

SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL SUELO EN UN CULTIVO DE STEVIA MORITA II

Martínez-Torres Jesús-Emmanuel¹, García-Díaz Noel¹, Verduzco-Ramírez Jesús¹, García-Virgen Juan¹, Ochoa-Brust Alberto²

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Colima

División de Estudios de Posgrado e Investigación

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

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

²Universidad de Colima / Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Carretera Colima - Coquimatlán km 9, Valle de las Huertas, 28400 Coquimatlán, Colima

Teléfono: (312) 316 1165

{G2246013, ngarcia, averduzco, jgarcia }@colima.tecnm.mx, aochoa@ucol.mx

RESUMEN.

El mantener la calidad del suelo es esencial en la agricultura para el desarrollo óptimo de las plantas, maximizar los rendimientos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo. Dentro de este contexto, este estudio se enfoca en abordar la problemática de la falta de un sistema eficiente de control de calidad del suelo en el cultivo de Stevia Morita II. Se propone un sistema de inferencia difuso para evaluar la calidad del suelo. Los resultados demuestran que la implementación de este sistema es capaz de mantener una alta eficiencia y precisión en la evaluación de la calidad del suelo, lo que conlleva a una mejor toma de decisiones y optimización de los recursos en el cultivo. Palabras clave: Lógica difusa, Stevia, Calidad del suelo, Agricultura.

ABSTRACT.

Maintaining soil quality is essential in agriculture for optimal plant development, maximizing yields, and ensuring long-term sustainability. Within this context, this study focuses on addressing the problem of the lack of an efficient soil quality control system in Stevia Morita II cultivation. A fuzzy inference system is proposed to evaluate soil quality. The results demonstrate that the implementation of this system is capable of maintaining high efficiency and accuracy in soil quality evaluation, leading to improved decision-making and resource optimization in cultivation.

Keywords: Fuzzy logic, Stevia, Soil quality, Agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La salud del suelo es un aspecto fundamental para producción de alimentos saludables y sostenibles. El suelo actúa como sustrato donde se desarrolla el 95% de los alimentos para consumo humano [1]. La calidad del suelo en la agricultura se refiere a la capacidad para ser sostenible, mantener la productividad y mitigar la contaminación ambiental. Esta calidad se evalúa a través de indicadores físicos, químicos y biológicos [2]. Dentro de estos se encuentran el pH, el contenido de materia orgánica, el contenido de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la conductividad eléctrica (CE) [3]. Estos indicadores son afectados por la sobreexplotación y degradación del suelo, generando un impacto negativo en la producción y calidad de los cultivos. [1]. Esta dependencia del suelo ha generado una creciente preocupación por

encontrar alternativas que fomenten la producción de alimentos saludables y seguros, en equilibrio con el medio ambiente y la calidad del suelo.

1.2. Stevia

Dentro de esta categoría de alimentos se encuentra la Stevia (Stevia rebaudiana Bertoni), una planta originaria de Paraguay y Brasil. Reconocida mundialmente por sus propiedades edulcorantes. México posee un gran potencial para la producción de Stevia debido a sus condiciones geográficas y climáticas favorables [4]. En México se introdujo la variedad Stevia Morita II, por su alto contenido de rebaudiósido-A y su resistencia a la Septoria [6].

1.3. Rancho Tajeli

La producción de Stevia se lleva a cabo en 12 estados del país [4]. Entre ellos se encuentra el estado de Colima, donde destaca el "Rancho Tajeli", ubicado en el municipio de Cuauhtémoc (19°14'38.4"N 103°39'39.2"W). La empresa está dedicada a la producción y comercialización de Stevia Morita II. A pesar de contar con condiciones edafoclimáticas adecuadas, el Rancho Tajeli, enfrenta una problemática que limita su productividad agrícola por la falta de un sistema eficiente de control de calidad del suelo. Esta carencia impide tomar decisiones informadas y acciones correctivas.

1.4. Lógica Difusa (LD)

La propuesta del presente trabajo consiste en utilizar variables lingüísticas en conjunto a la LD, una rama de la inteligencia artificial (IA) que se utiliza para trabajar con datos imprecisos o que tienen cierto grado de incertidumbre. Esta técnica se utiliza en diferentes campos, como en sistemas de control, reconocimiento de patrones y toma de decisiones [5]. El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de inferencia difuso (SID) que determine la calidad del suelo y proporcione a los agricultores una visión clara y comprensible de su estado, facilitando la toma de decisiones informadas para mantener una alta calidad y producción en el cultivo de Stevia.

