

MODELO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL AGUA EN ESTANQUES ACUÍCOLAS UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA

Mendoza-López Ramón¹, Verduzco-Ramírez Jesús-Alberto¹, Barrios-Hernández Carlos-Jaime²,

García-Díaz Noel¹, Morán-López Luis-Eduardo³

¹TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO CAMPUS I.T. COLIMA

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Av. Tecnológico No. 1, Col. Liberación, Villa de Álvarez, Colima, C.P. 28976

Teléfonos: (312) 312 6393, (312) 312 9920

²UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER / ³UNIVERSIDAD DE COLIMA

G2246014, averduzco, ngarcia {@colima.tecnm.mx}, cbarrios@uis.edu.co, l Moran72@uocol.mx

RESUMEN

La calidad del agua es un factor vital en la acuicultura, interviene directamente en el desarrollo de las especies cultivadas. Los sistemas de monitoreo de los parámetros que determinan esta calidad se limitan en recuperar sus valores y publicarlos. La carencia de usabilidad de estos sistemas perturba la interpretación al personal de las granjas acuícolas, que se expone a términos técnicos complicados de comprender. En este trabajo, se desarrolló un sistema de inferencia difuso (SID) con el objetivo de incrementar la usabilidad en los sistemas de monitoreo, comparando los modelos Mamdani y Takagi-Sugeno. El modelo Mamdani reportó 98% de confianza, superior al 94% del modelo Takagi-Sugeno. Con esta aportación, se describe la calidad del agua con tres etiquetas lingüísticas: "Mala", "Regular", "Buena", acompañadas con el código de colores del semáforo, simplificando el proceso de identificación e interpretación de la calidad del agua al personal de las granjas acuícolas.

Palabras Clave: Acuicultura, Calidad del Agua, Lógica Difusa.

ABSTRACT

Water quality is a vital factor in aquaculture, directly involved in the development of farmed species. The monitoring systems of the parameters that determine this quality are limited to retrieving their values and publishing them. The lack of usability of these systems disrupts interpretation by aquaculture farm staff, who are exposed to technical terms that are difficult to understand. In this work, a diffuse inference system (SID) was developed with the aim of increasing usability in monitoring systems, comparing the Mamdani and Takagi-Sugeno models. The Mamdani model reported 98% confidence, higher than the Takagi-Sugeno model 94%. With this contribution, the water quality is described with three linguistic labels: "Poor", "Fair", "Good", accompanied by the color code of the traffic light, simplifying the process of identification and interpretation of water quality for aquaculture farm personnel.

Keywords: Aquaculture, Water Quality, Fuzzy Logic.

1. INTRODUCCIÓN

México presenta condiciones favorables respecto a clima y espacios para el desarrollo de la acuicultura, beneficiando a que se convierta en una actividad económica relevante [1]. El censo del año 2021 reporta un volumen de producción de 351 mil

toneladas, representando un valor en el mercado de 19 mil 933 millones de pesos [2].

Para obtener el rendimiento y la calidad esperada del cultivo acuícola, es importante conocer el estado de la calidad del agua en cada estanque, entre otros factores. La calidad del agua interviene directamente en el correcto y óptimo desarrollo e incluso en la supervivencia de las especies a lo largo del ciclo de cultivo [3]. Además, es un indicador que influye en la rentabilidad de la producción acuícola.

La determinación de la calidad del agua consta, necesariamente, de mediciones continuas de los parámetros fisicoquímicos temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica (salinidad), y su comparación con los valores de referencia establecidos para cada especie [4]. Estos parámetros son fundamentales para la correcta salud y supervivencia de las especies cultivadas [5].

Los acuicultores utilizan diversos métodos y dispositivos para realizar el monitoreo, el objetivo es detectar valores fuera del rango establecido de manera oportuna, que pongan en riesgo el cultivo [6]. Sin embargo, la mayoría de estos sistemas se limitan en recuperar el valor de cada parámetro y publicarlo [7], careciendo de la funcionalidad de interpretación de la calidad del agua a nivel descriptivo empleando términos del vocabulario común como "malo", "regular", "bueno".

