

## Fuzzy System for the Recommendation of Fertilization Plans in Dairy Farming

Giraldo Plaza, Jorge E.; Londoño Franco, Luis F.; Pérez Buelvas, Carlos A.; Álvarez Albanés, Eddie Y.

**Jorge E. Giraldo Plaza**

jegiraldo@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid,  
Colombia

**Luis F. Londoño Franco**

lflondono@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid,  
Colombia

**Carlos A. Pérez Buelvas**

carlosperez@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid,  
Colombia

**Eddie Y. Álvarez Albanés**

eddie\_alvarez86103@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid,  
Colombia

### Revista Ingenierías USBMed

Universidad de San Buenaventura, Colombia

ISSN-e: 2027-5846

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 1, 2023

ingenierias.usbmed@usb.edu.co

Recepción: 26 Julio 2022

Revisado: 29 Septiembre 2022

Aprobación: 10 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/536/5364250002/>

DOI: <https://doi.org/10.21500/20275846.6030>

**Resumen:** Los planes de fertilización para suelos y praderas consisten en establecimiento de factores fisicoquímicos que mejoran las características del suelo. En este artículo se presenta el diseño de un sistema difuso para la recomendación de planes de fertilización. Inicialmente, se realiza una caracterización de las variables para una fertilización precisa de suelos, determinando aquellas que generan mayor afectación a partir de la correlación presente entre ellas. Luego, se procede a definir los conjuntos difusos de entrada y salida, así como las funciones de pertenencia y variables lingüísticas en función de rangos ideales en producciones baja, media y alta acorde a la extracción de macronutrientes. Como resultado principal se obtiene un esquema general de un sistema de recomendación inteligente basada en lógica difusa, lo que evidencia que el uso de tecnologías propias de la industria 4.0 tiene potencial de aplicaciones para el control y gestión en el campo lechero.

**Palabras clave:** Ganadería lechera, sistemas difusos, plan de fertilización, recomendación.

**Abstract:** Fertilization plans for soils and grasslands consist of establishing physicochemical factors that improve its characteristics. This paper aims the fuzzy recommendation system design for fertilization plans. Initially, a characterization of the variables for a precise soil fertilization is made, determining those that generate greater affectation from the correlation between them. Thus, we define the input and output of fuzzy sets, as well as the membership functions and linguistic variables about ideal ranges in low, medium, and high productions according to the extraction of macronutrients. The main result is a general scheme of an intelligent recommendation system based on fuzzy logic, which shows that the use of Industry 4.0 technologies has potential applications for control and management in the dairy farming.

**Keywords:** Dairy Farming, Fuzzy System, Fertilization Plan, Recommendation.

## I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la ganadería lechera se presentan diferentes desafíos a enfrentar que motivan por la generación de ideas innovadoras basadas en tecnologías y su aporte a las diferentes maneras en que se orientan los procesos de producción, cuidado y restablecimiento de suelos [1].

Entre estos desafíos se destaca la necesidad de establecer mejores y más precisas recomendaciones para planes de fertilización mediante el uso de sistemas soportados en las nuevas tecnologías como las habilitadoras de la industria 4.0 como los son la inteligencia artificial, la analítica de datos, la internet de las cosas, la realidad virtual y la automatización robótica de procesos [2].

Por su parte, la fertilidad del suelo es la capacidad que tiene el terreno para darle soporte el crecimiento de las pasturas, con el fin de optimizar su rendimiento, en términos de mejores producciones de leche disminuyendo los costos asociados a los cultivos. Lo anterior, puede potenciarse mediante el uso de fertilizantes, ya sean orgánicos, inorgánicos o mixtos. De esta manera, se busca una mejor nutrición para los suelos a partir de la modificación de las características fisicoquímicas del mismo [3].

La informática y las telecomunicaciones son áreas de estudio que han venido aportando soluciones importantes para la fertilización, el tratamiento, la recomendación y la predicción de valores relacionados con la fertilización de suelos. A modo de ejemplo, en [4] se desarrolla un sistema inteligente para la predicción de propiedades de suelo a través de datos obtenidos por radiofrecuencia dirigida hacia el suelo.

Donde se encuentra que arquitecturas de este tipo (basada en componentes de hardware, software y telecomunicaciones) son apropiadas para sistemas de tipo IoT (*Internet of things*); tal es el caso de la solución presentada en [5], que a partir de un sensor de pH se envían los datos a un servidor web y este a su vez a una aplicación móvil para garantizar una correcta recomendación basada en los niveles de pH detectados.

Específicamente, los sistemas de recomendación facilitan la experiencia de los administradores de las fincas, ya que ofrecen información precisa para la toma de decisiones. Tal es el caso del sistema expuesto en [6] donde se presenta SyrAgri, un sistema de recomendación agrícola para la ciudad de Mali, Francia, el cual entrega información sobre cultivos y buenas prácticas de cultivo basado en información como: terreno, ciclo de vida del cultivo, tipo de suelo y temporadas de cosechas.

Un proyecto similar se presenta en [7], en este caso para el país de la India, a diferencia del anterior, las recomendaciones se basan en información para los granjeros en relación con las tendencias en normatividad, convocatorias y beneficios gubernamentales que ellos pueden acceder, de esta manera se ayuda a la profesionalización de la labor del campo.