1.5. Trabajos relacionados

Se analizaron diversos trabajos relacionados con el tema de estudio y la técnica utilizada en esta investigación.

El trabajo [7] desarrolló un modelo que utiliza controladores basados en LD y lógica clásica para evaluar calidad de terreno, considerando las condiciones climáticas y las características generales del suelo. Si bien se demuestra que la aplicación de la LD permite una evaluación precisa, se encuentra con la limitante de no utilizar parámetros químicos para evaluar la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

En [8] se utilizó un SID para predecir el estado de contaminación del suelo con base a variables como el pH y los minerales presentes. Sin embargo, centra la evaluación solo en elementos dañinos.

En los trabajos [9,10] se evaluaron diferentes aspectos agronómicos y ambientales que influyen en el crecimiento y rendimiento de la Stevia. Si bien estos estudios buscan determinar la calidad de la Stevia, ninguno de estos utiliza alguna técnica de IA.

El trabajo presentado en [11] propone un sistema de monitoreo en un invernadero de esquejes de Stevia utilizando un sistema difuso. Se emplean la humedad y temperatura relativa del ambiente como variables de entrada. Sin embargo, limita su enfoque en parámetros ambientales.

Al examinar estos trabajos, se han identificado áreas de oportunidad y mejora. En [7,8,11], se encontró que una mejora es incluir parámetros de macronutrientes para obtener una visión más completa de la fertilidad del suelo y su impacto en el rendimiento de los cultivos. En los trabajos [9,10] una mejora es implementar un modelo de LD para obtener una mayor precisión ante la naturaleza de los datos.

Es importante destacar que ninguno de los trabajos analizados ha utilizado la LD en la evaluación de los suelos en cultivos de Stevia. Esto resalta un área de oportunidad en el desarrollo de un SID para analizar su funcionalidad y resultados en este ámbito en particular.

2. DESARROLLO

2.1. Tipo de SID

La LD es un campo amplio que cuenta con varios métodos y enfoques, entre los cuales destacan los modelos Mamdani y Takagi-Sugeno(T-S).

Madani se basa en la teoría de Max-Min, utiliza conjuntos y reglas difusas para generar una función de membresía difusa como salida [12,13]. Se utiliza para problemas que requieren una interpretación lingüística difusa. T-S emplea reglas que se caracterizan por utilizar ecuaciones lineales o constantes como salida [13,14]. Este método es utilizado cuando se requiere una salida numérica precisa.

En este trabajo se desarrolló un SID tipo T-S. Esta elección se basa en el enfoque de estudio y así como en los trabajos [15,16], donde se explica que el T-S es adecuado para sistemas dinámicos no lineales, como los que se encuentran en la agricultura. Además, se destaca que este modelo está

planteado y diseñado para servir como base en la incorporación de un sistema de control automatizado.

2.2. Variables de entrada

Los agricultores del Rancho Tajeli, quienes cuentan con experiencia en el cultivo de Stevia Morita II, basan la calidad del suelo en los parámetros nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Para respaldar esta información, se analizaron diversos estudios relacionados con la calidad del suelo en la agricultura y la Stevia [2,3,9,10,17,18]. Estos estudios destacaron que los indicadores químicos más relevantes para el desarrollo de los cultivos son precisamente estos macronutrientes junto con el pH. Con base a esto, se decidió utilizar dichos parámetros como variables de entrada.

2.3. Rangos de variables de entrada

Los valores de referencia para los parámetros de nutrientes del suelo pueden variar según el cultivo específico, la región y el tipo de suelo. Para determinar la calidad de suelo se consideraron los valores para un cultivo de Stevia Morita II, una altitud de 575 m.s.n.m., una temperatura ambiental que oscila de 18°C a 30°C, una precipitación anual de 900 mm [19] y con una textura de suelo franco arenosa.

Considerando estas características, se revisaron diversos estudios relacionados [4,9,10,18,20,21,22,23], se buscó identificar aquellos que compartieran condiciones similares, con el objetivo de establecer los niveles óptimos de N, P, K y pH del suelo para cultivos de Stevia.