Por otro lado, las granjas acuícolas se localizan, en su mayoría, en zonas rurales y son fuentes de empleo para numerosas personas. Sin embargo, muchas de estas personas desconocen los términos técnicos que caracterizan la calidad del agua. Ocasionando errores en la interpretación del proceso con sus respectivas afectaciones al cultivo. Este trabajo está orientado a paliar esta problemática, implementado un modelo basado en lógica difusa que se utilice como enlace entre los sistemas de monitoreo y el personal de la granja.

La lógica difusa permite modelar y manejar la incertidumbre y la imprecisión en la toma de decisiones logrando capturar la naturaleza indeterminada de los parámetros para obtener una evaluación precisa y confiable de la calidad del agua [8]. La aplicación de la lógica difusa resulta especialmente útil en la

evaluación de los parámetros proporcionando una descripción de la calidad del agua en términos del vocabulario común.

Esta técnica se basa en modelos como Mamdani y Takagi-Sugeno. El modelo Mamdani utiliza conjuntos difusos, funciones de membresía y reglas difusas para relacionar las variables de entrada con las variables de salida. Por otro lado, el modelo Takagi-Sugeno combina la lógica difusa con la teoría de sistemas para proporcionar resultados más precisos y eficientes. Este modelo utiliza reglas difusas y funciones de pertenencia para relacionar las variables de entrada con las funciones de salida lineales o no lineales [9].

El objetivo de este trabajo, entonces, es desarrollar un sistema de inferencia difuso (SID) que proporcione una descripción de la calidad del agua en términos del vocabulario común adaptados al personal de las granjas acuícolas. Además, se comparan los modelos Mamdani y Takagi-Sugeno por medio del coeficiente de determinación con el fin de obtener el modelo con mayor grado de confianza.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversos trabajos han abordado esta temática, a continuación, se analizan las siguientes investigaciones con el fin de identificar oportunidades de mejora.

El trabajo presentado en [10] propone una solución mediante sistemas de inferencia de lógica difusa que desarrolla un monitor de calidad y un sistema de lavado que se adapta para dar solución a la acuicultura inteligente, tomando como base parámetros limnológicos. Este trabajo, si bien presenta el monitoreo de la calidad del agua, solo implementó el modelo Mamdani y los autores no consideran la eficiencia de la propuesta.

Por otro lado, [11] propone un método que se basa en una evaluación integral difusa con mejoras mediante la optimización de los estándares, reconstruyendo el peso de la evaluación de la calidad del agua, tomando en cuenta la dimensión temporal. La aportación de esta investigación se limita a redefinir, en términos conceptuales, los pesos de un modelo difuso tomando en cuenta el factor temporal.

En [12], se implementa este proceso en cultivos de Tilapia con un modelo Mamdani. Los autores consideran el pH, el oxígeno disuelto y la temperatura como entradas, teniendo como salida la calidad del agua expresada en términos de “mala”, “promedio”, “normal”. Al considerar tres parámetros como entrada del sistema, este trabajo brinda la posibilidad de mejoras al considerar parámetros adicionales para el desarrollo de un modelo con mayor grado de precisión.

En [13], se implementó un sistema utilizando el modelo Mamdani. Este trabajo utiliza como entrada tres parámetros: temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. La salida que produce gestiona el manejo de dos actuadores: una bomba de agua y un aireador. Sin embargo, los autores no contemplaron la descripción de la calidad del agua.

El trabajo [14], utilizó los parámetros temperatura, pH y turbidez como entradas del modelo difuso Mamdani, mostrando como salida la calidad del agua clasificada con cinco variables lingüísticas e implementado en un microcontrolador. Sin embargo, esta solución no contempla la comparación con otro modelo como Takagi-Sugeno.

En resumen, los trabajos referenciados, en su mayoría solo utilizaron tres parámetros como entradas, además de utilizar únicamente el modelo difuso Mamdani para su implementación. Este trabajo complementa las áreas de mejora señaladas al emplear cuatro parámetros como entradas, además de la comparación de los modelos Mamdani y Takagi-Sugeno.

