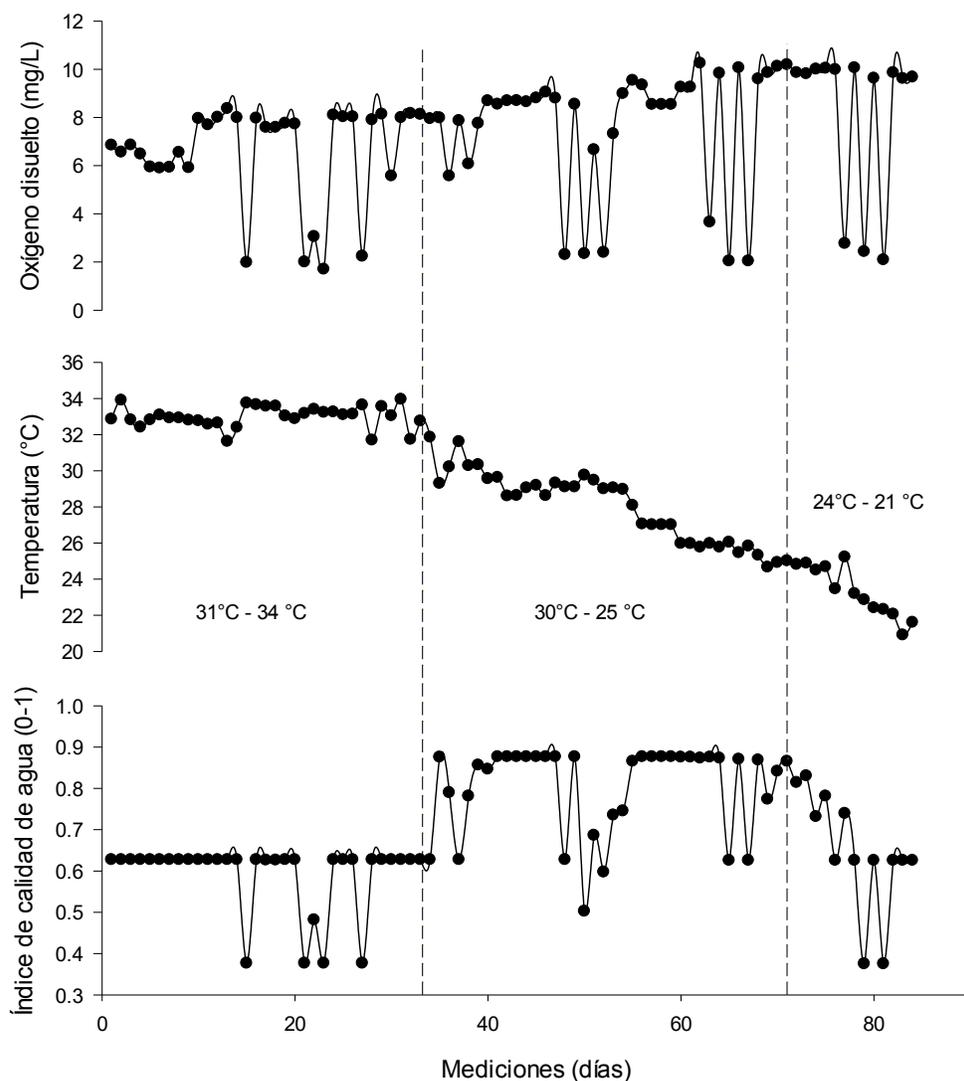


Figura 17. Comportamiento del índice de calidad de agua.

5.4 Evaluación del sistema de lógica difusa (estrategias dinámicas)

Una simulación del controlador de lógica difusa se muestra en la Figura 18, donde se evidencia al sistema la relación que existe en conjunto con las dos variables y su efecto en la tasa de alimentación. Durante el cultivo se registraron temperaturas altas de 33.20 ± 0.51 °C, temperaturas medias de 29.01 ± 0.41 y bajas en intervalos de 22.91 ± 1.33 °C, se lograron registrar niveles de oxígeno altos en intervalos de 8.31 ± 3.19 mg/L y bajos en 5.82 ± 2.83 . La tasa de alimentación estática es presentada en la Figura 19, el porcentaje de alimentación es de

5.0 al inicio del cultivo, al llegar los animales a una talla mayor a 5.0g la tasa de alimentación se reduce a 4.0%, en este caso en particular al no considerar los efectos de la temperatura y oxígeno disuelto, no tiene variaciones durante el cultivo. El comportamiento en el tratamiento FM es presentado en la Figura 20, es posible observar los ajustes en las dosis de alimento durante el cultivo, en donde se ve que en temperaturas altas, la tasa promedio de alimentación fue de $5.23 \pm 0.16\%$, 4.89 ± 0.11 a temperaturas medias y 3.44 ± 0.13 a temperaturas bajas. En LD (Figura 21), las tasas promedio de alimentación para altas temperatura fueron de 5.13 ± 1.41 , 4.64 ± 0.95 para temperaturas medias y 2.19 ± 0.85 para temperaturas bajas. Los tratamientos FM y LD siguen un comportamiento muy similar a la tendencia en los cambios de temperatura, para ambos casos, al bajar la temperatura redujeron sus tasas de alimentación. Es evidente que el tratamiento LD exhibe una mayor sensibilidad a los cambios de oxígeno, reflejándose en los valores de la desviación estándar. El tratamiento FM no presenta ajustes considerables al ser sometido a cambios abruptos de las variables fisicoquímicas del agua en comparación con LD. Al ser sometidos a condiciones bajas de oxígeno, LD mostró los mejores ajustes lográndose adaptar favorablemente a las condiciones en tiempo real en las que se encuentra un cultivo.