La inteligencia artificial, por su parte, también ha aportado diversas soluciones relacionadas con la fertilización y tratamiento de suelos y pasturas; en [8] se presenta un sistema de recomendación de fertilizantes basado en técnicas de aprendizaje de máquina, no obstante, la información procesada es exclusivamente relacionada al pH encontrado en el suelo y su aporte se especifica en ese sentido en particular.

Específicamente, la técnica de lógica difusa, la cual busca generar valores aproximados de las salidas en los sistemas, es una de las que más aporta al área de la fertilización precisa de suelos y praderas. Contrario a los sistemas de aprendizaje, los sistemas difusos no dependen de un conjunto de datos (*dataset*) para realizar sus razonamientos [9].

Cabe señalar que la obtención de datos en sistemas de fertilización no es lo más cómodo posible, ya que los planes de fertilización se realizan durante tiempo separados, lo que dificulta la generación de gran cantidad de datos [10].

En ese orden de ideas, un proyecto que aplica la lógica difusa para la fertilización de suelos es el que se presenta en [11], donde se enfoca en el macronutriente nitrógeno y las condiciones específicas del ganadero, para generar una salida relacionada con la coherencia del uso del nitrógeno y el predio.

Un trabajo similar es el presentado en [12], el cual es motivación para este documento, ya que tiene en cuenta valores ideales de acuerdo con el tipo de suelo en el cual se realiza el cultivo. De esta manera, a partir

de reglas de razonamiento experto difuso, determinan el nivel de precisión de los nutrientes aplicados en el plan de fertilización.

Este enfoque mencionado, de valores ideales respecto a tipo de suelo, es la tendencia en soluciones basadas en lógica difusa (y es el enfoque optado para esta investigación), como por ejemplo en [13] y [14] se desarrollan sistemas difusos, teniendo en cuenta valores ideales, que indiquen la proximidad con valores de características propias de los suelos.

Pese a los avances en el área de la informática y el agro, se carece de soluciones que permitan generar de manera automática y eficiente planes de fertilización de suelos y praderas para ganaderías de leche. Es por ello por lo que en este documento se establece un esquema general de un sistema de recomendación inteligente basado en lógica difusa para la mitigación de la situación actual en el contexto de la ganadería lechera en Colombia.

Los sistemas de fertilización pueden ser potenciados con el uso de sistemas difusos. Un sistema difuso cuenta con una lógica interna que le brinda la posibilidad de establecer unas funciones de pertenencia, reglas de inferencia sólidas y expresiones condicionales para el control automatizado [15]. Es por ello que la relación de un sistema difuso y la generación de planes de fertilización se convierte en un área abierta en investigación que debe ser potenciada.

Para iniciar este trabajo se parte de un diagnóstico de base o línea cero para continuar con una caracterización de las variables para una fertilización precisa de suelos y luego especificar aquellas que generan mayor afectación a partir de la correlación presente entre ellas. No obstante, la caracterización de las variables de fertilización del suelo por sí misma es un proceso complejo y dispendioso en la que no solo están las variables estructurales del propio suelo, sino que también se tienen en cuenta las fisicoquímicas macro y micronutrientes, derivando en una importante variedad y calidad de dichas variables.

Por tanto, para definir y establecer las variables de mayor impacto o relevancia en la fertilización precisa de suelo que permitan un desarrollo óptimo de las pasturas que requiere el ganado de leche, se acude a fuentes secundarias complementado con la opinión de un grupo de expertos en la temática.

Una vez establecidas las variables se procede a definir los conjuntos difusos de entrada y salida, así como las funciones de pertenencia y variables lingüísticas. A seguir, se define un conjunto de reglas difusas que permiten la generación de recomendaciones precisas en función de los rangos ideales en producciones baja, media y alta acorde a la extracción de macronutrientes del suelo y que se vean reflejados en las pasturas.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera: la sección ii presenta la caracterización de las variables efectuada a partir de a partir del análisis de campo efectuado en cinco fincas del norte de Antioquia y la respectiva correlación de estas variables. En la sección iii se describe el diseño del sistema difuso para la fertilización. En la sección iv se realiza una validación del sistema difuso diseñado y en la sección v se presentan los principales resultados y conclusiones. Por último, en vi se presentan las referencias bibliográficas.

## II. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES

Con base en un trabajo de caracterización anterior, disponible en [16], se presenta una caracterización detallada de las principales variables influyentes que son evaluadas y establecidas para tener en cuenta en una fertilización precisa de suelos, destacando entre estas:

Tipo de ganado lechero: Jersey y Holstein, por ser las dos razas más predominantes en la región e incluso en el país para lechería especializada.

Porcentaje alimenticio: Hace referencia a la oferta para el animal o dieta [70 % pasto Kykuyo (*Pennisetum clandestinum*) / Ryegrass (*Lolium multiflorum*) y 30 % centrado alimento balanceado comercial].

Suelos parcelados: Relacionado con los potreros de la finca para distribución de praderas Kykuyo y Ryegrass. Periodos de ocupación: Asociado a los periodos de descanso de praderas. v) cantidad de proteína bruta, nitrógeno no proteico [N\*].