3. DESARROLLO

3.1. Parámetros de la calidad del agua

Para el desarrollo de este trabajo, es necesario definir la especie cultivada en el estanque a monitorear. Es importante destacar que, según la especie, se definen rangos recomendados en los parámetros que conjuntamente describen la calidad del agua. La especie considerada en este trabajo es la Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), cuyos rangos recomendados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Rangos Recomendados en los Parámetros de Calidad del Agua para la Tilapia del Nilo (Fuente Propia).

Parámetro	Rango óptimo	Referencias
Temperatura (°C)	25 - 32	[15, 16, 17]
Oxígeno Disuelto (mg/l)	3 - 9	
pH	6.5 - 8.5	
Salinidad (ppm)	10 - 25	

3.2. Grado de importancia de cada parámetro

Cada parámetro tiene un grado de importancia al determinar la calidad del agua, dependiendo de la especie cultivada y de la manera en que intervienen en su desarrollo. En la Tabla 2 se muestra este grado de importancia definido en porcentajes.

De acuerdo con [7], la temperatura fuera del rango recomendado con fluctuaciones repentinas presenta afectaciones en las especies causando estrés y enfermedades. Además, tiene una relación directa con el porcentaje de oxígeno disuelto. En la presencia de temperaturas elevadas, el agua contiene menor cantidad de oxígeno disuelto. El nivel de oxígeno disuelto se considera uno de los parámetros críticos relacionándose con el crecimiento, el patrón de alimentación, el nivel de actividad e incluso la supervivencia. Los valores de pH inestables con tendencias ácidas o alcalinas intervienen en el metabolismo y en los procesos fisiológicos. Asimismo, los valores de salinidad fuera de rangos establecidos afectan los procesos osmorreguladores y causan alteraciones metabólicas.

3.3. Semáforo de calidad del agua

Para incrementar la usabilidad del sistema de monitoreo, se adaptó el código de colores del semáforo al modelo, utilizado como indicador visual para describir la calidad del agua. Las etiquetas lingüísticas de la salida del modelo utilizan la siguiente nomenclatura: verde representa “Buena”, amarillo representa “Regular” y rojo representa “Mala”. De esta manera, para el personal de la granja, visualizar e interpretar la calidad del agua resulta un proceso más simple e incluso en condiciones de poca visibilidad.

En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de la aplicación del semáforo de calidad y se define el porcentaje de importancia de cada parámetro.

Tabla 2. Semáforo de Calidad y Determinación del Grado de Importancia de los Parámetros (Fuente Propia).

Parámetro	Importancia (%)	Semáforo de Calidad		
		Verde	Amarillo	Rojo
		“Buena”	“Regular”	“Mala”
Temperatura (°C)	25	27	32	25
Oxígeno Disuelto (mg/l)	50	8	4	1
pH	15	7.5	8.5	5
Salinidad (ppm)	10	10	25	40

3.4. Modelo difuso

Para desarrollar el modelo del SID Mamdani y Takagi-Sugeno se utilizó el software Matlab versión R2020b [18], específicamente el toolbox de lógica difusa.

En la Figura 1 y 2 se muestra el modelo del SID Mamdani y Takagi-Sugeno, respectivamente. Para ambos modelos se utilizaron como entradas los parámetros mostrados en la Tabla 1. Para la salida de los SID se utilizó la etiqueta lingüística que describe la calidad del agua.

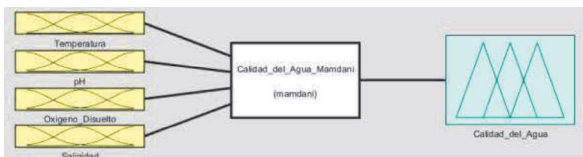


Figura 1. Modelo Difuso Mamdani (Fuente Propia).

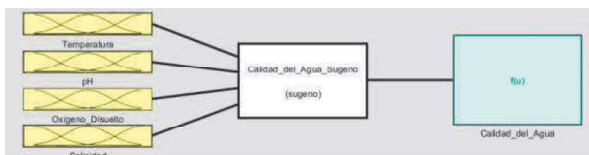


Figura 2. Modelo Difuso Takagi-Sugeno (Fuente Propia).