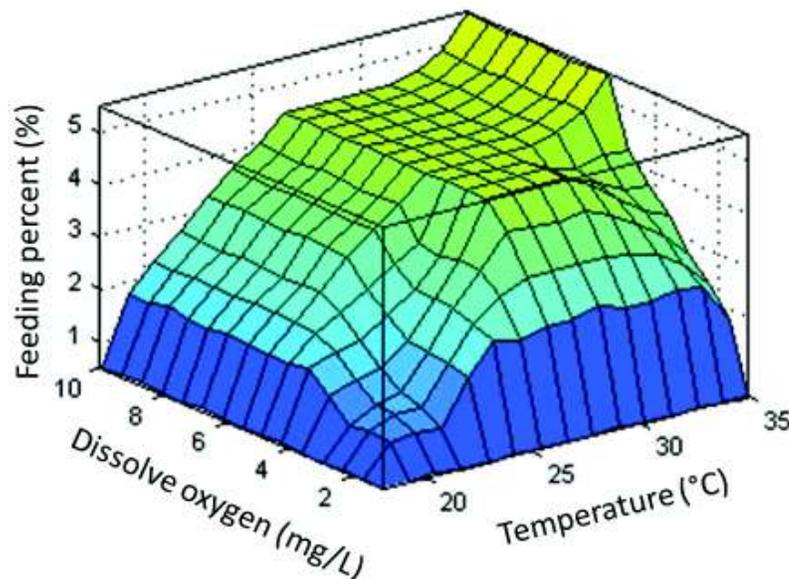


Figura 18. Resultado de la simulación del controlador difuso.

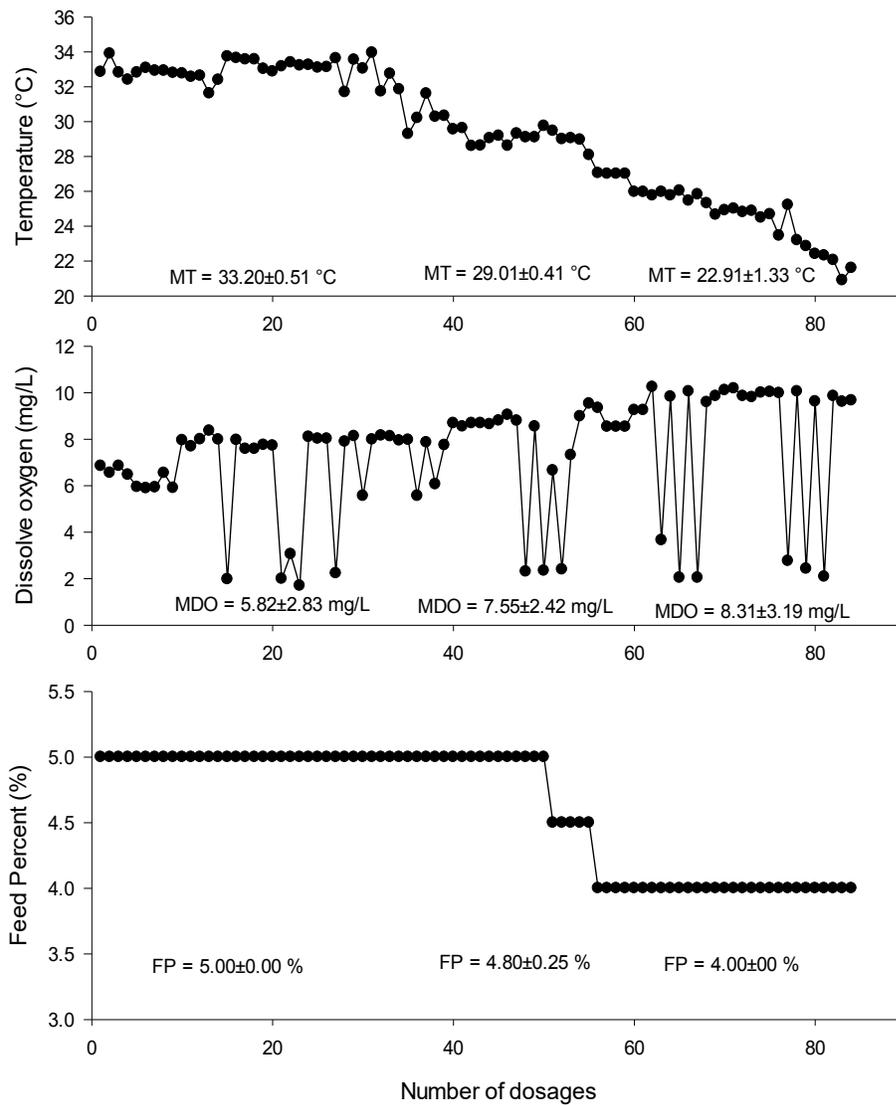


Figura 19 Comportamiento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de alimentación estática (% biomasa). MT: Temperatura media, MDO: Oxígeno disuelto medio and FP: Porcentaje de alimentación.