Digestibilidad de las pasturas: Hace referencia al contenido celular y al rendimiento de biomasa en los pastos nativos.

Componentes de suelo: Fósforo [P], Potasio [K\*\*], magnesio [Mg] y calcio [Ca].

Los elementos antes descritos son producto de un reporte de los estudios de campo realizados en cinco fincas del norte de Antioquia. Los municipios donde se encuentran las fincas visitadas son Bello, San Pedro de los Milagros, Entreríos y Santa Rosa de Osos.

La Figura 1 presenta, delimitada en una línea roja, la ubicación geográfica de la subregión norte de Antioquia en las cuales están ubicadas las fincas visitadas. Es importante señalar que esta ubicación del departamento de Antioquia es conocida también como la Ruta Lechera.

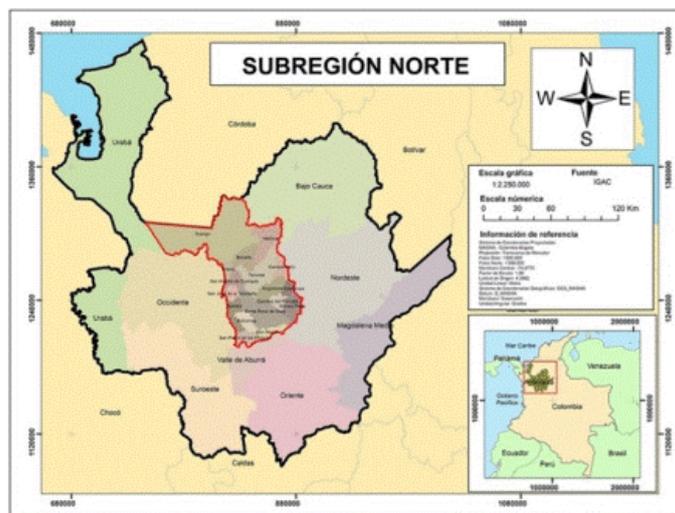


FIGURA 1.  
Subregión norte del departamento de Antioquia.  
<https://ctpantioquia.co/subregion-norte/>

La Tabla 1 consolida información relacionada con las fincas visitadas y sus características espaciales, estas son seleccionadas por su alta producción de leche y sus constantes procesos de fertilización de suelos, adicionalmente, son fincas pares del equipo de investigación.

TABLA 1.  
Referentes espaciales de las fincas visitadas

| Finca       | Ubicación/Municipio       | Altura [msnm] |
|-------------|---------------------------|---------------|
| Pilarica    | Bello                     | 2563          |
| La Sierra   | San Pedro de los Milagros | 2669          |
| Los Molinos | Santa Rosa de Osos        | 2723          |
| La Florida  | Entreríos                 | 2473          |
| El Anheló   | Entreríos                 | 2436          |

Sumado a lo anterior, en dichas fincas se levanta información referente a sus macro y micronutrientes y se obtienen datos relacionados con la ubicación geográfica, el área, aforo (es decir kilogramos de pasto por metro cuadrado) y el uso de los terrenos. Frente al mismo se lleva a cabo una caracterización de los componentes macro del suelo: fósforo [P], potasio [K\*\*], magnesio [Mg] y calcio [Ca].

El procedimiento que se realiza para la captura de datos es la toma de muestras de suelo y de pradera para su posterior análisis químico y bromatológico. La Figura 2 se presenta una de las evidencias en la finca La Florida, en Entrerriós.



FIGURA 2.  
Toma de muestras en finca La Florida (Entrerriós Antioquia).

Como estrategia para el procesamiento de los datos y alienación con las variables se procede a compararlas con los valores ideales respecto a sus macronutrientes. Es así como a partir de dichos valores ideales se busca que por medio de reglas de razonamiento sea posible determinar la precisión de los macronutrientes faltantes que busquen mejores resultados en posteriores estudios que se realicen.

La Tabla 2 presenta los resultados ideales para los componentes del suelo con relación a la producción baja, media y alta del tipo de pasto Kikuyo, el cual es el más predominante y utilizado en las fincas visitadas. Esta información es de vital importancia para definir el conjunto de reglas difusas que permiten la generación de recomendaciones precisas acorde a la extracción de macronutrientes ofertados en la dieta de los animales de producción de leche.

Un posible sistema de recomendación debe tener guardado los valores o una base de datos de las características del suelo a partir de un análisis previo y a partir de estos, brindar sugerencias para ofrecer una fertilización óptima con relación a los niveles adecuados o mejor ideales de fertilización precisa.

El sistema de recomendación establece que es necesario articular la combinación de parcelaciones con los dos tipos de praderas (Kikuyo y Ryegrass) así como también articular en la variedad del ganado producciones de leche Jersey y Holstein en combinaciones estables que permitan una alta calidad y cantidad para robustecer el análisis.

Si bien el análisis previo evidencia tres componentes en alta importancia para el suelo (potasio, nitrógeno y fósforo), el análisis de correlaciones presenta la necesidad de articular el magnesio y el calcio como dos variables de alta influencia debido a su atribución en el acolchonamiento [17] de los suelos.