3.5. Variables de entrada

Las variables de entrada, como se mencionó, son los parámetros temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad. En cada

parámetro se define un rango que fue aplicado en el modelo y se muestra en la Tabla 1.

3.6. Variables de salida

Para ambos modelos del SID, la variable de salida es la calidad del agua, que, en este caso, a diferencia de las entradas, se define de manera particular para cada modelo.

En el modelo del SID Mamdani, la salida utiliza funciones de membresía trapezoidales, que están definidas dentro del rango de valores de 0-10. Estas funciones son representadas por etiquetas lingüísticas que ayudan a describir la calidad del agua, y están expresadas de la siguiente manera: “Mala”, “Regular”, “Buena”.

En el modelo del SID Takagi-Sugeno, la salida se representa por medio de funciones lineales o valores constantes, comprendidos dentro del rango de 0-10. A cada valor se le asigna una etiqueta lingüística, la cual describe la calidad del agua y están expresadas de manera similar que la del SID Mamdani.

3.7. Funciones de membresía

Las funciones de membresía son elementos fundamentales en la lógica difusa, utilizados para representar el grado de pertenencia de un valor a un conjunto difuso [9]. Estas funciones permiten modelar la incertidumbre y la imprecisión asociadas con las variables en un sistema difuso. Existen diferentes tipos de funciones de membresía, del tipo triangular, trapezoidal, gaussiana, etc.

Para el desarrollo de las entradas de ambos SID, se utilizaron funciones de membresía de tipo trapezoidal. La selección del tipo trapezoidal se basa en el comportamiento de los parámetros que se modelan, obteniendo con esta una transición suave entre el valor de pertenencia máximo y el valor de pertenencia mínimo. Resultando útil para representar de manera más precisa las características y la variabilidad de los parámetros involucrados. En la Tabla 3 se muestran las características que describen a cada una de estas funciones.

Tabla 3. Funciones de Membresía para las Entradas de los SID Mamdani y Takagi-Sugeno (Fuente Propia).

Variable	Rango	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro
Temperatura (°C)	10 - 40	Baja / [10 10 20 25]	Óptima / [23 25 32 34]	Alta / [32 35 40 40]
Oxígeno Disuelto (mg/l)	0 - 12	Bajo / [0 0 3 5]	Óptimo / [4 6 8 10]	Alto / [9 10 12 12]
pH	0 - 14	Ácido / [0 0 5 6.5]	Óptimo / [6 7 8 9]	Alcalino / [8.5 10 14 14]
Salinidad (ppm)	0 - 40	Baja / [0 0 5 10]	Óptima / [5 10 20 25]	Alta / [20 25 40 40]

En las Figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran las funciones de membresía de la entrada temperatura, pH, oxígeno disuelto y salinidad, respectivamente.

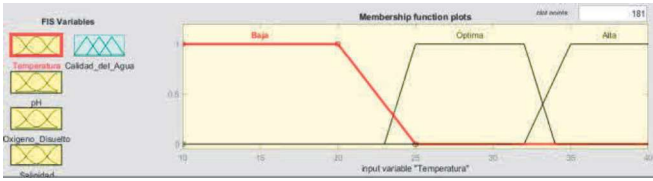


Figura 3. Funciones de Membresía de Temperatura (Fuente Propia).

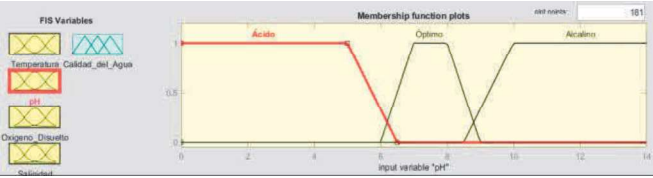


Figura 4. Funciones de Membresía de pH (Fuente Propia).