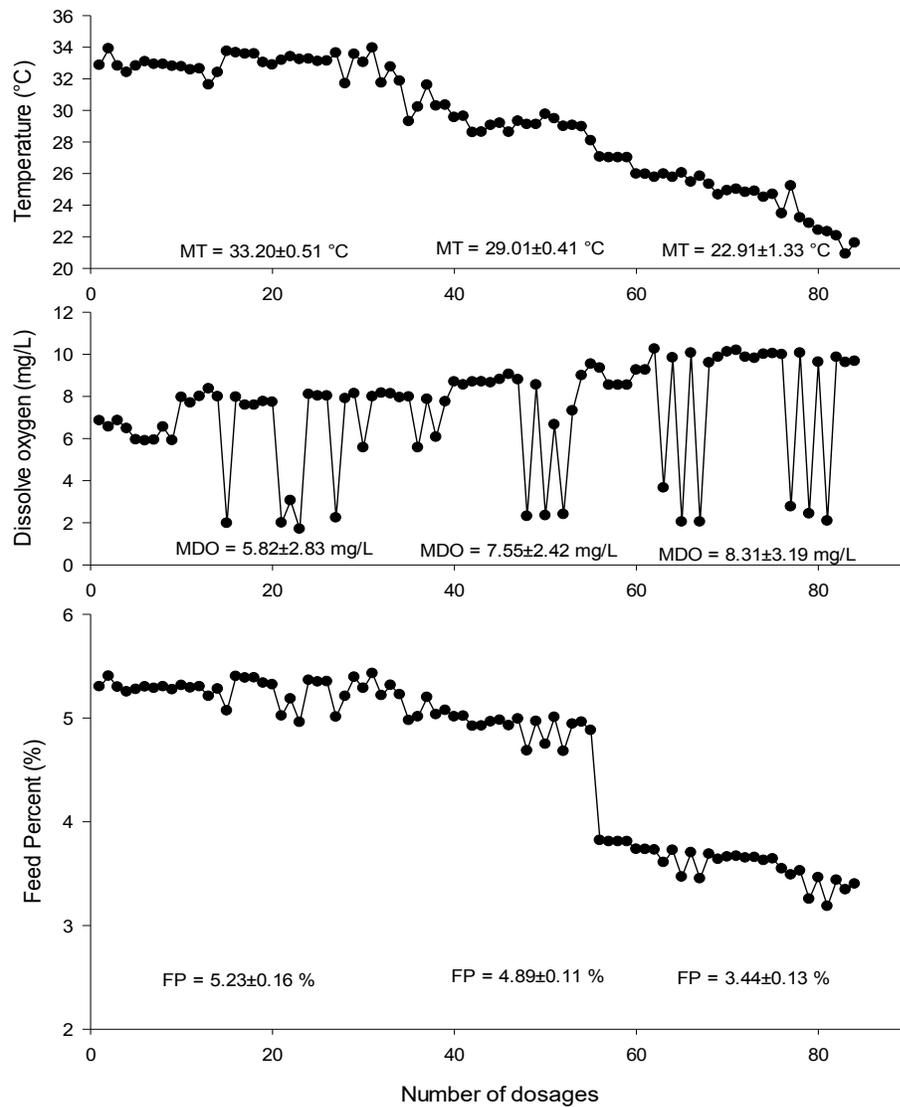


Figura 20 Comportamiento de la temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de alimentación estática (% biomasa). MT: Temperatura media, MDO: Oxígeno disuelto medio and FP: Porcentaje de alimentación.