Acorde a lo anterior y a partir del análisis de suelo efectuado en las fincas, se establecen correlaciones empleando el lenguaje de programación de Python obteniendo la correlación presentada en la Figura 3.

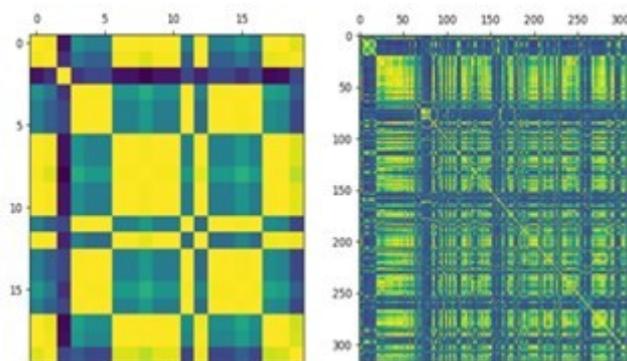


FIGURA 3. Correlaciones a partir del análisis de suelo en fincas visitadas.

Después del análisis de datos y realizar varias iteraciones, se determina que no es posible generar dicha recomendación sin establecer el conjunto de datos conocidos como ratings de una forma no sintética, es decir, datos que se acerquen más a los sucesos reales y no a las suposiciones generadas.

Debido al obstáculo anteriormente presentado se define cambiar de estrategia; se procede a realizar la creación de un sistema difuso que permita brindar la recomendación por medio de variables de entrada que serían fuzificadas para luego pasar por una serie de reglas que determinan los valores equivalentes fuzificados y seguir un proceso de desfuzificación que genere datos de salida y ayude a determinar las correctas recomendaciones para el suelo.

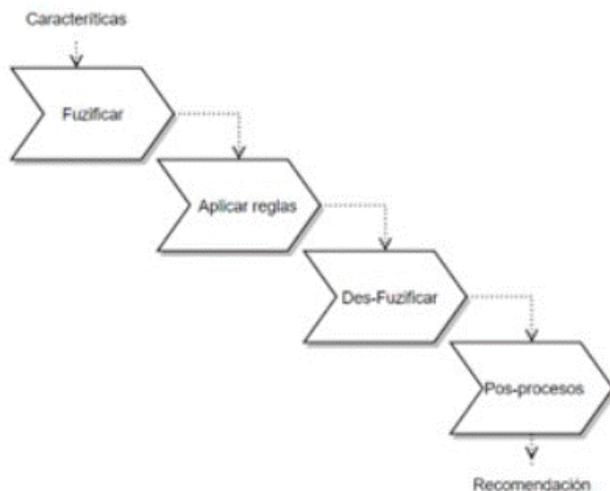


FIGURA 4. Metodología para diseño de sistema difuso para recomendación de fertilización de suelos. actual estudio

TABLA 2. Datos de extracción de macronutrientes en Kikuyo

| Producción T/HA/AÑO | N   | P  | K   | Ca          | Mg              | k               |
|---------------------|-----|----|-----|-------------|-----------------|-----------------|
| Baja 4.5            | 125 | 27 | 133 | 3 mg/Kg     | 1.5 mg/Kg       | 0.2 mg/Kg       |
| Media 7.5           | 208 | 45 | 222 | 3 y 6 mg/Kg | 1.5 y 2.5 mg/Kg | 0.2 y 0.4 mg/Kg |
| Alta 14             | 389 | 83 | 415 | >6          | >2.5            | >0.4            |

Datos literatura y grupo de expertos

En la Figura 4 se presenta un flujograma del proceso, o camino a seguir, articulando en sus variables de entrada los macronutrientes obtenidos mediante un análisis previo de suelo y tomando como punto comparativo los valores ideales establecidos en la Tabla 1.

Acorde a lo anterior, se establece que los valores de entrada para los conjuntos difusos de entrada son los macronutrientes, así: calcio, magnesio y potasio y de salida se determina (según los rangos) los niveles que establecen la recomendación de un tipo de fertilizante con nutrientes representada por el abono, que suplan la deficiencia expuesta en el estudio de suelos.

Los sistemas difusos son importantes dado que no requieren de un modelo matemático, pero pese a esto son altamente aplicables en sistemas de control por su adaptabilidad a sistemas de variabilidad compleja y para la toma de decisiones con criterios sólidos de inferencia [18]. El grado de similitud que tiene un elemento respecto a un conjunto difuso se calcula a partir de una función de pertenencia.

Si bien en los sistemas difusos se controlan las variables de salida, todo el control del sistema se maneja mediante funciones de membresía y variables lingüísticas en conjunto con rangos lo cual permite una inferencia y determinación considerable en función de la variable de salida.

En la Tabla 3 se presentan las variables lingüísticas, sus respectivos rangos, etiquetas y funciones de pertenencia. Como conjuntos de entrada se tiene al calcio, magnesio y potasio, y como conjunto de salida se define a la cantidad de fertilizante o abono necesario para la fertilización.