Otro factor que se consideró fue el nivel de relevancia de cada parámetro y su influencia en los demás. Cada uno de ellos tiene un impacto en el desarrollo y rendimiento de las plantas actuando de forma independiente y conjunta. Los excesos o deficiencias de estos tienen efectos significativos en la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Para establecer este nivel de relevancia (Tabla 1), se llevó a cabo una revisión de diferentes estudios relacionados [2,3,8,17,18,22,23,24], junto con la experiencia de los agricultores del Rancho Tajeli y su juicio experto. Como resultado de este análisis, se propusieron porcentajes de nivel de relevancia que reflejan la importancia relativa de cada parámetro en el contexto del cultivo de Stevia. Estos porcentajes son una propuesta basada en la información recopilada y pueden ajustarse en función de las características específicas de cada situación agrícola.

Tomando en cuenta la información recolectada, se establecieron los rangos de los parámetros. Se clasificaron en las categorías “Bajo”, “Medio” y “Alto”, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de entrada.

Parámetros	Rangos			Nivel de relevancia
	Bajo	Medio	Alto	
N (mg/Kg)	< 116	116 - 160	>160	25%
P (mg/Kg)	< 4.5	4.5 - 8.4	> 8.4	15%
K (mg/Kg)	< 49	49 - 80	> 80	20%
pH	< 5.5	5.5 - 7	> 7	40%

2.4. Variable de salida

En el SID la variable de salida es "Calidad", esta variable se representa mediante un valor numérico constante que refleja la calidad del suelo. Para este sistema, el valor constante se encuentra dentro de un rango de 0 a 1, donde un valor cercano a 0 se interpreta como una baja calidad y un valor cercano a 1 indicará una alta calidad.

Para facilitar su interpretación, se han establecido cinco posibles etiquetas lingüísticas de salida: "Excelente", "Buena", "Regular", "Deficiente" y "Mala". Estas etiquetas representan las posibles categorías en las que se clasifica la variable de salida del sistema, y se determinan a partir de la combinación de las entradas del sistema. De esta manera, se puede obtener una evaluación más clara y comprensible de la calidad, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Etiquetas lingüísticas de salida.

Variable de Salida	Constante de salida				
	Mala	Deficiente	Regular	Buena	Excelente
Calidad	0	0.2	0.5	0.8	1

2.5. Herramientas

Con base en la información en las secciones 2.2, 2.3 y 2.4, se utilizó la herramienta Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB R2021a [25] para la construcción del modelo del SID. En la Figura 1 se muestra el modelo difuso, el cual incluye las variables de entrada y salida del sistema.

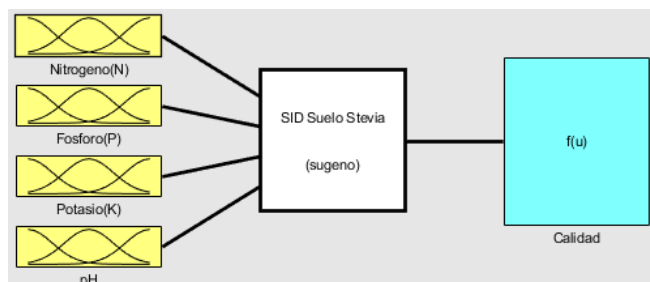


Figura 1. Modelo difuso.

2.6. Funciones de membresía (FM)

Las FM son utilizadas para asignar un grado de pertenencia a un elemento en un conjunto difuso. Estas funciones permiten evaluar en qué medida de similitud se encuentra un elemento dentro del conjunto. Las FM pueden tener diferentes formas, como triangular, trapezoidal o gaussiana [12,13,15,16]. Para el desarrollo de las FM, se tomaron en cuenta los rangos establecidos en la Tabla 1, así como el conocimiento aportado por los expertos del "Rancho Tajeli". Se crearon tres FM tipo trapezoidal para cada una de las variables de entrada, clasificándolas las variables lingüísticas como "Bajo", "Medio" y "Alto" las cuales se presentan en la Tabla 3 y se muestran gráficamente en Figura 2.

Tabla 3. FM del SID.