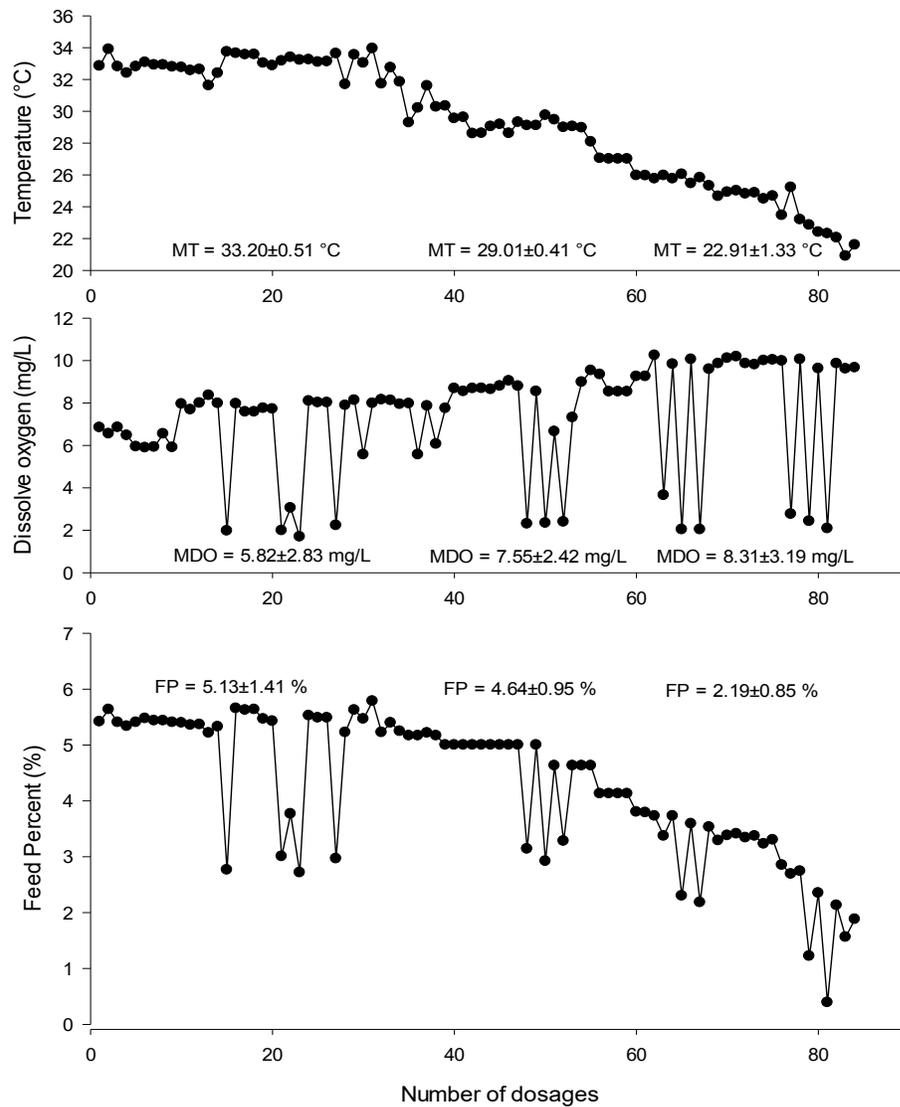


Figura 21 Comportamiento de la temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de alimentación dinámica con lógica difusa (% biomasa). MT: Temperatura media, MDO: Oxígeno disuelto medio and FP: Porcentaje de alimentación.

La Tabla 10 presenta los resultados de parámetros productivos y consumo de alimento durante todo el cultivo. Se registraron niveles de oxígeno disuelto bajos, LD presentó la menor tasa promedio de alimentación de 2.51% seguido por FM con 2.79% y por último TC con 4.61%. Con respecto al porcentaje promedio de alimento consumido se tuvieron resultados de 69.63% para LD, 57.27% para FM y 51.34% para TC. Estos resultados indican que LD es el tratamiento donde el alimento balanceado es suministrado de forma más eficiente. Bajo

condiciones normales de oxígeno disuelto (> 5 mg/L) la tasa de alimentación para LD fue de 4.28%, 4.59% para FM y 4.60% para TC, logrando mejores consumos de alimento en LD con 88.43%, seguido por FM con el 81.10% y 77.29% para TC. La mayor tasa de crecimiento semanal se obtuvo en LD (0.59g); 0.54 para FM y 0.52 para TC; sin embargo estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. La supervivencia final en TC fue de 93.33%, mientras que en FM y LD fue de 91.11%. El FCA en LD fue de 1.95, 2.56 en FM y 3.01 en TC, esto equivale a una diferencia de 35.21% entre LD y TC. Los resultados cumplen con el objetivo al reducir el FCA sin afectar las tasas de crecimiento.

Tabla 10. Resultados promedios de los parámetros productivos del cultivo. NOB: Niveles de oxígeno disuelto bajos, NON: niveles de oxígeno disuelto normales.

		Tratamiento		
		FL	MF	Control
NOB	Tasa de alimentación (%BW)	2.51 ^a	2.79 ^{ab}	4.61 ^b
	Alimento consumido (%)	69.63 ^a	57.27 ^a	51.34 ^a
NON	Tasa de alimentación (%BW)	4.28 ^a	4.59 ^a	4.60 ^a
	Alimento consumido (%)	88.43 ^a	81.10 ^a	77.29 ^a
	Tasa de crecimiento (g)	0.59 ^a	0.54 ^a	0.52 ^a
	Supervivencia (%)	91.11 ^a	91.11 ^a	93.33 ^a
	FCA	1.95 ^a	2.56 ^{ab}	3.01 ^b