TABLA 3.  
Definición de variables y rangos difusos

| Variable y rango           | Etiqueta y rango    | Función     |
|----------------------------|---------------------|-------------|
| Calcio [0,6) (Entrada)     | Bajo [0,3]          | Trapezoidal |
|                            | Medio [2,7]         | Trapezoidal |
|                            | Alto [ >6]          | Trapezoidal |
| Magnesio [0,2.5) (Entrada) | Bajo [0,1.5]        | Trapezoidal |
|                            | Medio [1,3]         | Trapezoidal |
|                            | Alto [ >2]          | Trapezoidal |
| Potasio [0,0.4) (Entrada)  | Bajo [0,0.2]        | Trapezoidal |
|                            | Medio [0.1,0.4]     | Trapezoidal |
|                            | Alto [ >0.3]        | Trapezoidal |
| Abono [0,1.0] (Salida)     | Poco [0,0.4]        | Triangular  |
|                            | Normal [0.2,0.9]    | Triangular  |
|                            | Abundante [0.7,1.0] | Triangular  |

actual estudio

En la Figura 5 se presenta el conjunto de entrada de calcio, el cual tiene tres etiquetas: Bajo, Medio y Alto.

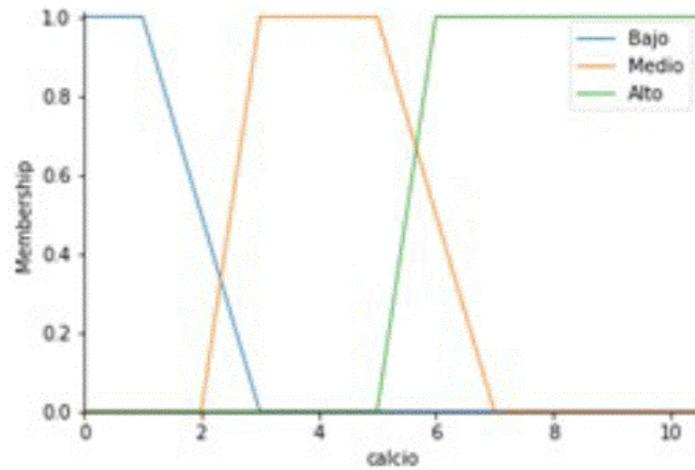


FIGURA 5.  
Conjunto difuso de entrada – Calcio.  
actual estudio

También en la Figura 6 se presenta el conjunto de entrada de magnesio y se compone de tres etiquetas: Bajo, Medio y Alto.

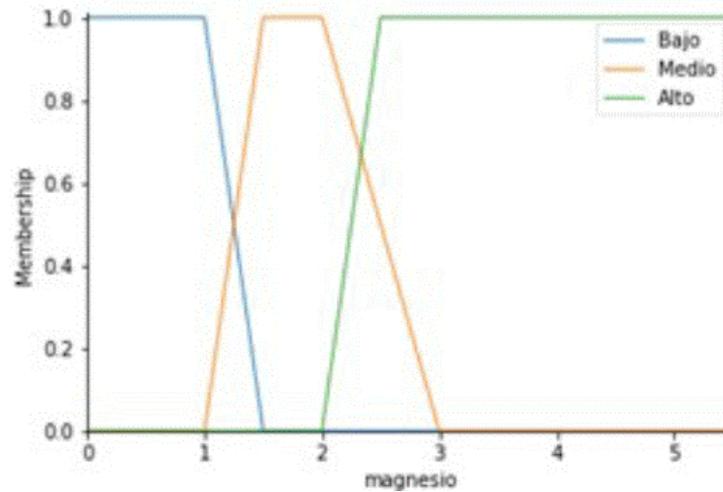


FIGURA 6.  
Conjunto difuso de entrada – Magnesio.  
actual estudio

Por su parte, en la Figura 7 se presenta la gráfica del conjunto en entrada de potasio. Se tienen tres etiquetas: Bajo, Medio y Alto.

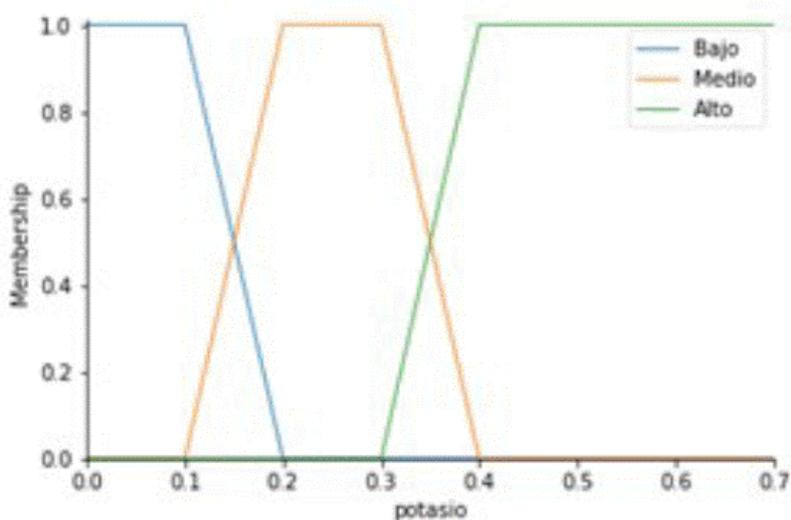


FIGURA 7.  
Conjunto difuso de entrada – Potasio.  
actual estudio

Por último, se define el conjunto de salida “abono” el cual se interpreta como la cantidad de abono a aplicar de acuerdo con los niveles de los macronutrientes necesarios o requeridos a partir del análisis de suelo realizado. En la Figura 8 se presenta el conjunto de salida.

