

**Estudio Del Potencial Fertilizante De Un Compuesto Orgánico Mineral, Microsienita,
Lodolita Más Biomasa Y Su Aplicación Piloto En Cultivo De Frijol**

Bibiana Milena Herrera Agudelo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magister en Química

Director

Luz Yolanda Vargas Fiallo

Msc. Química

Codirector

Luis Carlos Mantilla Figueroa

PhD. Petrología y Geoquímica de Procesos Ígneos y Metamorfismo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Maestría en Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis hijos, Juan Sebastián y Salomé, quienes son mi inspiración y la razón de mis esfuerzos. Su amor y alegría me impulsan a seguir adelante cada día.

A mis sobrinos, Mateo y Micaela, cuya ternura y energía me motivan, incluso en la distancia.

A mi madre, por su apoyo incondicional, que ha sido mi mayor fortaleza.

A mi padre, quien me enseñó que el éxito se alcanza con trabajo y tenacidad.

A mis hermanos, por sus consejos y ejemplo, que han sido un pilar en mi crecimiento profesional.

A mi esposo, por su cariño, paciencia y aliento inquebrantable en cada paso de este camino. Con todo mi amor y gratitud, les dedico este logro

Agradecimientos

Agradezco a Dios por todas las oportunidades que me ha concedido y por ser mi guía constante a lo largo de este proceso. A mi estimada profesora Yolanda y a mis compañeros del Laboratorio Químico de Consultas Industriales y del Laboratorio de Químico de Suelos, gracias por su apoyo incondicional, que fue clave para alcanzar este gran logro. A Natalia, por sus valiosas enseñanzas y por regalarme una amistad firme y sincera. A mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería Química, especialmente a Don Eduardo, por su cariño y su invaluable colaboración. Y a todos aquellos que creyeron en mí —profesores, amigos y familia—, gracias por su respaldo y confianza, pilares fundamentales en esta travesía.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Marco Referencial.....	16
1.1. Textura, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico en los suelos.	16
1.2. El pH en los suelos.....	17
1.3. Importancia de los suelos en la sociedad colombiana	18
1.4. Fertilizantes.....	18
1.4.1. Frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	20
1.5. Relación entre el nitrógeno y el potasio.....	21
2. Objetivos.....	22
2.1. Objetivo general.....	22
2.2. Objetivos específicos	22
3. Metodología	23
4. Resultados y análisis de resultados	30
4.1. Resultados de suelo sin fertilizar	31
4.2. Suelos fertilizados con las formulaciones propuestas, durante el crecimiento del cultivo.	35
4.2.1. Elementos mayores y menores en las cinco ERAS durante los seis (6) muestreos..	37
4.2.2. Efecto de las formulaciones, fertilizante comercial y comportamiento del suelo sin fertilizar (testigo).	45

4.2.3.	Análisis morfológico y foliar de las plantas de las 5 ERAS durante los seis (6) muestreos	46
4.3.	Análisis estadístico para la optimización de la formulación del fertilizante No. 1...	51
4.4.	Análisis de la relación entre las formas de nitrógeno y la absorción de potasio	52
4.5.	Análisis adicionales de metales pesados	55
5.	Conclusiones	57
6.	Recomendaciones	59
	Referencias Bibliográficas	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Requerimientos de nutrientes en la fisiología de las plantas del cultivo de frijol.</i>	20
Tabla 2 <i>Análisis fisicoquímicos de los productos primarios que componen el fertilizante</i>	25
Tabla 3 <i>Análisis fisicoquímicos realizados a los suelos, con sus respectivas metodologías</i>	26
Tabla 4 <i>Formulaciones de fertilizantes</i>	27
Tabla 5. <i>Resultados de los análisis fisicoquímicos más relevantes de los precursores de los fertilizantes propuestos.</i>	30
Tabla 6. <i>Resultados de análisis fisicoquímicos de los fertilizantes en el muestro número 1</i>	35
Tabla 7 <i>Número de vainas de cada ERA en cada muestreo</i>	49
Tabla 8. <i>Contenido de metales pesados presentes en el sexto muestreo de la ERA 1, fertilizada con la formulación No. 1</i>	56

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Etapas experimentales.	23
Figura 2 Precursores para la composición del fertilizante.	24
Figura 3. Proceso de sembrado	28
Figura 4 Germinación del frijol	29
Figura 5. Disponibilidad de los nutrientes esenciales para la planta según el valor del pH. Tomado de Soil Fertility and Plant Nutrition. doi:10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7	32
Figura 6. Elementos mayores del suelo sin fertilizar inicial	34
Figura 7 Elementos menores presentes en el suelo sin fertilizar	35
Figura 8 pH de las 5 ERAS en los 6 muestreos	37
Figura 9 Porcentaje de nitrógeno total (%N total) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.....	38
Figura 10 Porcentaje de potasio (K) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.....	39
Figura 11 Porcentaje de fósforo en forma de % P ₂ O ₅ total en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.	40
Figura 12 Porcentaje de magnesio en forma de % MgO total en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.	41
Figura 13 Porcentaje de calcio en forma de % CaO total en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.	41
Figura 14 Porcentaje de zinc (Zn) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.	43
Figura 15 Porcentaje de cobre (Cu) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.....	43
Figura 16 Porcentaje de manganeso (Mn) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.....	44

Figura 17 Porcentaje de hierro (Fe) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.....	45
Figura 18 Seguimiento del largo de las plantas de las ERAS en los seis (6) muestreos.	47
Figura 19 Seguimiento del número de hojas de las plantas de las ERAS en los seis (6) muestreos.	48
Figura 20 Seguimiento del número de flores de las plantas de las ERAS en los seis (6) muestreos.	49
Figura 21 Fotografía de una planta de cada ERA en la fase final del cultivo de frijol después de dos meses de siembra. De izquierda a derecha ERAS de la 1 a la 5.	50
Figura 22. Captura de pantalla de RStudio del análisis estadístico de proporciones para la formulación de fertilizante No. 1.....	51
Figura 23. Análisis de correlación entre variables de potasio (%K), nitrógeno nítrico (%N-NO ₃ ⁻) y nitrógeno amoniacal (%N-NH ₄ ⁺).....	53
Figura 24. Relación contenida entre el potasio y el nitrógeno amoniacal.	54
Figura 25. Análisis multivariado.....	55

Glosario

Agricultura: Cultivo de la tierra para la producción de alimentos y otros productos.

Amoniaco: Gas incoloro, de olor característico y soluble en agua, utilizado en fertilizantes.

Biodiversidad: Variedad de especies animales y vegetales en un medio ambiente.

Biomasa: Materia orgánica originada en un proceso biológico, utilizable como fuente de energía.

Catión: Ion con carga eléctrica positiva.

Ciclo de vida: Conjunto de transformaciones por las que pasa un organismo desde su origen hasta su muerte.

Conductividad: Capacidad de un cuerpo para conducir el calor o la electricidad.

Ecosistema: Comunidad de organismos y su entorno físico interactuando como un sistema.

Fertilidad: Capacidad de un suelo para producir cultivos de forma sostenida.

Fertilizante: Sustancia que se aplica al suelo o a las plantas para suministrar nutrientes.

Fotosíntesis: Proceso por el cual las plantas producen materia orgánica a partir de la luz.

Humus: Sustancia orgánica del suelo derivada de la descomposición de residuos vegetales y animales.

Macronutriente: Nutriente requerido por los organismos en grandes cantidades para su metabolismo y crecimiento.

Materia orgánica: Materia de origen biológico que constituye los seres vivos o sus restos y residuos.

Micronutriente: Elemento requerido en pequeñas cantidades por los organismos vivos.

Mineral: Sustancia natural, homogénea, inorgánica, de composición química definida.

Nutriente: Sustancia que nutre y es esencial para el crecimiento de las plantas.

Organismo: Ser vivo, animal o vegetal.

pH: Medida de la acidez o alcalinidad de una disolución.

Plaguicida: Sustancia utilizada para combatir plagas en la agricultura.

Potasa: Compuesto químico que contiene potasio, utilizado como fertilizante.

Raíz: Órgano de las plantas que crece en dirección opuesta al tallo y absorbe nutrientes.

Recurso natural: Bien o servicio proporcionado por la naturaleza sin intervención humana.

Salinidad: Cantidad de sales disueltas en un líquido o suelo.

Sostenibilidad: Calidad de sostenible, especialmente en lo relativo al aprovechamiento de los recursos naturales.

Suelo: Conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal.

Textura: Propiedad física del suelo que depende del tamaño de sus partículas.

Tierra arable: Suelo que puede ser utilizado para la agricultura.

Transpiración: Proceso mediante el cual las plantas liberan vapor de agua a la atmósfera.