VI. DISCUSIÓN

El éxito en un cultivo de camarón, en gran parte depende del reconocimiento de las variables fisicoquímicas y biológicas que salen de los límites tolerables por el organismo (Barraza-Guardado *et al.*, 2015; Carbajal-Hernández *et al.*, 2013) por lo que la implementación de sistemas de monitoreo de calidad de agua son de gran utilidad al aumentar el conocimiento en el estado del agua, diversos autores mencionan que el monitoreo de calidad de agua como índice, presenta una forma más precisa de evaluar las actividades acuícolas ayudando a detectar a tiempo condiciones no deseadas; esto permite tomar decisiones rápidas (Colmenarejo *et al.*, 2007; Hernández *et al.*, 2011; Lermontov *et al.*, 2009; Simo *et al.*, 2008). Los resultados del sistema de monitoreo del índice de calidad de agua inalámbrico propuesto en este trabajo coincide con diferentes autores cumpliendo con las características de confiabilidad requeridas para un cultivo de camarón, el sistema presento una precisión de $\pm 0.106^{\circ}\text{C}$, 0.42% para la temperatura, ± 0.177 mg/L, 4.28% y ± 0.242 , 2.42% en el pH; 0.038°C , 0.017mg/ L y 0.018 para el caso de sensibilidad (Ferreira *et al.*, 2011; Lin *et al.*, 2011; Simbeye *et al.*, 2014; Simbeye and Yang, 2014; Yalcuk and Postalcioglu, 2015).

Se han utilizado a nivel mundial, diversas estrategias para ajustar la tasa de alimentación ya sea en granjas comerciales o a nivel experimental. Martínez-Córdova *et al.* (2013), mencionan algunas de estas estrategias de alimentación: basadas en talla, biomasa, productividad natural, condiciones ambientales, entre otras. Casillas-Hernández *et al.* (2006), sugieren que la alimentación mediante charolas es una mejor practica comparada con los tablas de alimentación tradicionales. Todas las anteriormente mencionadas, son prácticas de alimentación estática, pero la mayoría de los sistemas de cultivo en la actualidad, son dinámicos. Se ha demostrado que los cambios en las variables ambientales o la calidad de agua afectan directamente la ingesta y la asimilación del alimento suministrado. La temperatura y el oxígeno disuelto son las principales variables que afectan la alimentación del camarón (Ponce-Palafox *et al.*, 1997; Wyban *et al.*, 1995), por lo que se sugiere que el diseño y el uso de las estrategias de alimentación dinámicas estén basados en el ajuste de la tasa de alimentación de acuerdo a los cambios de esas variables en tiempo real, lo cual puede resultar favorable en la respuesta productiva de los organismos cultivados. Smith and Tabrett, 2013

lograron alimentar un cultivo de camarón mediante ondas acústicas basado en los sonidos emitidos por el camarón, sin embargo, presenta algunas desventajas; su alto costo de implementación (Ullman, 2017) y problemas en el suministro de alimento cuando los animales midan. Un alimentador automático con lógica difusa (alimentación dinámica) propuesto por Soto-Zarazúa *et al.*, 2010 reporta mediante la simulación del controlador difusa un comportamiento similar al propuesto en este trabajo, un decremento en los niveles de oxígeno disuelto ($<1.5\text{mg/L}$) reduce la tasa de alimentación hasta en un 70% - 75%; la tasa de alimentación baja o sube conforme el comportamiento de la temperatura, en ningún caso fue superior del 30%. Soto-Zarazúa *et al.*, 2010 reportó un FCA promedio de 1.55 para el caso dinámico, mientras que de forma convencional reporto un promedio de 2.25, estos resultados coinciden con este estudio, el FCA fue más bajo utilizando sistemas de alimentación dinámica, siendo la lógica difusa la mejor estrategia con un valor de 1.92. La función matemática también fue un buen valor promediando un FCA de 2.56. Ambos valores están dentro del rango manejado como adecuado en las granjas comerciales de camarón. Los alimentadores automáticos basados en sonidos, funciones matemáticas o inteligencia artificial presentan en todos los casos un mejor suministro del alimento y FCA sin afectar las tasas de crecimiento y supervivencia (Alvera *et al.*, 2010; Smith and Tabrett, 2013; Soto-Zarazúa *et al.*, 2010).

El FCA obtenido en el control fue de 3.01 lo que corresponde un valor 35.21% más alto que el registrado en el tratamiento de lógica difusa. En el estado de Sonora, México, la producción de camarón en el 2015 fue aproximadamente de 60,000 TM con un FCA promedio de 1.8 (COAES, 2015); de acuerdo a estos datos, el alimento suministrado fue cerca de 180,600 TM a un precio de \$1250.00 MXN/TM, lo que corresponde un total de \$131,625,000.00 MXN. De ser aplicado la lógica difusa, ahorros de \$41'175,000.00 USD se hubiesen podido obtener. Por otro lado, una reducción del 35% de alimento formulado, podría contribuir a una notable disminución del impacto ambiental en las descargas de los cultivos de camarón. Tacon, (2002) y Martínez-Córdova *et al.* (2009), documentaron que la producción de una tonelada de camarón manejado a una FCA de 1.0, produce como desecho 500 kg de materia orgánica (MO), 26 kg de nitrógeno (N) y 13 kg de fósforo (P), los cuales son descargados a los efluentes. Sin embargo, si el FCA es 2.5 (como pasa en muchas granjas de México y en todo el mundo), esta producción de desechos sería de 1625 kg de MO, 117 de N

y 38 de P por cada tonelada de camarón producido. En este estudio, para el tratamiento control, la producción de MO fue de 2008 kg, 148 de N y 46 kg de P por cada tonelada de camarón. En el tratamiento LD, la materia orgánica producida fue de 1213 kg, 84 kg de N y 28 kg de P (Tabla 11). Extrapolando estos datos a la producción de 65,000 TM del estado de Sonora, México durante el 2015, utilizando la estrategia de alimentación de LD, se tendría una posible reducción de materia orgánica de 47,700 TM, 3866 TM de N y 1024 kg de F.