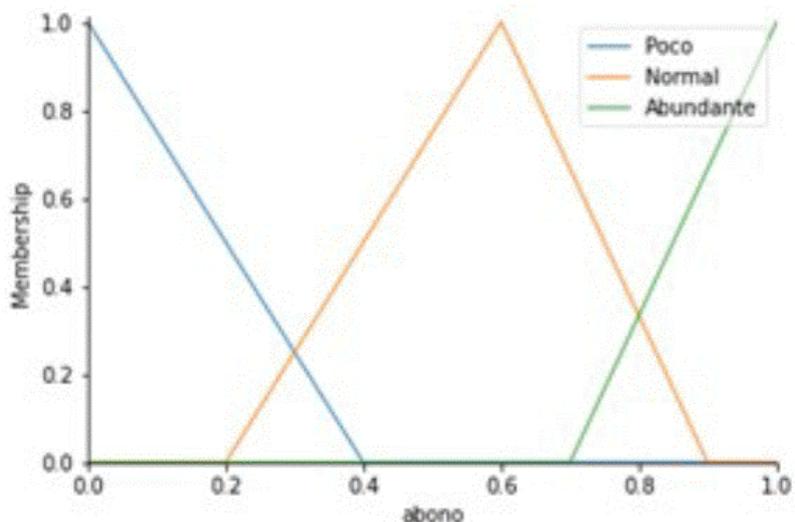


FIGURA 8.  
Conjunto difuso de salida: cantidad de fertilizante o abono.  
actual estudio

Posteriormente, se define un total de 84 reglas difusas, las cuales permiten definir con precisión la cantidad de abono a aplicar de acuerdo con lo identificado. A continuación, se presentan tres de ellas.

- Regla 1:  $(C(\text{Bajo}) \wedge Mg(\text{Bajo}) \wedge K(\text{Bajo})) \rightarrow Ab(\text{Abundante})$ .
- Regla 2:  $(C(\text{Medio}) \wedge Mg(\text{Medio}) \wedge K(\text{Medio})) \rightarrow Ab(\text{Normal})$ .
- Regla 3:  $(C(\text{Alto}) \wedge Mg(\text{Alto}) \wedge K(\text{Alto})) \rightarrow Ab(\text{Poco})$ .

### III. VALIDACIÓN

La implementación del sistema difuso se realiza a modo de prototipo en el lenguaje de programación de Python mediante la plataforma Google-Colab. También se utiliza la librería de Python scikit-fuzzy.

Para la validación del sistema de recomendación se definen casos de estudio dentro de las fincas visitadas y teniendo en cuenta los valores ideales definidos.

En la Tabla 4 se presentan los casos de prueba definidos con su respectiva salida de abono. Allí se puede apreciar que, ante valores iguales como, por ejemplo, el valor de calcio (6.2) en el caso de prueba #2 y #3, se genera una salida diferente. Del mismo modo se puede apreciar el valor del magnesio (1.2) en el caso de prueba #1 y #2.

TABLA 4.  
Casos de prueba

| Caso | C   | Mg  | P    | Abono |
|------|-----|-----|------|-------|
| 1    | 2.1 | 1.2 | 0.15 | 0.74  |
| 2    | 6.2 | 1.2 | 0.22 | 0.55  |
| 3    | 6.2 | 4.1 | 0.38 | 0.13  |

actual estudio

En la Figura 9 se presenta el conjunto conclusión para el caso de prueba #1, donde la salida es 0.74, coherente con las reglas difusas definidas para este documento. Con base en las pruebas realizadas al sistema de recomendación se obtiene una precisión del 95 % de acuerdo con la opinión de expertos (administradores de las fincas).

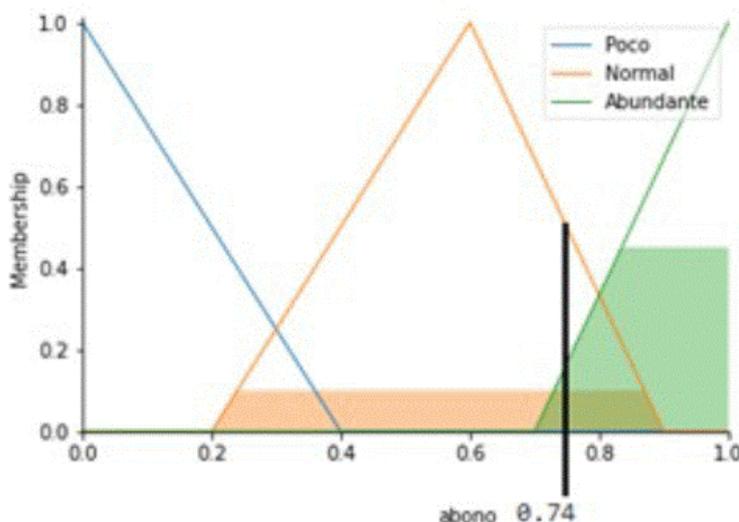


FIGURA 9.  
Conjunto conclusión caso de prueba #1.