Variables de entrada	Rango	Funciones		
		Bajo	Medio	Alto
N	0-260	[0 0 80 120]	[75 116 160 195]	[170 200 260 260]
P	0-15	[0 0 2 5.5]	[3.5 4.5 8.4 10.4]	[8.5 11 15 15]
K	0-150	[0 0 25 55]	[25 49 80 110]	[90 120 150 150]
pH	0-14	[0 0 4.5 5.5]	[5 5.5 7 7.5]	[7 8.5 14 14]

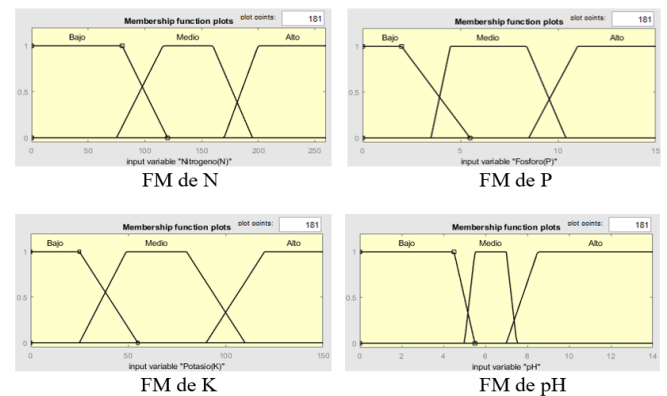


Figura 2. Representación gráfica de las FM.

2.7. Reglas Difusas (RD)

Las RD permiten expresar el conocimiento en variables lingüísticas. Las RD se componen en dos partes: el antecedente, que son las condiciones que deben cumplirse para que la regla sea aplicable y el consecuente, que describe la conclusión que debe tomarse si se cumple el antecedente [12,13,15,16].

Para la creación de las RD, se utilizó el nivel de relevancia de cada parámetro definido en la Tabla 1. Para este SID con cuatro variables de entrada y tres términos lingüísticos para cada variable, se crearon 81 RD. En la Figura 3 se muestran las primeras y últimas cinco de estas RD.

1. If (N is Medio) and (P is Medio) and (K is Medio) and (pH is Medio) then (Calidad is Excelente)
2. If (N is Medio) and (P is Medio) and (K is Medio) and (pH is Alto) then (Calidad is Regular)
3. If (N is Medio) and (P is Medio) and (K is Medio) and (pH is Bajo) then (Calidad is Regular)
4. If (N is Medio) and (P is Medio) and (K is Alto) and (pH is Medio) then (Calidad is Buena)
5. If (N is Medio) and (P is Medio) and (K is Alto) and (pH is Alto) then (Calidad is Mala)
- ...
77. If (N is Bajo) and (P is Bajo) and (K is Alto) and (pH is Alto) then (Calidad is Mala)
78. If (N is Bajo) and (P is Bajo) and (K is Alto) and (pH is Bajo) then (Calidad is Mala)
79. If (N is Bajo) and (P is Bajo) and (K is Bajo) and (pH is Medio) then (Calidad is Deficiente)
80. If (N is Bajo) and (P is Bajo) and (K is Bajo) and (pH is Alto) then (Calidad is Mala)
81. If (N is Bajo) and (P is Bajo) and (K is Bajo) and (pH is Bajo) then (Calidad is Mala)

Figura 3. RD del SID.

3. RESULTADOS

Se generaron modelados 3D con el objetivo de visualizar y representar de manera gráfica el comportamiento del SID.

Estas gráficas permitieron observar cómo varía la calidad en función de las variables de entrada, al mismo tiempo que ayudaron a comprender las relaciones y patrones existentes entre estas variables. En cada grafica se puede apreciar que el sistema presenta un comportamiento que tiende hacia el centro de los rangos establecidos como se muestra en la Figura 4.