Tabla 11. Cantidad de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y fosforo (P) descargado por cada tonelada métrica de camarón producido.

Tratamiento	FCR	OM (kg)	N (kg)	P (kg)
Control	3.01	2008	148	46
Funciones matemáticas	2.56	1670	121	38
Lógica difusa	1.95	1213	84	28

VII. CONCLUSIONES

Para la determinación de la óptima tasa de alimentación se encontró que a mayor ingreso de alimento la tasa de crecimiento aumenta, sin embargo la calidad de agua se ve perjudicada alcanzando niveles tóxicos de compuestos nitrogenados, como lo es el nitrito (NO_2) obteniendo valores superiores a los 15 mg/L en cuatro semanas por lo que la determinación de esta, se sitúa entre el 4 y el 8% según los recambios de agua que se realicen a lo largo del cultivo.

La temperatura y el oxígeno disuelto afectan directamente el consumo aparente del alimento del camarón. El incremento de temperatura puede aumentar el consumo hasta en un 30%, sin embargo, no se registra ganancia de biomasa. Para el caso de oxígeno puede ocasionar un nulo consumo de alimento cuando este cae por debajo de los 0.5 mg/L, además de causar mortalidad.

El sistema propuesto fue capaz de monitorear el índice de calidad de agua en función de las principales variables fisicoquímicas del agua (oxígeno disuelto, temperatura y pH), lo cual es reflejado en una sola medición precisa como resultado final, por lo que los sistemas de lógica difusa son una herramienta efectiva para el desarrollo de sistemas de monitoreo de calidad de agua. La implementación de este sistema permitió su aplicación a un sistema de alimentación mediante inteligencia artificial (lógica difusa) como estrategia dinámica de alimentación.

El sistema de lógica difusa y las funciones matemáticas (estrategias dinámicas) presentadas en este estudio mostraron ser más adecuadas para ajustar la tasa de alimentación comparado con la forma estática (tradicional). La lógica difusa fue la mejor estrategia de alimentación logrando optimizar el suministro del alimento hasta en un 35% seguido por las funciones matemáticas. El principal beneficio fue el ahorro en el suministro de alimento sin afectar la respuesta productiva del camarón (supervivencia, crecimiento y FCA). Basado en el FCA, alimento consumido y tasa de crecimiento, el mejor tratamiento es el sistema de lógica difusa.

VIII. RECOMENDACIONES

Para determinar el efecto de las variaciones de temperatura y oxígeno disuelto en el consumo aparente del alimento, es necesario hacer una prueba preliminar para tener dominio de dichas variables, y de ser posible manejar intervalos más pequeños en los tratamientos.

Los datos del índice de calidad de agua fueron muy sensibles, esto debido a que se consideraron solamente dos variables fisicoquímicas (temperatura y oxígeno disuelto), por lo que el siguiente paso es agregar por lo menos dos variables más. Turbidez, salinidad y pH pueden ser variables adecuadas que ayuden a tener un dato más estable, confiable y preciso.

Es necesario hacer una calibración de los modelos de alimentación dinámica cada vez que se inicie otro ciclo de cultivo. Tres días de pruebas de consumo de alimento fueron suficientes para determinar de manera confiable la tasa de alimentación, sin embargo, en un período más extenso se podría mejorar la precisión de este valor.

Al evaluar el consumo aparente de alimento, es recomendable considerar de forma específica la consistencia del alimento que tiene que ver con su hidroestabilidad, por lo que un bioensayo previo para determinar este valor, dará como resultado un mejor análisis respecto al consumo real.

La ventaja de los algoritmos de lógica difusa, es que su capacidad de entrada no está limitada por lo que sería posible y adecuado incorporar sensores de compuestos nitrogenados, turbidez, clorofila, entre otros. Para utilizar este sistema propuesto en cultivos de agua a baja salinidad, se tendrían que repetir todas las pruebas, una vez hecho, los datos se pueden fusionar en un solo modelo de lógica difusa al considerar la salinidad como variable de entrada. Debido a la flexibilidad de los algoritmos de la lógica difusa, también es posible agregar para otras especies cultivadas como los peces, toda la información extra que se va generando, es posible su programación llegando cada vez a un software más robusto y también ir mejorando cada vez más la precisión del suministro del alimento.