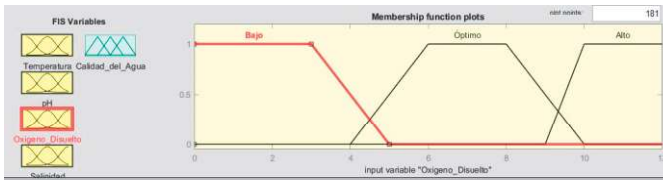


Figura 5. Funciones de Membresía de Oxígeno Disuelto (Fuente Propia).

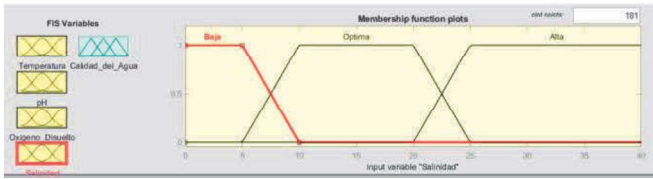


Figura 6. Funciones de Membresía de Salinidad (Fuente Propia).

Para la salida del SID Mamdani, se utiliza, de igual manera, funciones de membresía del tipo trapezoidal, empleando tres etiquetas lingüísticas para describir la calidad del agua. Para la salida del SID Takagi-Sugeno, se utilizan funciones de pertenencia representadas con funciones lineales o no lineales, que, en este caso, son definidas con tres constantes a las que se les asignan etiquetas lingüísticas. En la Tabla 4 se muestran las características de las funciones de membresía y pertenencia de la salida de cada SID.

Tabla 4. Funciones de Membresía y Pertenencia para la Salida de los SID Mamdani y Takagi-Sugeno (Fuente Propia).

SID	Variable: Calidad del Agua		
	Rango: 0 - 10		
	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro	Etiqueta / Parámetro
Mamdani	Mala / [0 0 2.5 4]	Regular / [3 4 6 7]	Buena / [6 7.5 10 10]
Takagi-Sugeno	Mala / 2	Regular / 5	Buena / 8

En las Figuras 7 y 8 se muestran las funciones de membresía y de pertenencia de los SID Mamdani y Takagi-Sugeno, respectivamente, para la salida del modelo.

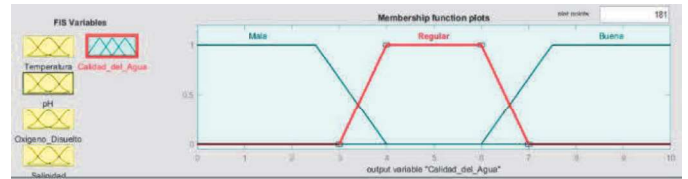


Figura 7. Funciones de Membresía para la Salida del SID Mamdani (Fuente Propia).



Figura 8. Funciones de Pertenencia para la Salida del SID Takagi-Sugeno (Fuente Propia).

3.8. Reglas difusas

Las reglas difusas son una parte fundamental de la lógica difusa y se utilizan para relacionar las variables de entrada con las variables de salida en un sistema difuso [9]. Estas reglas capturan el conocimiento y la experiencia experta en forma de reglas lingüísticas, permitiendo la toma de decisiones basada en la incertidumbre y la imprecisión.

Para la definición de las reglas difusas de este trabajo, se tomó en cuenta el grado de importancia de cada parámetro mostrado en la Tabla 2. Se involucraron 81 reglas, siguiendo la lógica mostrada en la Tabla 5. Por optimización de espacio, se adaptaron las siguientes abreviaciones a dicha Tabla:

- C: Complemento
- OL: Operador lógico
- Prm.: Parámetro
- Temp.: Temperatura
- OD: Oxígeno Disuelto
- Sal.: Salinidad

Tabla 5. Lógica para la Creación de Reglas Difusas (Fuente Propia).