Vegetación: Conjunto de plantas de un lugar determinado.

Frijol común (*Phaseolus vulgaris*): Leguminosa originaria de América, importante en la seguridad alimentaria.

Nitrógeno: Elemento esencial para el crecimiento de las plantas, componente de aminoácidos y proteínas.

Potasio: Nutriente esencial para las plantas, importante en la activación enzimática y la osmorregulación.

Fósforo: Nutriente esencial para el crecimiento, floración y desarrollo de frutos.

Calcio: Nutriente secundario importante para la estructura celular de las plantas.

Magnesio: Nutriente secundario, componente central de la molécula de clorofila.

Azufre: Nutriente esencial para la síntesis de proteínas y enzimas.

Hierro: Micronutriente esencial para la síntesis de clorofila y el metabolismo de las plantas.

Manganeso: Micronutriente importante en la fotosíntesis y la respiración de las plantas.

Cobre: Micronutriente esencial para la formación de enzimas y la fotosíntesis.

Zinc: Micronutriente importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Boro: Micronutriente esencial para la formación de paredes celulares y el desarrollo de frutos.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Capacidad del suelo para retener y liberar cationes.

Conductividad Eléctrica (CE): Medida de la concentración de sales en el suelo.

Sienita: Roca ígnea utilizada como fuente de minerales en fertilizantes.

Lodolita: Roca sedimentaria rica en minerales, utilizada en la formulación de fertilizantes.

Pedúnculo de Plátano: Residuo orgánico utilizado como fuente de biomasa en fertilizantes.

Fertilizante Orgánico-Mineral: Producto que combina nutrientes de origen orgánico e inorgánico.

Fertilizante Comercial: Producto sintético utilizado para mejorar la fertilidad del suelo.

Testigo: Muestra de suelo o planta que no recibe tratamiento, utilizada como control en experimentos

Resumen

Título: Estudio Del Potencial Fertilizante De Un Compuesto Orgánico Mineral, Microsienita, Lodolita Más Biomasa Y Su Aplicación Piloto En Cultivo De Frijol*

Autor: Bibiana Milena Herrera Agudelo**

Palabras Clave: Fertilizante, Microsienita, Lodolita, biomasa, frijol, suelo.

Descripción: El presente trabajo estudia una alternativa fertilizante orgánico mineral para contribuir y buscar opciones más ecológicas de estos productos en Colombia, los cuales han generado degradación de suelos y contaminación ambiental. Se centra en la elaboración de un fertilizante orgánico-mineral a partir de Microsienita (MS), lodolita (LO) y biomasa extraída del Pedúnculo de Plátano (PP), aplicado en el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris*), un cultivo clave para la seguridad alimentaria. La investigación evaluó el impacto del fertilizante en propiedades del suelo como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, potasio y fósforo. Los resultados mostraron que la formulación óptima, compuesta por 66,56% de pedúnculo de plátano, 17,47% de lodolita y 15,97% de Microsienita, mejoró significativamente el crecimiento del cultivo y las condiciones del suelo, superando en varios aspectos al fertilizante comercial. Además, se identificó una relación compleja entre las formas de nitrógeno (amoniaco y nítrico) y el potasio, donde el amonio inhibió la absorción de potasio, mientras que el nitrato la favoreció. El estudio concluye que este fertilizante representa una alternativa viable, económica y ecológica para pequeños y medianos productores, aunque se recomienda ajustar algunos parámetros para cumplir con la normativa colombiana y continuar investigando la interacción entre nutrientes para optimizar su eficacia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Maestría en Química. Director: Luz Yolanda Vargas Fiallo. Msc. Química. Codirector: Luis Carlos Mantilla. Msc. Geología.

Abstract

Title: Study of the Fertilizer Potential of an Organic Mineral Compound, Microsyenite, Lodolite Plus Biomass and Its Pilot Application in Bean Crops *

Author(s): Bibiana Milena Herrera Agudelo **

Key Words: Fertilizer, Microsyenite, Lodolite, biomass, bean, soil.

Description: This paper studies an alternative organic-mineral fertilizer to contribute to and seek more ecological options for these products in Colombia, which have generated soil degradation and environmental pollution. It focuses on the development of an organic-mineral fertilizer from microsyenite (MS), mudstone (LO), and biomass extracted from plantain stem (PP), applied to the common bean crop (*Phaseolus vulgaris*), a key crop for food security. The research evaluated the impact of the fertilizer on soil properties such as pH, cation exchange capacity (CEC), and the availability of essential nutrients such as nitrogen, potassium, and phosphorus. The results showed that the optimal formulation, composed of 66.56% plantain stem, 17.47% mudstone, and 15.97% microsyenite, significantly improved crop growth and soil conditions, outperforming commercial fertilizers in several aspects. Furthermore, a complex relationship was identified between nitrogen forms (ammonia and nitrate) and potassium, with ammonium inhibiting potassium uptake, while nitrate favored it. The study concludes that this fertilizer represents a viable, economical, and environmentally friendly alternative for small and medium-sized producers, although it is recommended that some parameters be adjusted to comply with Colombian regulations and that further research into the interaction between nutrients be conducted to optimize its effectiveness.

* Degree Work

** Faculty of Sciences. University's School of Chemistry. Director: Luz Yolanda Vargas Fiallo Chemistry Master's degree. Codirector: Luis Carlos Mantilla. Geology Master's degree.

Introducción

La agricultura es un sector clave en la economía colombiana, representando aproximadamente el 6,5% del Producto Interno Bruto (PIB) y generando empleo para una gran parte de la población rural. (DANE, 2023) Sin embargo, el uso intensivo de fertilizantes industriales ha generado diversas problemáticas ambientales y económicas, incluyendo la degradación del suelo, la contaminación de fuentes hídricas y la dependencia de insumos importados cuyo costo ha aumentado en los últimos años (FAO, 2022).

En Colombia, los suelos agrícolas presentan una gran diversidad en cuanto a composición y fertilidad. No obstante, muchas de estas tierras muestran signos de empobrecimiento debido a prácticas agrícolas inadecuadas y al uso excesivo de fertilizantes químicos (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2023). Factores como la acidez del suelo, la pérdida de materia orgánica y el desequilibrio de nutrientes afectan la productividad de los cultivos, lo que hace necesario el desarrollo de estrategias sostenibles para mejorar la fertilidad del suelo.

Con el objetivo de contribuir a la producción de nuevas variedades de fertilizantes orgánico-minerales (OM), se desarrollaron mezclas de materiales rocosos con biomasa y se evaluó su aplicación piloto en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*). Este cultivo fue seleccionado por su importancia en la seguridad alimentaria y su capacidad para fijar nitrógeno en el suelo, contribuyendo así a su fertilidad de manera natural (Manickavasagan & Thirunathan, 2020).

Para la formulación del fertilizante, se seleccionaron rocas que, en términos generales, no suelen emplearse en fertilizantes OM tradicionales, pero que están disponibles en el mercado regional y nacional. En concreto, se eligieron dos tipos de roca: una variedad sedimentaria denominada lodolita y una variedad ígnea conocida como Microsienita. La selección de estos

materiales se fundamentó en dos criterios principales: (1) su granulometría, con partículas menores a 1-2 mm, lo que facilita una mayor superficie de contacto y un mejor intercambio catiónico entre los minerales de las rocas, la biomasa y el suelo; y (2) su composición química. La Microsienita, con un alto contenido de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, aportantes de elementos esenciales como sílice, potasio y sodio. Por su parte, la lodolita, debido a su naturaleza polimíctica y a su origen asociado a procesos de meteorización, erosión y acumulación, se seleccionó por su composición representativa de la media de la corteza terrestre, en concordancia con el patrón geoquímico NASC (North American Shale), ampliamente utilizado en estudios geológicos petrogenéticos. (Ahmad & Islam, 2022)

La presente investigación se justifica por la necesidad de reducir la dependencia de fertilizantes industriales y fomentar el uso de alternativas sostenibles que mejoren la calidad del suelo sin generar impactos ambientales negativos. Además, el desarrollo de fertilizantes orgánico-minerales puede representar una solución viable para pequeños y medianos productores, ofreciendo una opción más accesible y menos contaminante para el mejoramiento de sus cultivos (McGrath et al., 2014) En este contexto, el estudio busca evaluar la eficacia del fertilizante desarrollado mediante análisis fisicoquímicos del suelo y el monitoreo del crecimiento del frijol en distintas condiciones. A través de este enfoque, se espera proporcionar evidencia científica sobre el impacto del fertilizante propuesto y su potencial aplicación a nivel comercial, contribuyendo así a la innovación en el sector agrícola colombiano.