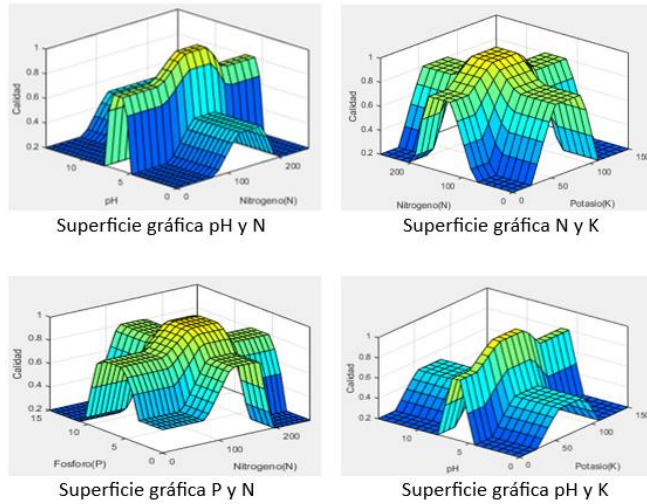


Figura 4. Graficas de comportamiento del SID.

Se realizaron 30 casos de prueba en donde se asignaron de manera aleatoria los valores de entrada. Los resultados generados por el SID se compararon con los resultados evaluados por los expertos. En 28 de los 30 casos de prueba realizados, los resultados del SID coincidieron con los evaluados por los expertos, lo que demuestra la efectividad y confiabilidad del modelo. En la Tabla 4 se muestran estos 30 casos de prueba.

Tabla 4. Casos de prueba. Comparación de resultados.

Variables de entrada					Resultados por:	
No.	N	P	K	pH	SID	Experto
1	104	8.26	51.5	5.77	Buena (0.894)	Buena
2	227	3.12	46.6	2.26	Mala (0.153)	Mala
3	112	4.96	108	7.22	Regular (0.585)	Regular
4	68.9	9.81	96.6	5.71	Deficiente (0.345)	Deficiente
5	136	5.65	67	6.35	Excelente (1)	Excelente
6	27	5.29	109	10.6	Mala (0.189)	Mala
7	12.5	10.7	116	7.36	Mala (0.11)	Mala

8	175	4.68	7.2	0.46	Mala (0.192)	Mala
9	95.7	10.9	39	6.5	Deficiente (0.409)	Deficiente
10	229	12.3	51.1	11.6	Mala (0.177)	Mala
11	172	9.02	42	6.22	Buena (0.834)	Buena
12	90.4	9.63	98.1	7.07	Deficiente (0.471)	Mala
13	244	13.9	142	13.5	Mala (0)	Mala
14	97	5.14	75.4	5.72	Buena (0.873)	Buena
15	95.7	2.32	29.2	5.72	Deficiente (0.386)	Deficiente
16	180	3.54	91.3	6.86	Regular (0.548)	Regular
17	15.2	0.419	5.68	0.675	Mala (0)	Mala
18	185	3.31	17.8	1.81	Mala (0.0694)	Mala
19	234	1.1	117	5.15	Mala (0.0934)	Mala
20	91.7	4.38	36.7	5.79	Regular (0.574)	Regular
21	117	4.07	93.6	5.51	Buena (0.853)	Buena
22	91.7	9.18	22.3	7	Deficiente (0.389)	Deficiente
23	170	8.87	33	2.1	Deficiente (0.279)	Mala
24	191	10.9	72.3	5.58	Regular (0.545)	Regular
25	11.2	10.5	28.4	7.92	Mala (0.0276)	Mala
26	216	2.4	127	1.46	Mala (0)	Mala
27	105	10.4	29.2	5.22	Deficiente (0.322)	Deficiente
28	85.1	3.62	95.8	9.49	Mala (0.171)	Mala
29	70.6	4.3	64.8	6.65	Regular (0.71)	Regular
30	156	8.57	91.3	7.14	Buena (0.992)	Buena

En la Figura 5 se muestra de forma visual el funcionamiento del SID aplicado a los primeros cinco casos de prueba de la Tabla 4.

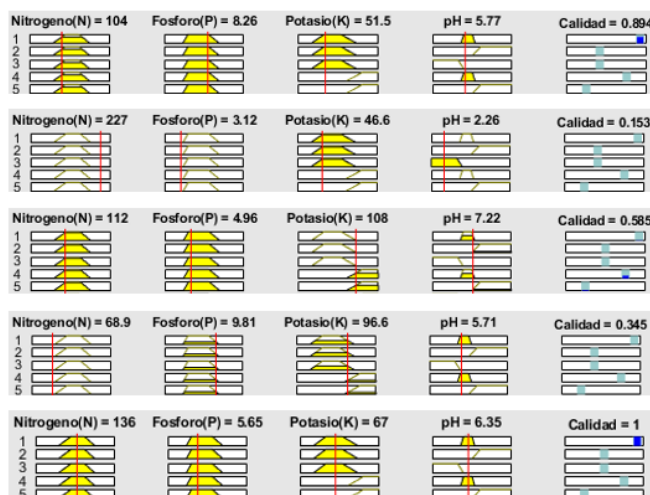


Figura 5. Casos de prueba.