C	Prm.	O L	Prm.	O L	Prm.	O L	Prm.	C	Calidad del Agua
	Temp. is		pH is		OD is		Sal. is		
I F	Baja	A N D	Ácido	A N D	Bajo	A N D	Baja	T H E N	Mala
	Óptima		Óptimo		Óptimo		Óptima		Regular
	Alta		Alcalino		Alto		Alta		Buena

4. RESULTADOS

4.1. Modelos SID

Con el objetivo de modelar el comportamiento de ambos modelos, se generaron gráficas 3D. Las Figuras 9 y 10 reportan estos resultados. El SID Mamdani mostrado en la Figura 9, infiere que con valores de oxígeno disuelto y de temperatura óptimos, se obtiene una calidad de agua “Buena”. En tanto que, el SID Takagi-Sugeno en la Figura 10, destaca la relación que proporciona una calidad de agua “Buena” con valores de oxígeno disuelto y temperatura óptimos. Como se aprecia, el modelado de los SID no presenta diferencias notables en su funcionamiento y ambos modelos confirman la relevancia del oxígeno disuelto como un factor determinante en la calidad del agua.

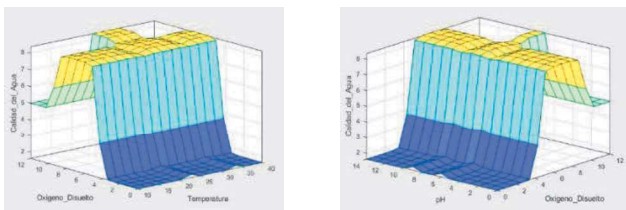


Figura 9. Gráfica 3D del Comportamiento del SID Mamdani (Fuente Propia).

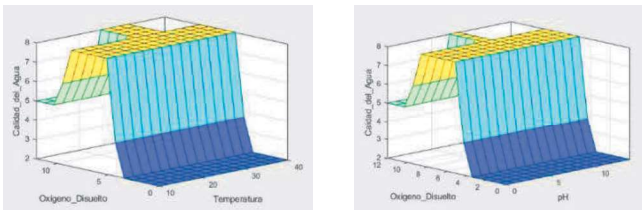


Figura 10. Gráfica 3D del Comportamiento del SID Takagi-Sugeno (Fuente Propia).

4.2. Pruebas de funcionamiento de los modelos SID

Para evaluar el funcionamiento de cada SID, se diseñaron y aplicaron pruebas a ambos modelos. En la Figura 11 y 12 se muestran los resultados de estas pruebas. Se consideró una temperatura de 23°C, un pH de 7.5, un oxígeno disuelto de 5 mg/l y una salinidad de 22 ppm. Se obtuvo un valor en la salida, Calidad_del_Agua, de 6.62 con el SID Mamdani, y de 6.8 con el SID Takagi-Sugeno. Los dos modelos describen la calidad del agua como “Regular”, aunque el valor presentado por el SID Mamdani corresponde a una mayor precisión en cuanto al resultado esperado.

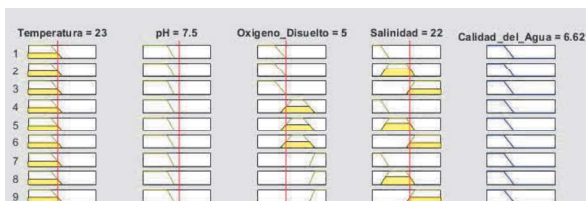


Figura 11. Caso de Prueba con el SID Mamdani (Fuente Propia).

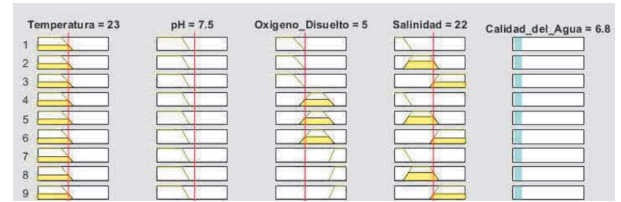


Figura 12. Caso de Prueba con el SID Takagi-Sugeno (Fuente Propia).

4.3. Coeficiente de determinación

Para aplicar el coeficiente de determinación, se usaron los datos de prueba mostrados en la Tabla 6. Estos datos fueron seleccionados de manera aleatoria y evaluados aplicando el grado de importancia de los parámetros mostrado en la Tabla 2.

Tabla 6. Datos de Prueba (Fuente Propia).