IX. LITERATURA CITADA

- Alvera, M.O., Alfredsena, J.A., Øieb, G., Storøyb, W., Olsenc, Y., 2010. Automatic control of growth and density in rotifer cultures. *Aquac. Eng.* 43, 6–13.
doi:10.1016/j.aquaeng.2010.02.003
- Azam, M.D.Z., Zamin, N., Low Tang Jung, 2009. i-Feeder : An Automated Fish Feeding System for Aqua Farming 38, 1125–1130.
- Barraza-Guardado, R.H., Arreola-Lizárraga, J.A., Miranda-Baeza, A., Juárez-García, M., Juvera-Hoyos, A., Casillas-Hernández, R., 2015. Enhancing Ecoefficiency in Shrimp Farming through Interconnected Ponds. *Biomed Res. Int.* 2015.
doi:10.1155/2015/873748
- Carbajal-hernández, J.J., Sánchez-fernández, L.P., Carrasco-ochoa, J.A., 2012. Immediate water quality assessment in shrimp culture using fuzzy inference systems. *Expert Syst. Appl.* 39, 10571–10582. doi:10.1016/j.eswa.2012.02.141
- Carbajal-Hernández, J.J., Sánchez-Fernández, L.P., Villa-Vargas, L. a., Carrasco-Ochoa, J. a., Martínez-Trinidad, J.F., 2013. Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process. *Ecol. Indic.* 29, 148–158.
doi:10.1016/j.ecolind.2012.12.017
- Casillas-Hernández, R., Nolasco-Soria, H., García-Galano, T., Carrillo-Farnes, O., Páez-Osuna, F., 2007. Water quality, chemical fluxes and production in semi-intensive Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture ponds utilizing two different feeding strategies. *Aquac. Eng.* 36, 105–114. doi:10.1016/j.aquaeng.2006.09.001
- Colmenarejo, M.F., Vicente, J., Rubio, A., Garci, G., 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution 7, 315–328.
doi:10.1016/j.ecolind.2006.02.005
- Ferreira, N.C., Bonetti, C., Seiffert, W.Q., 2011. Hydrological and Water Quality Indices as management tools in marine shrimp culture. *Aquaculture* 318, 425–433.
doi:10.1016/j.aquaculture.2011.05.045
- Hernández, J.J.C., Fernández, L.P.S., Pogrebnyak, O., 2011. Assessment and prediction of water quality in shrimp culture using signal processing techniques. *Aquac. Int.* 19, 1083–1104. doi:10.1007/s10499-011-9426-z
- Kusko, B., 1993. *Fuzzy Thinking: the New Science of Fuzzy Logic*. Hyperion, New York.
- Lee, C., 1990. Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy. *IEEE Trans. FUZZY Syst.* 20, 404–418.
- Leo, J.P., Minello, T.J., Grant, W.E., Wang, H.-H., 2016. Simulating environmental effects on brown shrimp production in the northern Gulf of Mexico. *Ecol. Modell.* 330, 24–40.
doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.02.017
- Lermontov, M., Augusta, M., Machado, S., 2009. River quality analysis using fuzzy water quality index : Ribeira do Iguape river watershed , Brazil 9, 1188–1197.
doi:10.1016/j.ecolind.2009.02.006

- Li, H., Lan, R., Peng, N., Sun, J., Zhu, Y., 2016. High resolution melting curve analysis with MATLAB-based program. *Measurement* 90, 178–186. doi:10.1016/j.measurement.2016.04.057
- Lin, Q., Jian, Z., Xu, M., Zetian, F., Wei, C., Xiaoshuan, Z., 2011. Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture. *Math. Comput. Model.* 53, 2162–2172. doi:10.1016/j.mcm.2010.08.023
- Mamdani, E.H., Assilian, S., 1999. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzylogic controller.
- Martínez-Córdova et al. 2013. Selección de Alimentos y Estrategias de Alimentación acordes a las Condiciones de Cultivo del Camarón. En: Cruz-Suárez, L.E., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Nieto-López, M.G., Villarreal-Cavazos, D. A., Gamboa-Delgado, J., Alvarez-González, C. (Eds), *Contribuciones Recientes en Alimentación y Nutrición Acuicola*, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, pp. 84-104.
- Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Porchas, M., Cortés-Jacinto, E., 2009. CAMARONICULTURA MEXICANA Y MUNDIAL: ¿ACTIVIDAD SUSTENTABLE O INDUSTRIA CONTAMINANTE? *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25, 181–196.
- Martinez-Cordova, L.R., Porchas-Cornejo, M.A., Villarreal-Colmenares, H., Calderon-Perez, J.A., 1998. Evaluation of three feeding practices on the winter culture of yellowleg shrimp, *Penaeus californiensis* (Holmes), in low water exchange ponds. *Aquac. Res.* 29, 573–578. doi:10.1046/j.1365-2109.1998.00244.x
- Martínez-Córdova, L.R., 1999. Cultivo de Camarones Peneidos. Principios y Prácticas. A.G.T. Editor, México, D.F. 283.
- Mesas-Carrascosa, F.J., Verdú Santano, D., Meroño, J.E., Sánchez de la Orden, M., García-Ferrer, a., 2015. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. *Biosyst. Eng.* 137, 73–83. doi:10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005
- Nunes, A.J.P., Parsons, G.J., 2006. A computer-based statistical model of the food and feeding patterns of the Southern brown shrimp *Farfantepenaeus subtilis* under culture conditions. *Aquaculture* 252, 534–544. doi:10.1016/j.aquaculture.2005.07.020
- Páez - Osuna, F., Valencia-Castañeda, G., 2013. Calidad del agua en cultivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) con baja salinidad. *Camaronicultura en agua de baja salinidad*. Trillas Editor, México, D.F. 136.
- Passino, K.M., Yurkovich, S., 1998. *Fuzzy Control*. Addison-Wesley Longman, Inc.
- Ponce-Palafox, J., Martinez-Palacios, C.A., Ross, L.G., 1997. The effects of salinity and temperature on the growth and survival rates of juvenile white shrimp, *Penaeus vannamei*, Boone, 1931. *Aquaculture* 157, 107–115. doi:10.1016/S0044-8486(97)00148-8
- Rajak, S., Parthiban, P., Dhanalakshmi, R., 2016. Sustainable transportation systems performance evaluation using fuzzy logic. *Ecol. Indic.* 71, 503–513.