4. DISCUSIÓN

La implementación del SID desarrollado en este estudio mejora la evaluación de la calidad del suelo en los cultivos de Stevia. El uso de la lógica difusa y los parámetros utilizados marca una diferencia significativa en comparación con modelos que no consideran estos factores. Los resultados demuestran que el SID permite una evaluación objetiva y precisa de la calidad del suelo, lo que facilita la toma de decisiones informadas por parte de los agricultores. Es importante señalar que este estudio se centró en un solo tipo de cultivo y una ubicación geográfica específica, por lo que los resultados pueden no ser aplicables a otros contextos agrícolas.

5. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, se contempla la integración de este SID con sistemas de monitoreo en tiempo real. Esto permitiría obtener datos continuos y actualizados sobre las variables de entrada. Además, se propone complementar con un sistema de control automatizado. De esta manera, cuando el SID detecte anomalías en la calidad de suelo, sería capaz de activar dispositivos específicos para corregir la situación. Otra línea de investigación es utilizar un distinto SID, como el tipo Mamdani, para comparar resultados con el presente trabajo. Adicionalmente, aplicar el SID a otros tipos de cultivo con el fin de evaluar el rendimiento y adaptabilidad diferentes contextos agrícolas.

6. CONCLUSIÓN

El desarrollo e implementación de un SID resultó ser útil al evaluar de manera objetiva y precisa la calidad del suelo un cultivo de Stevia. Se comprobó que la calidad del suelo tiende a alcanzar los niveles óptimos cuando las variables de N, P, K y pH se encuentran en valores intermedios de los rangos establecidos. Los resultados de los casos de prueba demuestran un 93.33% de precisión del SID, brindando a los agricultores una herramienta efectiva para la toma de decisiones informadas. Los beneficios destacados de esta

implementación incluyen la mejora en la eficiencia en la evaluación de la calidad del suelo, lo que implica una mejora en la toma de decisiones y la optimización de los recursos utilizados en el cultivo.

7. REFERENCIAS

- [1] FAO, "Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables". Roma, Italia, FAO, 2015.
- [2] [19] Y. García, W. Ramírez, y S. Sánchez, "Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso", Pastos y Forrajes, vol. 35, núm. 2, pp. 125–138, jun. 2012.
- [3] G. Sela, "Fertilización y riego - Teoría y mejores prácticas". Publicación independiente, 2020.
- [4] G. Ramírez-Jaramillo, M. G. Lozano-Contreras, "Productive potential of Stevia rebaudiana Bertoni under irrigation conditions in Mexico," Agroproductividad, vol. 9, no. 12, pp. 76–81, Dec. 2016.
- [5] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, vol. 8, núm. 3, pp. 338–353, jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [6] G. Ramírez-Jaramillo, M. G. Lozano-Contreras, y Y. B. Moguel-Ordóñez, "Ch'ujuk: clonal variety of 'stevia' as an alternative to the mass cultivation of Morita II for the Tropic of Mexico", Revista mexicana de ciencias agrícolas, vol. 11, núm. 8, pp. 2005–2010, dic. 2020, doi: 10.29312/remexca.v11i8.2018.
- [7] N. M. Rojas y H. H. A. Sosa, "Integración de la Lógica Difusa a la Dinámica de Sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas", Elementos, vol. 6, núm. 6, Art. núm. 6, pp. 149–166, oct. 2016, doi: 10.15765/e.v6i6.842.
- [8] Prihantini, T. K. Mahdi, y A. M. Abadi, "Analysis of agriculture land pollution in Pangkal Baru village, Sintang district using Sugeno method", J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1320, núm. 1, p. 012032, oct. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1320/1/012032.
- [9] P. P. Singh Verma, A. Kumar, R. Padalia, y V. R. Singh, "Influence of NPK levels on growth and yield of Stevia rebaudiana Bertoni under hills of Uttarakhand", Indian Journal of Natural Products and Resources, vol. 11, pp. 66–72, mar. 2020.
- [10] M. Zaman, M. Chowdhury, y T. Chowdhury, "Growth parameters and leaf biomass yield of stevia (Stevia rebaudiana, Bertoni) as influenced by different soil types of Bangladesh", Journal of the Bangladesh Agricultural University, vol. 13, p. 31, jul. 2016, doi: 10.3329/jbau.v13i1.28708.
- [11] M.-A. Dante-Alberto, G.-D. Noel, G.-V. Juan, V.-R. Jesús-Alberto, H.-M. José-Román, y R.-T. Ana-Claudia, "DISEÑO DE SISTEMA DE MONITOREO INTELIGENTE EN INVERNADERO DE ESQUEJE DE STEVIA REBAUDIANA MORITA II", vol. 44, 2022.
- [12] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 121, núm. 12, pp. 1585–1588, dic. 1974, doi: 10.1049/piee.1974.0328.
- [13] A. Yunan y M. Ali, "Study and Implementation of the Fuzzy Mamdani and Sugeno Methods in Decision Making on Selection of Outstanding Students at the South Aceh Polytechnic", Jurnal Inotera, vol. 5, núm. 2, Art. núm. 2, nov. 2020, doi: 10.31572/inotera.Vol5.Iss2.2020.ID127.
- [14] T. Takagi y M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-15, núm. 1, pp. 116–132, ene. 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.