1. Marco Referencial

El Suelo, entiéndase por la definición de la Real Academia Española como “*Conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal*”, está compuesto por minerales, materia orgánica, microorganismos vegetales y animales, aire y agua. Su formación se debe a la muy lenta desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, n.d.). El suelo desempeña un importante papel ecológico para el sustento y la supervivencia de la vida. La gestión de la salud del suelo es vital para el mantenimiento de la biodiversidad y la protección de la producción agrícola sostenible. Por lo tanto, la conservación y preservación de la salud del suelo tiene una importancia primordial para la sostenibilidad del ecosistema. La salud del suelo está regulada por las propiedades del suelo, es decir, las propiedades fisicoquímicas y biológicas (Pahalvi et al., 2021). Entre estas se encuentran la textura, color, estructura, pH, Conductividad Eléctrica (CE), Carbono Orgánico, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Contenido de macronutrientes primarios como el nitrógeno, potasio y fósforo, macronutrientes secundarios como el calcio, el magnesio y azufre, el contenido de micronutrientes como por ejemplo el cobre, boro, manganeso, hierro, níquel, molibdeno, cloro y zinc (McGrath et al., 2014).

1.1. Textura, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico en los suelos.

La textura del suelo depende de las proporciones de arena, limo y arcilla que contenga. La textura es importante porque afecta la capacidad del suelo para retener agua, la porosidad y la

aireación, la conductividad hidráulica, la compactibilidad, la resistencia a la penetración de las raíces, la capacidad de retención de nutrientes (es decir, la capacidad de intercambio catiónico [CIC]) y la resistencia a la acidificación. (Moody & Phan, 2008).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) se define como una medida de la concentración de sal en la solución del suelo. Una CE alta tiene un efecto adverso en el crecimiento de las plantas, principalmente debido a los efectos osmóticos que restringen la capacidad de las raíces para absorber agua. (Moody & Phan, 2008). Finalmente, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), se refiere al número de cargas negativas capaces de retener cationes mediante fuerzas electrostáticas por unidad de peso de suelo. (Moody & Phan, 2008)

1.2. El pH en los suelos

Tener el pH correcto es importante para el crecimiento saludable de las plantas. El pH del suelo afecta a la cantidad de nutrientes y sustancias químicas que son solubles en el agua del suelo y, por lo tanto, los nutrientes disponibles para las plantas. Algunos nutrientes están más disponibles en condiciones ácidas, mientras que otros lo están en condiciones alcalinas. Sin embargo, la mayoría de los nutrientes minerales están fácilmente disponibles para las plantas cuando el pH del suelo entre 6,5 y 7,5. Los suelos fuertemente ácidos (pH inferior a 5,5) puede dar lugar a un crecimiento deficiente de las plantas como resultado de uno o más de los siguientes factores: toxicidad del aluminio y manganeso, deficiencia de calcio y magnesio, niveles bajos de nutrientes esenciales para las plantas, como el fósforo y el molibdeno. Los suelos alcalinos pueden tener problemas con deficiencias de nutrientes como el zinc, el cobre, el boro y el manganeso. El equilibrio que se busca es cuando el pH del suelo oscila entre 5,5 y 7,5, este parámetro es uno de los principales y relevantes en la química agrícola.

1.3.Importancia de los suelos en la sociedad colombiana

Los suelos han tenido una importancia en el desarrollo de la sociedad humana, pues gracias al aprovechamiento de los recursos de suelo y agua han proporcionado a los seres humanos la capacidad de producir alimentos, mediante la agricultura. (Parikh & James, 2012) . La superficie de la tierra destinada para este propósito es de aproximadamente 5000 mega hectáreas (Mha) a nivel mundial, lo que representa el 38% de la superficie de la tierra. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2016)

La agricultura es una de las más importantes componentes de la sociedad, y el suelo es una parte fundamental de una agricultura exitosa y es la fuente original de los nutrientes usados para cultivar, los nutrientes pasan del suelo a las plantas que la sociedad consume. Por lo que, si se cuenta con un suelo sano y fértil representa un beneficio en suministros más sanos y abundantes. (Soil Science Society of America, 2015) Por lo anterior, la gestión del suelo es necesaria para asegurar la producción agrícola sostenible. La Agricultura moderna depende principalmente de los pesticidas, riego asegurado, semillas mejoradas, herbicidas y **fertilizantes químicos**. Su empleo en la agricultura aumenta la producción, pero su utilización inadecuada tiene un impacto desfavorable en la calidad del medio ambiente y la productividad del suelo, lo que es motivo de preocupación. (Gowhar Hamid Dar et al., 2021) e interés de este trabajo.

1.4.Fertilizantes

Se refiere a una sustancia o material químico o natural que se utiliza para proporcionar nutrientes a las plantas, generalmente mediante su aplicación directa al suelo y en algunos casos al follaje o través del sistema de riego. Se consideran múltiples tipos y fuentes de nutrientes, entre los que se incluyen fertilizantes químicos y minerales, orgánicos como el estiércol y compost de

ganado y fuente de nutrientes reciclados como aguas residuales, lodos de depuradora, digestados y otros desechos procesados. (European Union, 2024)

En Colombia, El ente que ejerce control técnico científico del registro, producción, importación, comercialización y uso de fertilizantes, acondicionadores, bioinsumos, entre otros productos para la industria agrícola, es el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y su definición establece que un fertilizante es un *“Producto que aplicado al suelo o a las plantas suministra a estos uno o más nutrientes necesarios para su desarrollo y crecimiento.”*(Instituto Colombiano Agropecuario, 2003).La resolución No. 00150 del 2003 del ICA por la cual se adopta el reglamento técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de suelos para Colombia, de las definiciones en el Capítulo II resuelve que, para la interpretación del Reglamento Técnico, se utilizaran las definiciones y clasificación contenidos en la Norma Técnica Colombiana No. 1927 del 2001, donde se explica que el pproducto en el cual los nutrientes declarados son de origen tanto orgánico como inorgánico, obtenidos mediante mezcla o por combinación química o bioquímica de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, corresponden a la clasificación de **FERTILIZANTE ÓRGANO MINERAL** (Instituto Colombiano Agropecuario, 2003), término que encasilla al producto propuesto para este trabajo.

Los fertilizantes y demás agroinsumos, son usados acorde a las deficiencias del suelo a labrar y el cultivo a sembrar, por lo que se hace indispensable la integración de las disciplinas de la química del suelo, la biología del suelo, la física del suelo y la ciencia vegetal para desarrollar prácticas que proporcionen los elementos esenciales necesarios para el crecimiento de las plantas en cantidades suficientes para maximizar la producción y al mismo tiempo brindar protección ambiental. (McGrath et al., 2014)

1.4.1. Frijol común (*Phaseolus vulgaris*)

El frijol común es una leguminosa, originaria de América, es uno de los cultivos más antiguos y por su fácil disponibilidad y propiedades nutricionales se ha convertido en la actualidad en uno de los cultivos más importantes, que se consumen en todo el mundo. El frijol común suele crecer en la estación cálida y no es muy adecuado para soportar temperaturas gélidas durante su crecimiento. Se necesitan precipitaciones adecuadas para su crecimiento, especialmente durante la etapa de floración. La maduración de la mayoría de las variedades demorará alrededor de 65 a 110 días, pero algunas variedades pueden tardar más de 200 días. (Manickavasagan & Thirunathan, 2020)

El cultivo del frijol requiere de una textura franco-limosa, aunque puede tolerar textura franco arcillosas, se da muy bien en suelos con pH entre 5,5 y 6,5, de topografía plana y ondulada con buen drenaje. Tiene la habilidad de adaptarse a una gran cantidad de condiciones y topografías (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2014).

Los requerimientos de nutrientes principales para este cultivo se resumen en la **Tabla 1**

Tabla 1 *Requerimientos de nutrientes en la fisiología de las plantas del cultivo de frijol.*

Componentes de la cosecha	kg/ha					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Vainas	32	4	22	4	4	10
Tallos	65	5	71	50	14	15
Total	97	9	93	54	18	25

Nota: Tomado de manejos agronómico del frijol. Fuente: FAO.