Es importante señalar que a partir del sistema construido y teniendo una plataforma de captura y gestión de datos (dataset) es posible generar mapas de fertilidad para la zona en cuestión y para el departamento en general. Dichos mapas pueden ser construido inicialmente a partir de polígonos básicos en escala de grises, como se observa en la Figura 10. Con ellos se puede desarrollar sistemas estratégicos de usos de suelo.

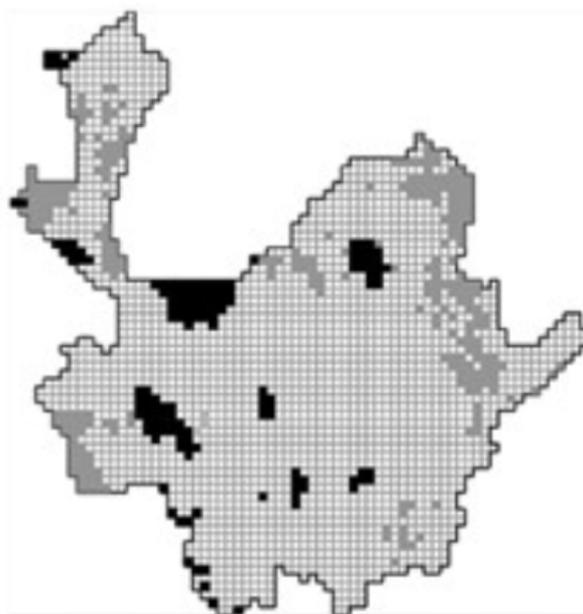


FIGURA 10.  
Posibilidad de generación de mapas de fertilidad con estudio actual.  
Tomado de [19]

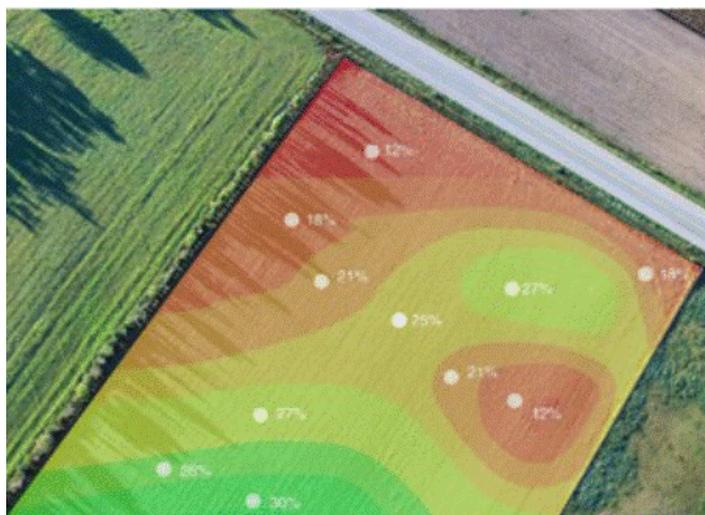


FIGURA 11.  
Posibilidad de generación de mapas de fertilidad en lotes de una finca.  
Tomado de <https://agqlabs.cl/2022/04/20/mapas-fertilidad-suelos/>

Sumado a lo anterior, y a partir del uso de tecnologías como los drones y las imágenes satelitales, es posible que una vez se tomen muestras zonificadas en potreros específicos de una finca, se pueda llegar a imágenes de color que representen la fertilidad del suelo y llegar a una precisión apropiada. En la Figura 11 se observa un ejemplo de mapa que podría apoyar las decisiones en cuanto a la fertilización.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una aproximación basada en lógica difusa para la recomendación precisa de suelos y praderas en ganadería de leche en fincas del norte del departamento de Antioquia. Como conclusión, se

evidencia que el uso de tecnologías de vanguardia en articulación con herramientas del agro contribuye a la toma de decisiones y al crecimiento del sector, necesario para el desarrollo de un país más aún en el sector lácteo.

El modelado de algoritmos robustos en programa Python es una herramienta que permite predecir con un adecuado nivel de confiabilidad las interacciones de los requisitos de los nutrientes para fertilización precisa del suelo, para ser aplicados en los sistemas suelo

– pasto – animal y obtener mejores resultados de productividad en vacas sometidas a alta producción de leche. El prototipo definido presenta fortalezas y oportunidades que deben ser aprovechadas. No obstante, la propuesta carece de algunas características y funciones que pueden ser mejoradas y desarrolladas en trabajos futuros, como por ejemplo el diseño de una herramienta de software móvil y portátil que puede ser empleada directamente y en tiempo real en las fincas.

Los sistemas difusos tienen varias aplicaciones en el área de la agronomía y potenciados con tecnologías de la industria 4.0, vislumbran grandes oportunidades para el trabajo en temas abiertos de investigación.