doi:10.1016/j.ecolind.2016.07.031

- Ross, T., 2012. FUZZY LOGIC WITH ENGINEERING. Wiley.
- Simbeye, D.S., Yang, S.F., 2014. Water Quality Monitoring and Control for Aquaculture Based on Wireless Sensor Networks. *J. NETWORKS* 9, 840–849. doi:10.4304/jnw.9.4.840-849
- Simbeye, D.S., Zhao, J., Yang, S., 2014. Design and deployment of wireless sensor networks for aquaculture monitoring and control based on virtual instruments. *Comput. Electron. Agric.* 102, 31–42. doi:10.1016/j.compag.2014.01.004
- Simo, S., Nobre, S.M., Josefa, M., Yabe, S., 2008. Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies 8, 476–484. doi:10.1016/j.ecolind.2007.05.002
- Smith, D., Burford, M.A., Tabrett, S.J., Irvin, S.J., Ward, L., 2002. The effect of feeding frequency on water quality and growth of the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). *Aquaculture* 207, 125–136. doi:10.1016/S0044-8486(01)00757-8
- Smith, D. V, Tabrett, S., 2013. Aquacultural Engineering The use of passive acoustics to measure feed consumption by *Penaeus monodon* (giant tiger prawn) in cultured systems. *Aquac. Eng.* 57, 38–47. doi:10.1016/j.aquaeng.2013.06.003
- Soto-Zarazúa, G.M., Rico-García, E., Ocampo, R., Guevara-González, R.G., Herrera-Ruiz, G., 2010. Fuzzy-logic-based feeder system for intensive tilapia production (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Int.* 18, 379–391. doi:10.1007/s10499-009-9251-9
- Tacon, A.G.J., Hasan, M.R., Metian, M., 2011. Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans : Trends and prospects, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper.
- Tamilselvan, G.M., Aarthy, P., 2017. Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system. *Rev. Mex. Trastor. Aliment.* doi:10.1016/j.jart.2017.05.004
- Ullman, C.E., 2017. An Evaluation of Feed Management, the Use of Automatic Feeders, and Feed Leaching in the Culture of Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*. Auburn University.
- Vadiati, M., Asghari-Moghaddam, A., Nakhaei, M., Adamowski, J., Akbarzadeh, A.H., 2016. A fuzzy-logic based decision-making approach for identification of groundwater quality based on groundwater quality indices. *J. Environ. Manage.* 0. doi:10.1016/j.jenvman.2016.09.082
- Wang, X., Ruan, D., Kerre, E.E., 2009. Mathematics of Fuzzinessdbasic Issues. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, vol. 245. Springer, Berlin/Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-78311-4>.
- Wickins, J.F., 1976 a. Prawn biology and culture. In: H. Barnes (Editor), *An Annual Review, Oceanogr. Mar. Biol.*, 14: 435-507.
- Wu, T.H., Huang, Y.I., Chen, J.M., 2015. Development of an adaptive neural-based fuzzy inference system for feeding decision-making assessment in silver perch (*Bidyanus bidyanus*) culture. *Aquac. Eng.* 66, 41–51. doi:10.1016/j.aquaeng.2015.02.001

- Wyban, J., Walsh, W. a, Godin, D.M., 1995. Temperature effects on growth, feeding rate and feed conversion of the Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). *Aquaculture* 138, 267–279. doi:10.1016/0044-8486(95)00032-1
- Yalcuk, A., Postalcioglu, S., 2015. Evaluation of pool water quality of trout farms by fuzzy logic : monitoring of pool water quality for trout farms. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 1, 1503–1514. doi:10.1007/s13762-014-0536-9
- Zadeh, L.A., 1975. Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese* 30, 407–428.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Inf. Control* 8, 338–353.
- Zadeh, L.A., Fellow, L., 1996. Fuzzy Logic = Computing with Words. *IEEE Trans. FUZZY Syst.* 4, 103–111.