1.5. Relación entre el nitrógeno y el potasio.

El nitrógeno y el potasio son necesarios en el ciclo de vida de la planta, son los dos nutrientes adquiridos en mayores cantidades por las raíces. Cabe resaltar, que el potasio está presente en un catión monoatómico y monovalente K^+ , mientras que el nitrógeno está disponible en diferentes complejos, entre los que se encuentran el amoniacal (NH_4^+) y nitrato aniónico (NO_3^-). Los iones K^+ una vez son absorbidos por la planta, se mantienen en estadio iónico simple, influyendo en las actividades de activación enzimática y participando como osmolito principal, por otro lado, los dos compuestos de nitrógenos sufren numerosas reacciones químicas, cumpliendo las funciones fisiológicas de constituir una amplia gama de metabolitos, compuestos estructurales, como la clorofila y coenzimas. Las concentraciones presentes de NH_4^+ están presentes en el suelo usualmente en $1 \times 10^{-3} M$, mientras que el nitrógeno en forma de nitratos puede alcanzar hasta una concentración de $1 \times 10^{-2} M$. Para el caso del K^+ las concentraciones oscilan entre $1 \times 10^{-4} M - 1 \times 10^{-3} M$. Los transportes de estos dos elementos pueden verse inmersos en una competencia, favoreciendo o afectando negativamente la absorción entre ellos, una de las interacciones más conocidas en la fisiología es el efecto inhibitor de la especie NH_4^+ sobre la absorción de K^+ .

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el potencial fertilizante de un compuesto orgánico mineral, sienita y lodolita más biomasa, aplicado a un cultivo de ciclo corto.

2.2. Objetivos específicos

Establecer estadísticamente las porciones óptimas de polvo de roca y biomasa para la preparación del fertilizante orgánico mineral.

Determinar la relación existente entre el Nitrógeno y el Potasio en el producto preparado que será aprovechado por la planta.

Comprobar la efectividad del fertilizante elaborado con un fertilizante comercial a través de la siembra de frijol.

Evaluar el grado de sustitución del abono convencional con el propuesto.

3. Metodología

Las **Figura 1** ilustra las cuatro etapas del desarrollo de este trabajo.



Figura 1 Etapas experimentales.

Las materias primas usadas se observan en la **Figura 2**. Los precursores del fertilizante fueron los siguientes: Lodolita (Lo) **Figura 2(A)**, extraída del afloramiento de lodolita MPI-01 – Ubicación: Vía Mogotes. Latitud 6°26'10,2" Longitud 75°54'2,6"; la Sienita (MS) **Figura 2(B)** se extrajo del afloramiento de Sienita MPI-02 – Ubicación: Piedecuesta. Latitud 6°55'12" Longitud 73°00'52" y el Pedúnculo de Plátano (PP) **Figura 2(C)** (BV-1): obtenida de mercado locales de Bucaramanga.

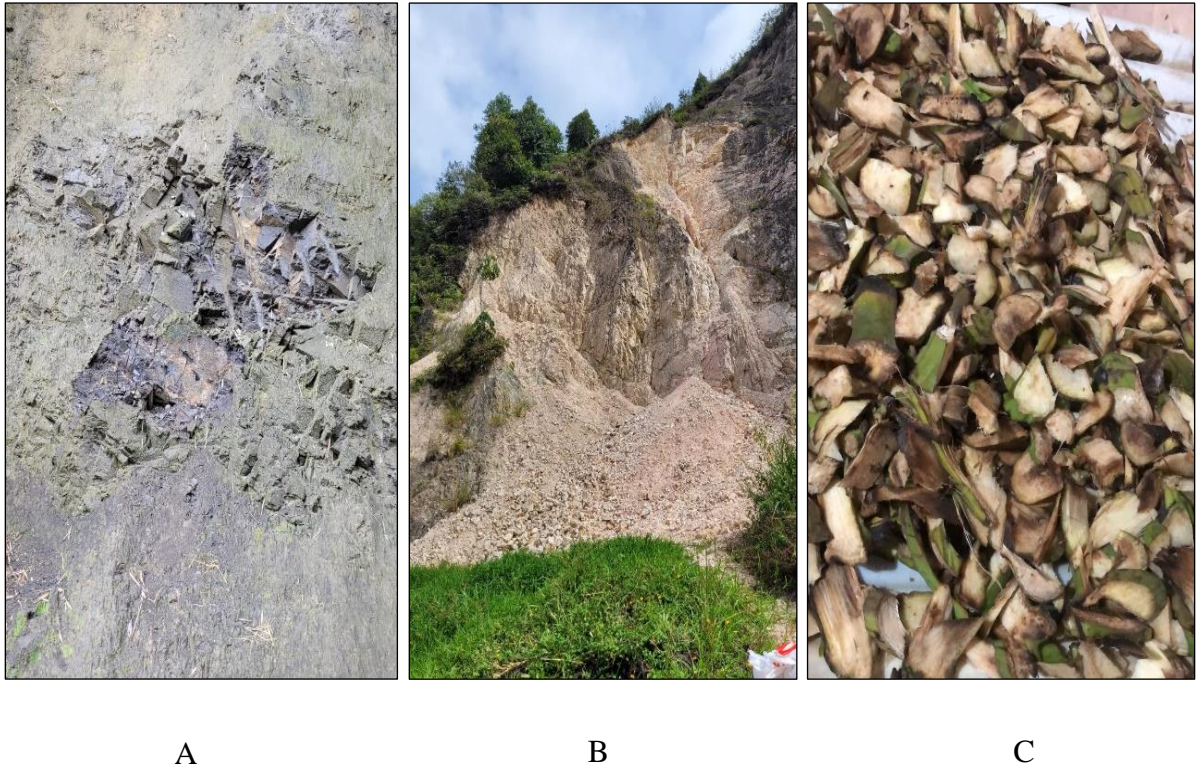


Figura 2 Precursores para la composición del fertilizante.

Para homogenizar los precursores y preparar las muestras para sus respectivo análisis, se pulverizaron las rocas LO y MS en un molino de bolas y para el PP se deshidrato en estufa con una temperatura de 60°C durante 4 horas y homogenizó en molino de cuchillo, se ingresaron al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander para realizar a cada una de ellas los análisis expuestos en la **Tabla 2** donde se detallan también las metodologías aplicadas.

Tabla 2 Análisis fisicoquímicos de los productos primarios que componen el fertilizante

Análisis	Método
pH	Potenciométrico, NTC 5167:2022
Conductividad eléctrica	Conductivimétrico, NTC 5167:2022
Densidad Real (En base seca), humedad, cenizas, pérdida por volatilización, silicio	Gravimétrico, NTC 5167:2022
Carbono orgánico oxidable total	Espectrofotométrico UV-Vis, NTC 5167:2022
Nitrógeno total, Nitrógeno amoniacal	Método Kjeldahl, NTC 370:2011
Nitrógeno Nítrico	Espectrofotométrico, NTC 370:2011
Fósforo total	Espectrofotométrico, NTC 370:2011
Magnesio total, calcio total, sodio total, potasio total, cobre total, manganeso total, hierro total, cinc total.	Absorción atómica, NTC 5167:2022
Azufre total	Turbidimétrico, NTC 5167:2022
Análisis elemental*	Fluorescencia RX

Nota. * No aplica para el Pedúnculo de Plátano.

Con respecto al suelo facilitado para sembrar los cultivos de prueba necesarios para este trabajo, se recolectó de la vereda Vericute al kilómetro 9 + 300 en la vía Cúcuta. Y los análisis practicados a esta muestra se detallan en la **Tabla 3** y se llevaron a cabo en el Laboratorio Químico de Suelos de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 3 Análisis fisicoquímicos realizados a los suelos, con sus respectivas metodologías

Análisis	Metodología
pH	NTC 5264:2022
Textura	Bouyoucos adaptado
Aluminio	NTC 5263:2023
Carbono Orgánico Total	Colorimétrico, Walkley Black K ₂ Cr ₂ O ₇ -H ₂ SO ₄
Fósforo disponible	Colorimétrico, Bray II. HCl [0,1N], NH ₄ F[0,03N]
Calcio, magnesio, sodio y potasio	Absorción Atómica, Extracción con Acetato de Amonio
Hierro, manganeso, cobre y cinc	Absorción Atómica, Extracción con DTPA
Boro y azufre	Colorimétrico, Extracción Fosfato Monocálcico
Capacidad de Intercambio Catiónico	Extracción Acetato de Amonio
Conductividad Eléctrica	NTC 5596:2022

Se seleccionó la semilla de frijol común (*Phaseolus Vulgaris*) para las pruebas, por ser un cultivo de ciclo corto y de fácil asequeabilidad. Se adquirieron semillas certificadas, con una germinación del 90% y pureza del 99%.

La formulación de los fertilizantes y la siembra del cultivo concatenan la segunda etapa de este trabajo. Las tres composiciones indicadas en la **Tabla 4** se propusieron teniendo presente los resultados de los análisis de las materias primas, suelo y las necesidades para la germinación y crecimiento de las semillas seleccionadas.