Parámetros				SID Mamdani	SID Takagi-Sugeno	Resultado Esperado
Temp. (°C)	OD (mg/l)	pH	Salin. (ppm)			
32.9	4.2	7.2	5.1	3.32 "Mala"	2.99 "Mala"	3 "Mala"
15.3	8.9	5.8	7.9	1.81 "Mala"	2 "Mala"	2 "Mala"
30.1	11.2	8.1	12.3	8.34 "Buena"	8 "Buena"	9 "Buena"
23.8	7.8	6.3	21.2	5.82 "Regular"	6.98 "Regular"	6 "Regular"
29.2	5.6	6.9	15.4	8.31 "Buena"	8 "Buena"	8 "Buena"

El coeficiente de determinación fue empleado en una libreta de Python, utilizando la función `r2_score` de la librería `sklearn.metrics`. La Figura 13 muestra la implementación de la libreta de Python con los resultados obtenidos.

El SID Mamdani presenta una mayor fiabilidad en la descripción de la calidad del agua al obtener un valor del 98% de confianza, representado esto en la Figura 14, en la que se observa que el comportamiento del SID Mamdani se aproxima de mejor manera al comportamiento de los resultados esperados.

```

from sklearn.metrics import r2_score

R_Esperado = [3.0, 2.0, 9.0, 6.0, 8.0]
R_Mamdani = [3.32, 1.81, 8.34, 5.82, 8.31]
R_TakagiSugeno = [2.99, 2, 8, 6.98, 8]

R2_Mamdani = r2_score(R_Esperado, R_Mamdani)
R2_TakagiSugeno = r2_score(R_Esperado, R_TakagiSugeno)

print("Coeficiente de determinación del SID Mamdani:", R2_Mamdani)
print("Coeficiente de determinación del SID Takagi-Sugeno:", R2_TakagiSugeno)

Coeficiente de determinación del SID Mamdani: 0.9811129032258065
Coeficiente de determinación del SID Takagi-Sugeno: 0.9472983870967742
    
```

Figura 13. Resultados del Coeficiente de Determinación de cada SID (Fuente Propia).

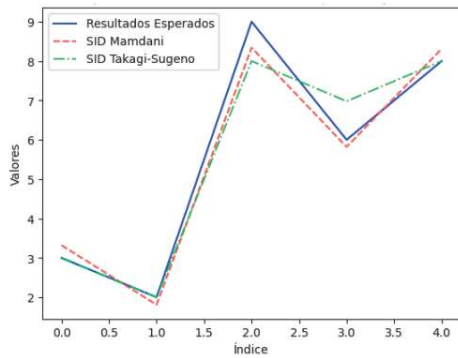


Figura 14. Gráfica Comparativa de los Resultados Esperados y los SID (Fuente Propia).

5. DISCUSIÓN

Este modelo se distingue de otras soluciones similares orientadas al monitoreo de la calidad del agua, al aplicar la técnica de lógica difusa con el propósito de proporcionar una interfaz de salida de datos acompañados de un formato universal, basada en el código de colores del semáforo. En contraparte a otras soluciones que solo publican valores de los parámetros.

La aplicación de este modelo oculta la complejidad subyacente de la operación de los sistemas de monitoreo al publicar información útil y fácil de interpretar, que apoya a la toma oportuna de decisiones relacionadas con la calidad del agua de cultivo acuícola, evitando que los usuarios de este sistema se vean obligados a memorizar valores técnicos o de referencia.

6. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, se contempla que el modelo Mamdani, el óptimo para describir la calidad del agua, sea embebido en un microcontrolador que incluya el semáforo de calidad. Conformando un dispositivo que informe el estado de la calidad del agua de manera visual con una fácil interpretación y de gran usabilidad.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un sistema de inferencia difuso (SID) que describe la calidad del agua en estanques acuícolas utilizando los parámetros temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad. El SID se basó en el desarrollo de los modelos Mamdani y Takagi-Sugeno, los cuales fueron comparados por medio del coeficiente de determinación, reportando un 98% de confianza con el modelo Mamdani, superando el 94% del modelo Takagi-Sugeno. En la salida del SID se emplearon tres etiquetas lingüísticas que facilitan la interpretación de la calidad: “Mala”, “Regular”, “Buena”. Estas etiquetas lingüísticas fueron adaptadas a un semáforo de calidad que relaciona cada color del dispositivo con la intención de cada etiqueta, ofreciendo una rápida e intuitiva identificación de la calidad del agua para el personal de granjas acuícolas.