- [15] G. Shahana, P. Ezhilarasi, y S. R. Kannan, "Sugeno Fuzzy Logic-Based Data Agglomeration Model for Smart Aquaculture Development", *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, vol. 72, núm. 1, Art. núm. 1, ene. 2023.
- [16] F. Cavallaro, "A Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System for Developing a Sustainability Index of Biomass", *Sustainability*, vol. 7, núm. 9, Art. núm. 9, sep. 2015, doi: 10.3390/su70912359.
- [17] K. Mengel y E. A. Kirkby, *Principios de nutrición vegetal*. Basilea, Suiza, International Potash Institute, 2000.
- [18] O. F. de Lima Filho, E. Malavolta, J. O. A. de Sena, y J. W. P. Carneiro, "ABSORÇÃO E ACUMULAÇÃO DE NUTRIENTES EM ESTÉVIA *Stevia rebaudiana* (Bert.) Berton: I. MACRONUTRIENTES", *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, vol. 54, pp. 14–22, ene. 1997, doi: 10.1590/S0103-90161997000100003.
- [19] INEGI, "Aspectos Geográficos Colima 2021", Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2021.
- [20] R. Z. Lezama, A. V. Hernández, y I. M. Márquez, "Aplicación de N-P-K para el establecimiento de *Stevia rebaudiana* Berton en suelos del centro de Veracruz", *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, vol. 2, núm. 1, pp. 19–24, jul. 2014, doi: 10.47808/revistabioagro.v2i1.240.
- [21] M. Youssef et al., "Exogenously applied nitrogenous fertilizers and effective microorganisms improve plant growth of stevia (*Stevia rebaudiana* Berton) and soil fertility", *AMB Express*, vol. 11, sep. 2021, doi: 10.1186/s13568-021-01292-8.
- [22] K. Das, R. Dang, y S. Thippenahalli, "Influence of bio-fertilizers on the availability of nutrients (N, P and K) in soil in relation to growth and yield of *Stevia rebaudiana* grown in South India", *International Journal of Applied Research in Natural Products*, vol. 1, mar. 2008.
- [23] A. Flores González, "Morfología y contenido de glucósidos de *Stevia rebaudiana* Berton y su relación con las condiciones edafo-climáticas y de manejo del cultivo.", *COLPOS*, jun. 2019.
- [24] O. F. de Lima Filho y E. Malavolta, "SINTOMAS DE DESORDENS NUTRICIONAIS EM ESTÉVIA *Stevia rebaudiana* (Bert.) Berton", *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, vol. 54, pp. 53–61, ene. 1997, doi: 10.1590/S0103-90161997000100008.
- [25] "Fuzzy Logic Toolbox Documentation". https://www.mathworks.com/help/fuzzy/index.html?s_tid=CRUX_lftnav (consultado el 20 de junio de 2023).