Tabla 4 *Formulaciones de fertilizantes*

Nombre de fertilizante	Cantidad de péndulo de plátano (g)	Cantidad de lodolita (g)	Cantidad de Microsienita (g)
Fertilizante 1	400	50	50
Fertilizante 2	400	50	-
Fertilizante 3	400	-	50

Las mezclas se incubaron durante 30 días, finalizado este período, se homogeneizaron con el suelo y se envasaron en bolsas tipo vivero **Figura 3 A**. Posteriormente, se estableció un diseño de bloques que incluyó: 11 plantas por tratamiento, un testigo absoluto (suelo sin enmiendas), Un control enriquecido con fertilizante comercial (para comparación de eficiencia). En cada bolsa se sembraron tres semillas de frijol (**Figura 3**), seleccionando posteriormente una planta por unidad experimental para evitar competencia. Las bolsas se distribuyeron en 5 ERAS dentro de

una huerta casera (**Figura 3 C**), con aislamiento perimetral para prevenir daños por fauna. Se implementó polisombra para regular la exposición solar y evitar estrés térmico y el riego se ajustó a demanda, manteniendo una humedad constante del suelo. En cuanto a las condiciones climáticas del experimento, fueron las típicas de la época de siembra en los meses de abril y mayo. El experimento se condujo bajo las condiciones climáticas típicas de la época de siembra que se realizó en el mes de abril y mayo.

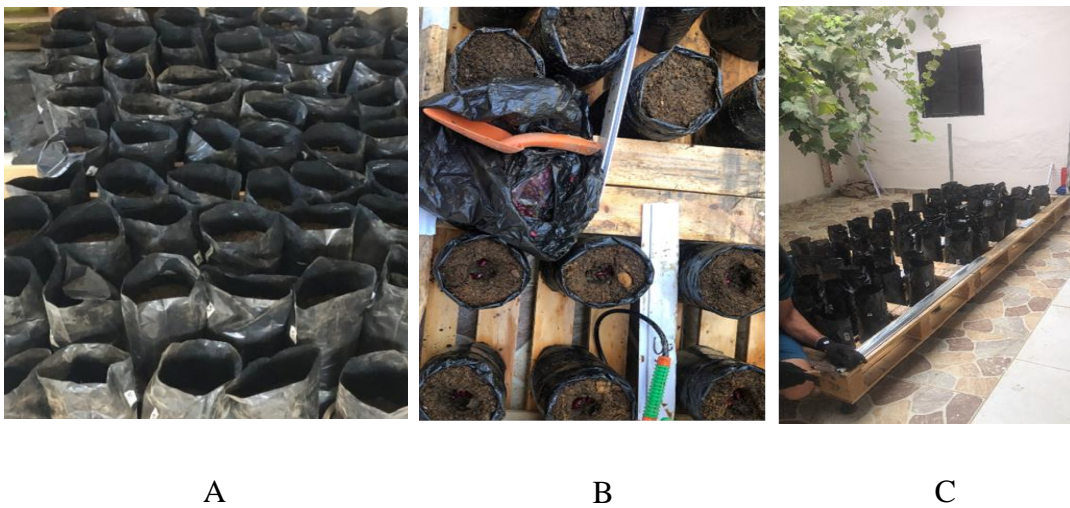


Figura 3. Proceso de sembrado

En la tercera etapa se iniciaron muestreos acorde a las fases fenológicas del frijol, comenzando con la germinación de las plantas como se observa en la **Figura 4** y a partir de este momento se realizaron 6 muestreos cada nueve días donde se monitoreó el progreso en morfológico de las plantas en los que se incluyeron el conteo de número de hojas, flores, vainas, la altura del tallo y área de la hoja, además se realizaron análisis fisicoquímicos de los foliares cuando las plantas ya tenían hojas. En cuanto a los seis muestreos de suelo fertilizado, se analizaron los mismos parámetros que en el caso del suelo virgen (**Tabla 3**).



Figura 4 Germinación del frijol

La etapa final del trabajo corresponde al análisis de los datos recolectados en el cultivo piloto de frijol. Este análisis se dividió en dos partes, la primera mediante código R, de cada uno de los parámetros analizados, se comparó los cambios en el tiempo entre las 5 eras, con el objetivo de seleccionar el fertilizante con mejores rendimientos. Una vez seleccionado la formulación más efectiva, con los datos de esta se uso código R para maximizar y optimizar las cantidades de cada componente y obtener la composición maximizada mejorada. De igual manera, se aislaron los datos de los resultados de Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno en forma de nitritos y potasio, con los que se desarrollaron un modelo multivariable con el que se evaluó las relaciones entre el potasio y las dos formas de nitrógenos mencionados anteriormente.

4. Resultados y análisis de resultados

Los resultados de la caracterización de las materias primas usadas en las formulaciones se muestran en la **Tabla 5**, donde se evidencia que la LO y MS contienen un porcentaje mayor al 90% de cenizas, lo que explica el porcentaje alto de Silicio (Si) en estas dos muestras. También se muestra que existe un contenido importante en Ca, P, Mg, K y Fe. Contraste, con el contenido de B, S, Cu, Zn, Mn que se encuentran presentes en cantidades bajas. En el caso del PP, el aporte principal es el de C, K y S elementos importantes, en especial el carbono y el azufre, dado que la materia inorgánica no puede aportarlo.

Tabla 5. Resultados de los análisis fisicoquímicos más relevantes de los precursores de los fertilizantes propuestos.

Análisis	Microsienita (MS)	Lodolita (LO)	Pedúnculo de Plátano (PP)
pH	5,85	5,34	9,29
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	33,40	26,10	21230
Densidad (g/ml)	1,28	1,08	0,35
Humedad (%)	0,07	0,08	1,94
Cenizas (%)	97,16	97,06	29,50
Perdidas por volatilidad (%)	2,78	2,86	68,56
Carbono (% C)	0,00	0,00	36,47
Fósforo (% P ₂ O ₅)	0,94	0,98	1,21
Calcio (% CaO)	0,73	1,06	1,23
Magnesio (% MgO)	0,53	2,38	0,68
Sodio (% Na)	0,10	0,13	0,11
Potasio (% K)	0,30	0,41	4,14
Boro (% B)	NR	NR	0,0020
Hierro (% Fe)	0,20	3,08	0,04

Manganeso (%Mn)	0,03	0,02	0,01
Cobre (%Cu)	0,0001	0,0013	0,0020
Cinc (%Zn)	0,0012	0,0084	0,0046
Azufre (%S)	NR	0,06	0,41
Nitrógeno (%N)	0,00	0,00	7,42
Silicio (%Si)	29,43	32,32	2,21

4.1. Resultados de suelo sin fertilizar

La textura del suelo sin fertilizar (suelo virgen) es de tipo Franco-arcilloso-arenoso, contiene arena, limo y arcilla y es una variante del suelo franco que se considera fértil y bueno para la agricultura, presenta un buen drenaje y retiene la humedad y los nutrientes, es más fácil de excavar a diferencia del suelo arcilloso. (Barman & Choudhury, 2020).

El pH fue igual a 5,1 lo que indica un suelo fuertemente ácido y poco favorecedor para cultivos, por lo que uno de los intereses de las formulaciones preparadas era mejorar este parámetro importante e influyente en una amplia gama de procesos que afectan la fertilidad del suelo y el crecimiento de la planta (Parikh & James, 2012). Adicionalmente, El pH influye drásticamente en la disponibilidad relativa de los nutrientes esenciales para la planta, como se muestra en la **Figura 5**, donde se evidencia que a pH ácido, la absorción de elementos tóxicos para los cultivos como el aluminio (Al) aumenta, al contrario de la absorción de elementos vitales para el crecimiento del cultivo como el K, N y P que disminuyen a este mismo valor de pH (McGrath et al., 2014). Para obtener un cultivo de frijol fuerte, reproductivo y sano se desea un pH entre 5,5 y 6,5. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2014).