8. REFERENCIAS.

- [1] S. de A. y D. Rural, “Acuicultura, actividad que brinda seguridad alimentaria”, *gob.mx*. <http://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-actividad-que-brinda-seguridad-alimentaria?idiom=es> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [2] Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, “Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2021”, *gob.mx*. https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2021/ANUARIO_ESTA-DISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2021.pdf (accedido 29 de mayo de 2023).
- [3] “2. MEJORA DE LA CALIDAD DE AGUA EN LOS ESTANQUES”. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6709s/x6709s02.htm (accedido 9 de junio de 2023).
- [4] J. Verduzco-Ramírez et al., “Dispositivo portátil para monitoreo de calidad del agua en granjas acuícolas de camarón”, *Ingenierías*, vol. 2, no. 2, pp. 54-59, 2019.
- [5] “¿Cómo se mide la calidad del agua en la acuicultura?”, *Envira IOT*, 14 de junio de 2019. <https://enviraiot.es/mide-calidad-agua-acuicultura/> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [6] C.-H. Chen, Y.-C. Wu, J.-X. Zhang, y Y.-H. Chen, “IoT-Based Fish Farm Water Quality Monitoring System”, *Sensors*, vol. 22, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2022, doi: 10.3390/s22176700.
- [7] M. Olivo-Gutiérrez et al., “Prototipo para el monitoreo automatizado de parámetros de calidad del agua en una granja de camarón”, *Científica*, vol. 22, n.º 2, pp. 87-95, 2018.
- [8] R. Casadesús y I. de Castro, “De la lógica difusa a la inteligencia artificial. Hacia un futuro transhumano”, *Ars Brevis*, n.º 24, Art. n.º 24, 2018.
- [9] D. Guzmán y V. M. Castaño, “La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro”, *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 24, n.º 2, Art. n.º 2, 2006, Accedido: 8 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2640>.
- [10] M. G. A. Bautista et al., “Fuzzy Logic-Based Adaptive Aquaculture Water Monitoring System Based on Instantaneous Limnological Parameters”, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 26, pp. 937-943, nov. 2022, doi: 10.20965/jaciii.2022.p0937.
- [11] G. You, B. Xu, H. Su, S. Zhang, J. Pan, X. Hou, J. Li y R. Ding, “Evaluation of Aquaculture Water Quality Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method”, *Water*, vol. 13, no. 8, p. 1019, 2021, doi: 10.3390/w13081019.
- [12] M. R. D. Molato, “AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic”, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 13, n.º 2, Art. n.º 2, 51/28 2022, doi: 10.14569/IJACSA.2022.0130265.
- [13] S. K. Nagothu, “Intelligent Control of Aerator and Water Pump in Aquaculture Using Fuzzy Logic”, en *Microelectronic Devices, Circuits and Systems*, V. Arunachalam y K. Sivasankaran, Eds., en *Communications in Computer and Information Science*. Singapore: Springer, 2021, pp. 160-171. doi: 10.1007/978-981-16-5048-2_13.
- [14] P. B. Bokinkito y L. T. Caparida, “Using Fuzzy Logic for Real - Time Water Quality Assessment Monitoring System”, en *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Automation, Control and Robots*, en ICACR 2018. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, oct. 2018, pp. 21-25. doi: 10.1145/3293688.3293695.
- [15] C. E. Boyd, “Water Quality for Pond Aquaculture”. *International Center for Aquaculture and Aquatic Environments*, Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, 1998.
- [16] S. N. Sirivardena, A. M. Nasr-Allah, y A. A. Olaniji, “Water quality management”, 2022, Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://digitalarchive.worldfishcenter.org/handle/20.500.12348/5471>
- [17] I. N. de Pesca, “Acuicultura Tilapia”, *gob.mx*. <http://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-tilapia> (accedido 14 de junio de 2023).
- [18] “MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink”. <https://www.mathworks.com/> (accedido 16 de junio de 2023).