## V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por sus aportes y contribuir en el desarrollo del proyecto de investigación “Construcción de un prototipo de software para la recomendación técnica en sistemas de fertilización de suelos y praderas en ganadería de leche”. Financiado a través de la convocatoria interna del 2019. De igual forma, se agradece la participación de los estudiantes co-investigadores Yury Alexandra Preciada Jaramillo, Christian Casallas Benítez y Jonatan Porras Parra. Finalmente, se agradece a la profesional Jesica Tapias Vásquez por sus servicios en la gestión de los datos e información.

## REFERENCIAS

- [1] J. S. Torres Rozo, “Protocolo sobre la atención del puerperio en el ganado bovino del complejo agroindustrial de Tizayuca en su estado actual, Hidalgo, México,” Doctoral dissertation, Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias de la Salud, Medicina Veterinaria y Zootecnia, Bucaramanga, 2020.
- [2] Y. Y. P. Rozo, M. C. A. Adame y O. H. Castorena, “Competitividad y sustentabilidad en sistemas ganaderos del piedemonte amazónico colombiano,” *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, vol. 15, n.o 15, 2021.
- [3] IAEA, (7 de ene. de 2020). Gestión de la tierra y el agua. Organismo internacional de energía atómica, alimentación y agricultura [Online]. Available: <https://www.iaea.org/es/temas/mejora-de-la-fertilidad-del-suelo#:text=La%20fertilidad%20del%20suelo%20es,inorg%C3%A1nicos%20que%20nutran%20el%20suelo>
- [4] R. Martínez-España, A. Bueno-Crespo, J. Soto, L. J. Janik y J. M. Soriano-Disla, “Developing an intelligent system for the prediction of soil properties with a portable mid-infrared instrument,” *Biosystems Engineering*, vol. 177, págs. 101-108, 2019.
- [5] K. Bodake, R. Ghate, H. Doshi, P. Jadhav y B. Tarle, “Soil based fertilizer recommendation system using Internet of Things,” *MVP J. Eng. Sci*, vol. 1, págs. 13-19, 2018.
- [6] J. Konaté, A. G. Diarra, S. O. Diarra y A. Diallo, “Syragri: A recommender system for agriculture in Mali,” *Information*, vol. 11, n.o 12, pág. 561, 2020.
- [7] S. Jaiswal, T. Kharade, N. Kotambe y S. Shinde, “Collaborative recommendation system for agriculture sector,” en *ITM web of conferences*, vol. 32, EDP Sciences, 2020, pág. 03 034.
- [8] M. Jadhav, N. Kolambe, S. Jain y S. Chaudhari, “Farming made easy using machine learning,” en *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, IEEE, mayo de 2021, págs. 1-5.
- [9] K. Mittal, A. Jain, K. S. Vaisla, O. Castillo y J. Kacprzyk, “A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 95, pág. 103 916, 2020.

- [10] R. A. Peña Vanegas, Manual técnico para la interpretación de análisis de suelos y fertilización de cultivos (No. 86). Universidad de la Salle, 2020.
- [11] A. Heiss, D. S. Paraforos, G. M. Sharipov y H. W. Griepentrog, "Modelling and Simulation of a Fuzzy System for Site-Specific Nitrogen Fertilization," IFAC-PapersOnLine, vol. 53, n.o 2, págs. 15 790-15 795, 2020.
- [12] A. M. Rajeswari, A. S. Anushiya, K. S. A. Fathima, S. S. Priya y N. Mathumithaa, "Fuzzy Decision Support System for Recommendation of Crop Cultivation based on Soil Type," en 2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)(48184), IEEE, jun. de 2020, págs. 768-773.
- [13] J. J. I. Haban, J. C. V. Puno, A. A. Bandala, R. K. Billones, E. P. Dadios y E. Sybingco, "Soil Fertilizer Recommendation System using Fuzzy Logic," en 2020 IEEE REGION 10 CONFERENCE (TENCON), IEEE, nov. de 2020, págs. 1171-1175.
- [14] A. De y S. Singh, "Analysis of fuzzy applications in the agri-supply chain: A literature review," Journal of Cleaner Production, vol. 283, pág. 124 577, 2021.
- [15] S. K. R. y R. M. R, "Técnicas modernas en automática. Control mediante lógica difusa," Universidad Técnica Federico Santa María, 2002. dirección: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>
- [16] E. Giraldo, "Caracterización de variables para una fertilización precisa de suelos y praderas en ganadería de leche, un estudio técnico de campo para la sugerencia de un sistema de recomendación," Proyecto en curso, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Unpublished. 2022.
- [17] M. C. J, Evaluación de la Adopción Tecnológica de los Sistemas Silvopastoriles en el Municipio San Pedro de los Milagros Antioquia, Recuperado el 28 enero, 2021. dirección: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/39194/cjmontoyav.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- [18] E. J., A. M., M. F. y B. Alejandra, "Diseño de un sistema difuso para valoración de aportes en sistemas colaborativos," Rev. ing. univ. Medellín, vol. 11, n.o 20, 2012.
- [19] E. Álvarez Dávila y A. Cogollo Pachecho, "¿Qué tanta Biodiversidad se Conserva en el Sistema de Áreas Protegidas de Antioquia," Eolo, vol. 16, págs. 1-7, 2009.