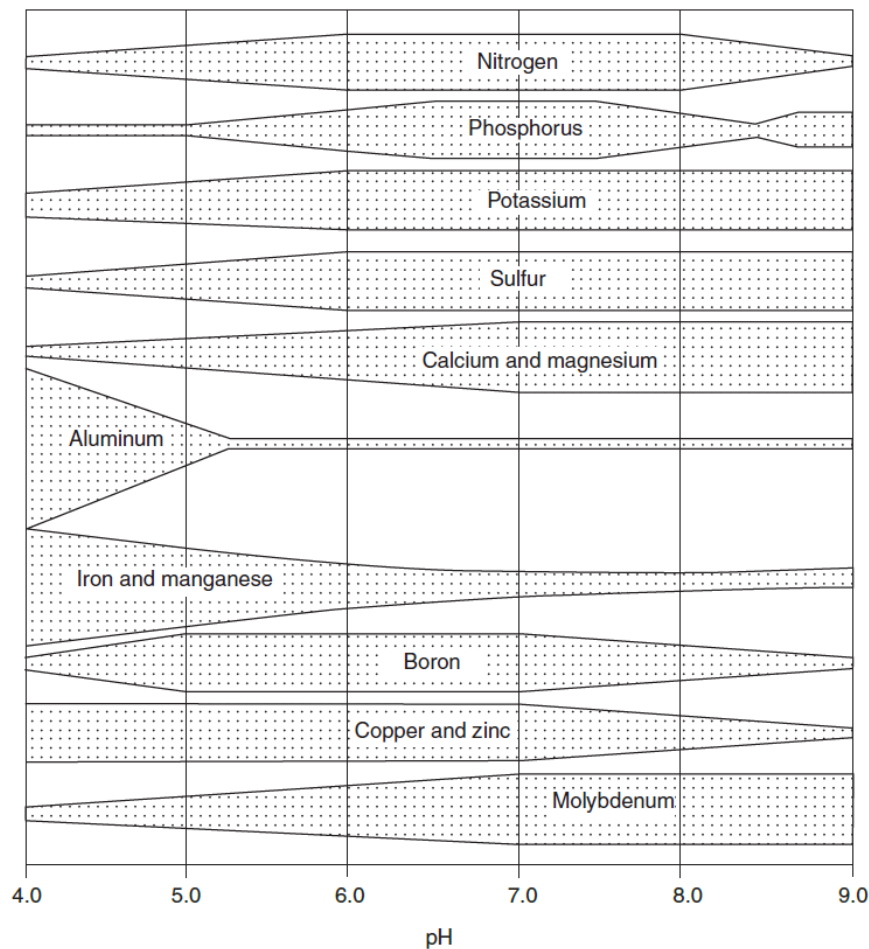


Figura 5. Disponibilidad de los nutrientes esenciales para la planta según el valor del pH. Tomado de Soil Fertility and Plant Nutrition. doi:10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y Conductividad Eléctrica se obtuvieron resultados de 18 meq/100 g y 0,004 mmhos/cm respectivamente. La CIC del suelo virgen es baja e indica un suelo pobre en la capacidad de retener cationes mediante fuerzas electrostáticas por unidad de peso del suelo. Además, esto expone al suelo a la posible contaminación por metales pesados. (Moody & Phan, 2008) Una propiedad enlazada con el CIC es la CE que mide la capacidad de agua del suelo para transportar la corriente eléctrica,

es decir, el transporte de los cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ influyentes en la CIC, además de aniones como SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , y HCO_3^- . El suelo analizado y utilizado para la siembra, muestra un CE muy baja, es decir un suelo no salino y aunque no se desea una CE alta y un suelo salino, si se intentó subir la CE a valores ideales que oscilan entre 0,8 – 1,8 mmhos/cm (USDA Natural Resources Conservation Service, 2011).

Los elementos mayores se resumen en la **Figura 6** donde se hace una comparación entre los valores ideales de los elementos presentes en el suelo, barras en verde y el resultado del suelo usado para este trabajo, barras en azul. Para todos los elementos N, P, K, Ca y Mg se encuentran por debajo de las condiciones esperadas para un cultivo, situación crítica en especial para los macronutrientes principales N, P y K, vitales para la planta. Por ejemplo, para el caso del nitrógeno, es un elemento esencial para la formación de aminoácidos que posteriormente se incorporan en proteínas y en ácidos nucleicos. También es un componente de la clorofila responsable de la absorción de la luz, inmiscuido en el proceso de fotosíntesis. (McGrath et al., 2014). Así como, los otros elementos, influyentes en el crecimiento, florecimiento y salud del cultivo.

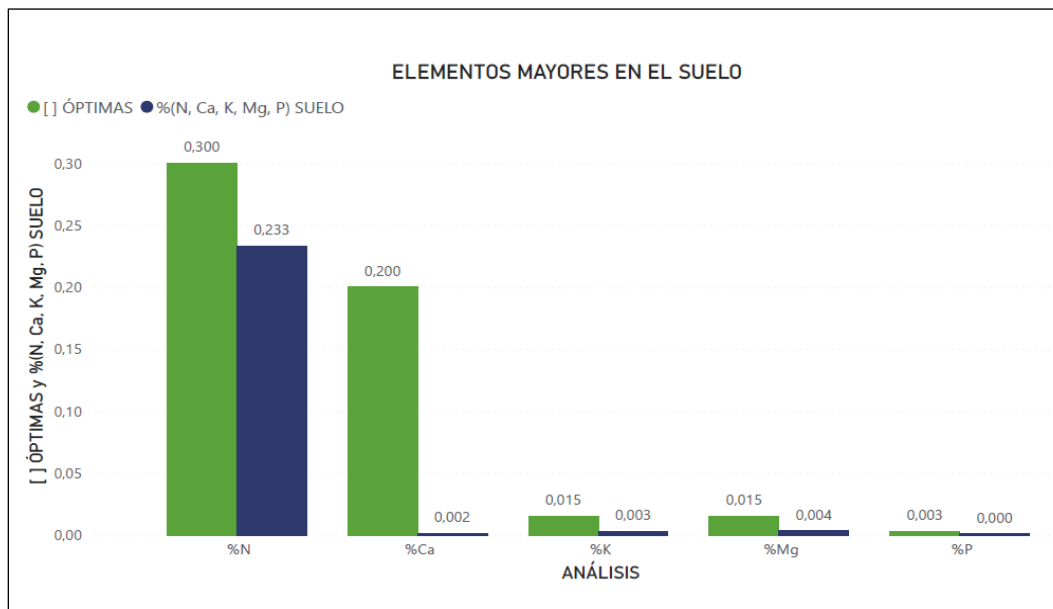


Figura 6. Elementos mayores del suelo sin fertilizar inicial

Por otro lado, los elementos menores (**Figura 7**) se evidencian la escasez de boro, manganeso, zinc y cobre, sin embargo se deben tener en cuenta que su exceso genera toxicidad, como en el caso del hierro excede la concentración ideal y se puede ver alterado el equilibrio redox celular hacia un estado pro-oxidante, induciendo alteraciones en los caracteres morfológicos, metabólicos y fisiológicos de la planta y generando un estrés oxidativo. (Lapaz et al., 2022)

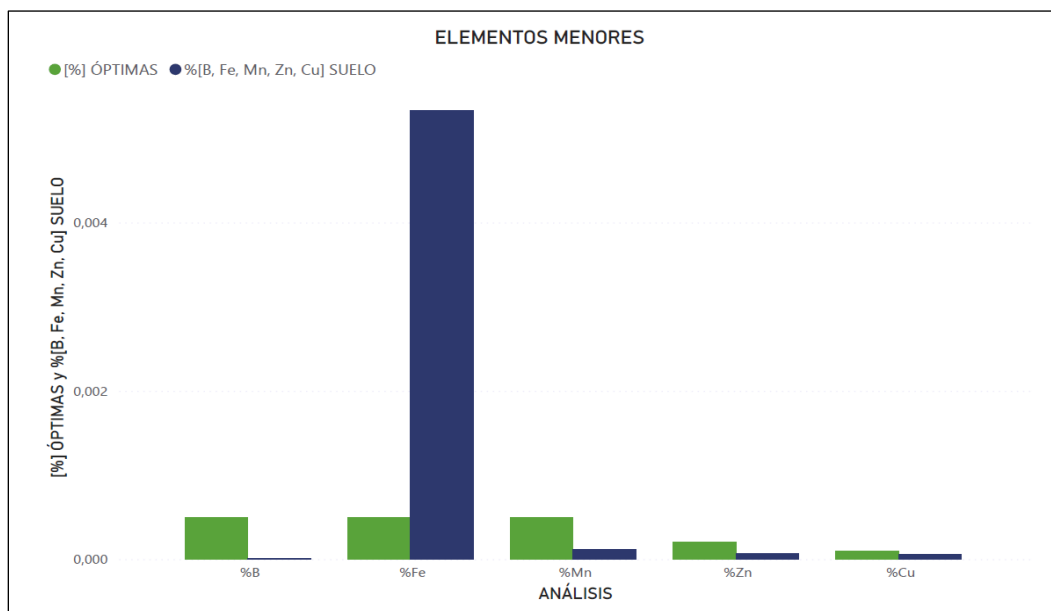


Figura 7 Elementos menores presentes en el suelo sin fertilizar

4.2. Suelos fertilizados con las formulaciones propuestas, durante el crecimiento del cultivo.

Los resultados de la textura, CIC y CE de las cinco eras en el muestreo inicial se resumen en la **Tabla 6**. Con respecto al suelo virgen sin siembra se muestra que la textura ha cambiado a un suelo Franco-arenoso, la CIC y la CE de todas las ERAS aumentaron, incluida la ERA 5 que contiene el testigo (blanco).

Tabla 6. Resultados de análisis fisicoquímicos de los fertilizantes en el muestro número 1

Número de ERA	Abonado	Textura	CIC (meq/100g)	CE (mmhos/cm)
1	Fertilizante 1	Franco-Arenoso	24,2	1,13
2	Fertilizante 2	Franco-Arenoso	24,2	0,44

3	Fertilizante 3	Franco-Arenoso	22,6	1,31
4	Fertilizante Comercial	Franco-Arenoso	19,8	0,59
5	Testigo	Franco-Arenoso	20,1	0,11

Cómo se ha mencionado a lo largo de este trabajo, uno de los parámetros de alta importancia es el pH de este depende la capacidad del suelo de retener y adsorber nutrientes para mejorar el crecimiento de la planta, a través de los muestreos se recolectaron los datos y se esquematizaron en la **Figura 8**. Se puede contemplar que el pH de las ERAS fertilizadas mejoró significativamente con respecto a la ERA testigo, incluso las ERAS fertilizadas con las fórmulas propuestas en este trabajo, desde el primer muestreo el pH aumento a un valor mayor a 6,5. Estos valores de pH son favorables y satisfactorios, ya que se buscaba un suelo de pH neutro, para mejorar captación de nutrientes de la planta y desfavorezca las intoxicaciones de aluminio y manganeso.

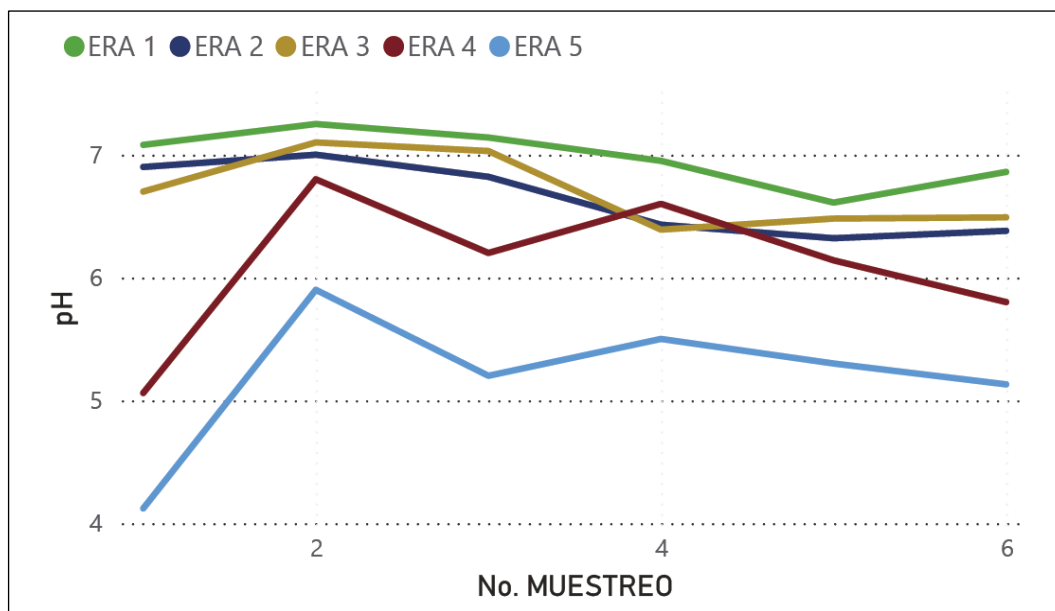


Figura 8 pH de las 5 ERAS en los 6 muestreos

4.2.1. Elementos mayores y menores en las cinco ERAS durante los seis (6) muestreos.

El fertilizante orgánico mineral evaluado logró aportar una cantidad adecuada de nitrógeno al suelo virgen (ERA 5), el cual inicialmente presentaba niveles bajos de este nutriente, considerados no aptos para el establecimiento de cultivos (**Figura 9**).

Al comparar estos resultados con los obtenidos mediante el uso de un fertilizante comercial (ERA 4), se observa que la ERA 1 —correspondiente al tratamiento con el fertilizante orgánico mineral en un suelo previamente acondicionado— alcanzó concentraciones de nitrógeno similares e incluso superiores, particularmente en el sexto muestreo.

Estos hallazgos evidencian el desempeño competitivo del fertilizante orgánico mineral frente al fertilizante comercial, resaltando su potencial para mejorar la fertilidad de suelos con deficiencias iniciales de nitrógeno.

Por otra parte, se registró también un aumento en los niveles de nitrógeno en las ERAS 2 y 3, efecto que se atribuye al aporte orgánico del pedúnculo de plátano, el cual complementó positivamente la nutrición del suelo.

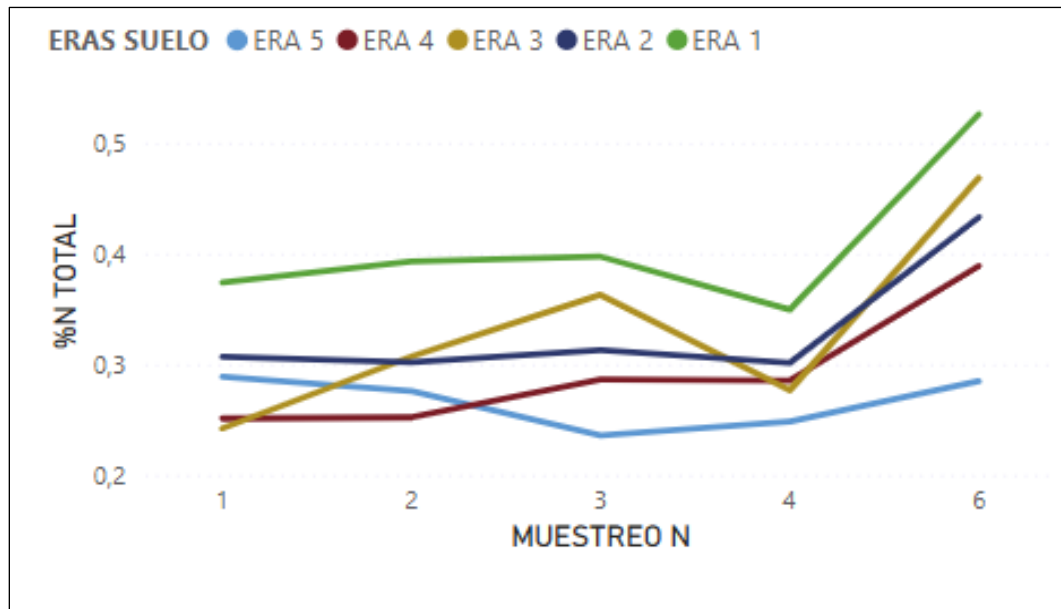


Figura 9 Porcentaje de nitrógeno total (%N total) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

En cuanto al potasio, otro macronutriente principal se observó un comportamiento más irregular e incluso ninguna de las ERAS logró el valor mínimo que debería tener un suelo agrícola, las ERAS que obtuvieron mejor resultado fue la ERA 4, 2 y 1, justamente en ese orden.

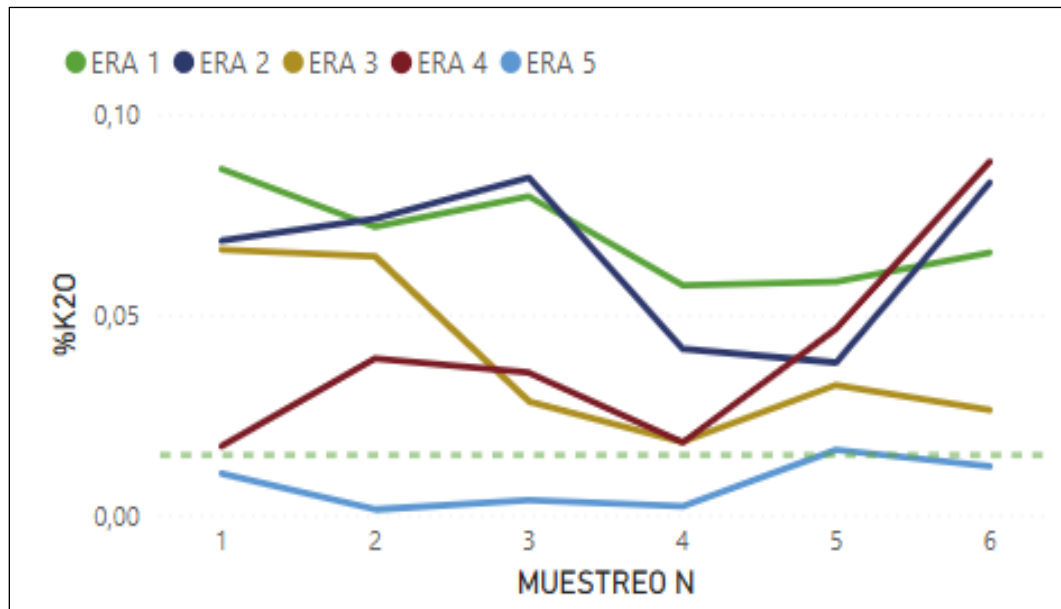


Figura 10 Porcentaje de potasio (K) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

El fósforo, que juega un papel muy importante en el crecimiento, floración y desarrollo de frutos (Jiaying et al., 2022) presentó incrementos importantes para las ERAS 1,2,3 y 4 expuestos en la **Figura 11**, siendo la más estable y con el mayor incremento la ERA número 4 correspondiente al fertilizante comercial. Sin embargo, las ERAS 1, 2 y 3 en algún punto alcanzaron el valor mínimo requerido para un suelo fértil. Desde cualquier punto, es un logro, ya que la ERA 5 y el análisis del suelo virgen mostraron que el contenido de fósforo era insignificante.

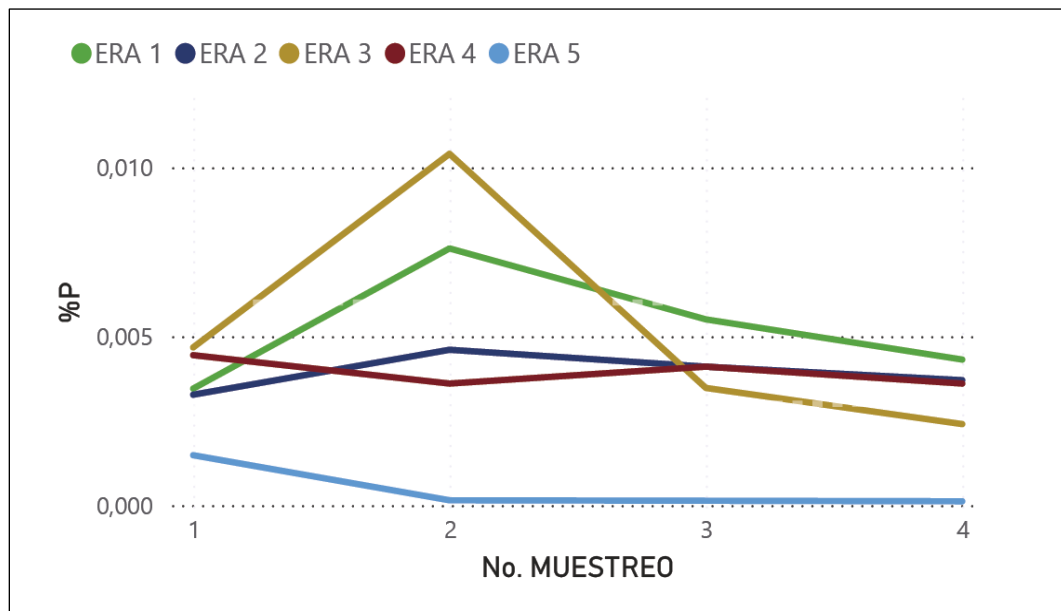


Figura 11 Porcentaje de fósforo en forma de % P_2O_5 total en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

Los datos de magnesio y calcio, representados en la **Figura 12** y **Figura 13** mostraron aumentos importantes superando en los dos casos los valores requeridos como mínimo para el crecimiento de la planta, 0,015% y 0,200 % respectivamente. En el aspecto del magnesio la ERA

que presentó mejor incremento fue la ERA 4 y para el calcio las ERAS 1, 3 y 4 mostraron comportamientos similares y superiores.

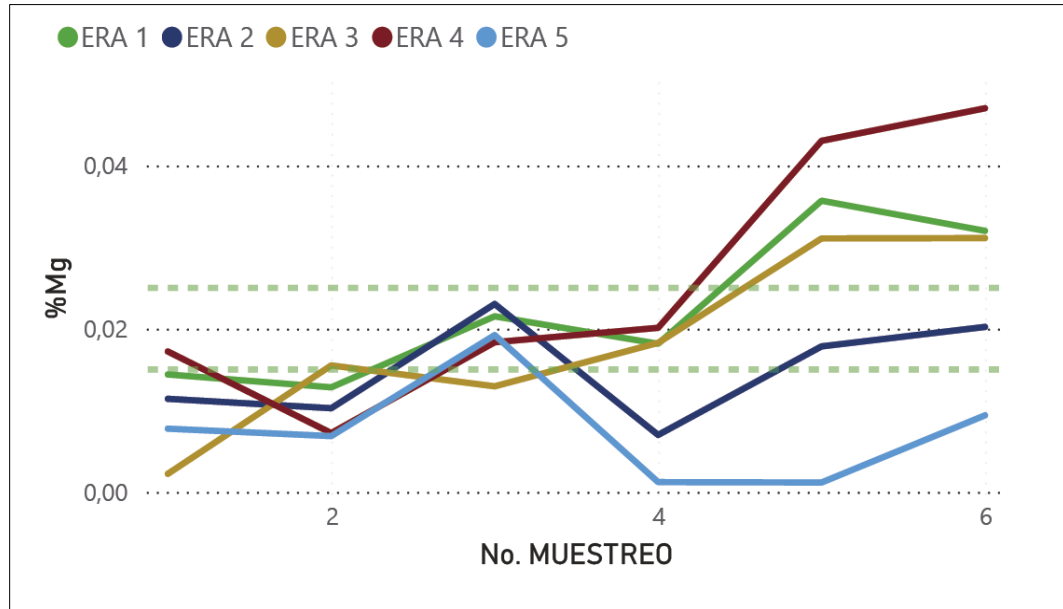


Figura 12 Porcentaje de magnesio en forma de % MgO total en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

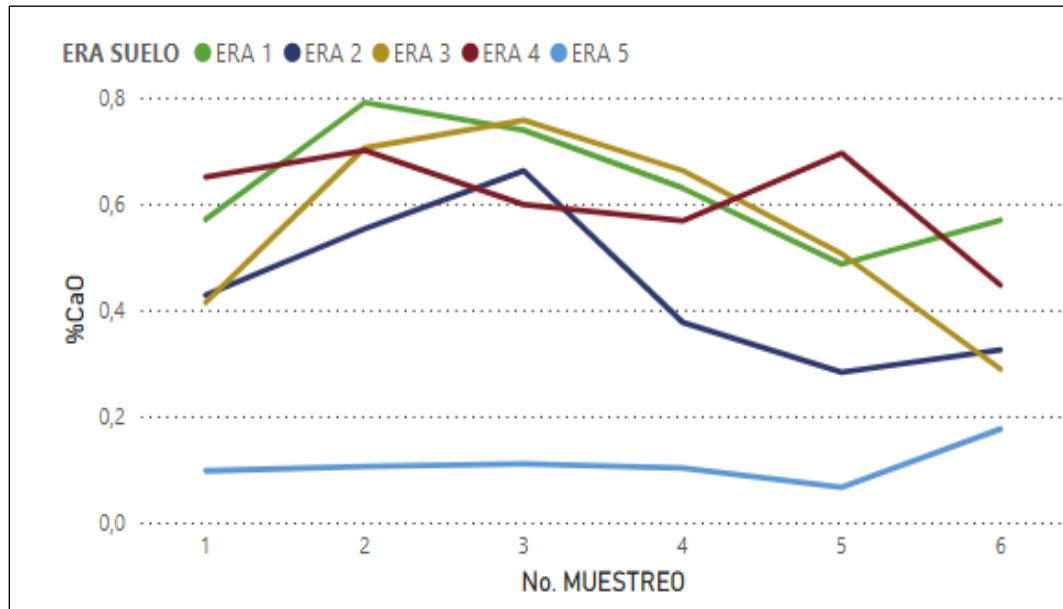


Figura 13 Porcentaje de calcio en forma de % CaO total en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

En cuanto a los elementos menores, esenciales, pero con límites, por su toxicidad en condición de exceso la mejora fue más limitada incluso nula para el caso del azufre y boro, en ninguna de las ERAS se reportó existencia de estos elementos, lo que pudo influir negativamente en el cultivo, dado que una insuficiencia de azufre puede ralentizar el crecimiento y la producción (Fuentes-Lara et al., 2019) y la deficiencia de boro tiene repercusiones la baja calidad, deformidades, cuarteaduras y una disminución en el sabor del fruto o vegetal. (Long & Peng, 2023)

Para el caso de Zn, Cu y Mn mostrados en las **Figura 14**, **Figura 15** y **Figura 16** respectivamente ninguno de los tres alcanza los valores mínimos requeridos para un suelo totalmente sano y representando repercusiones en las paredes celulares, que dan soporte a la planta y con sabores disminuidos.

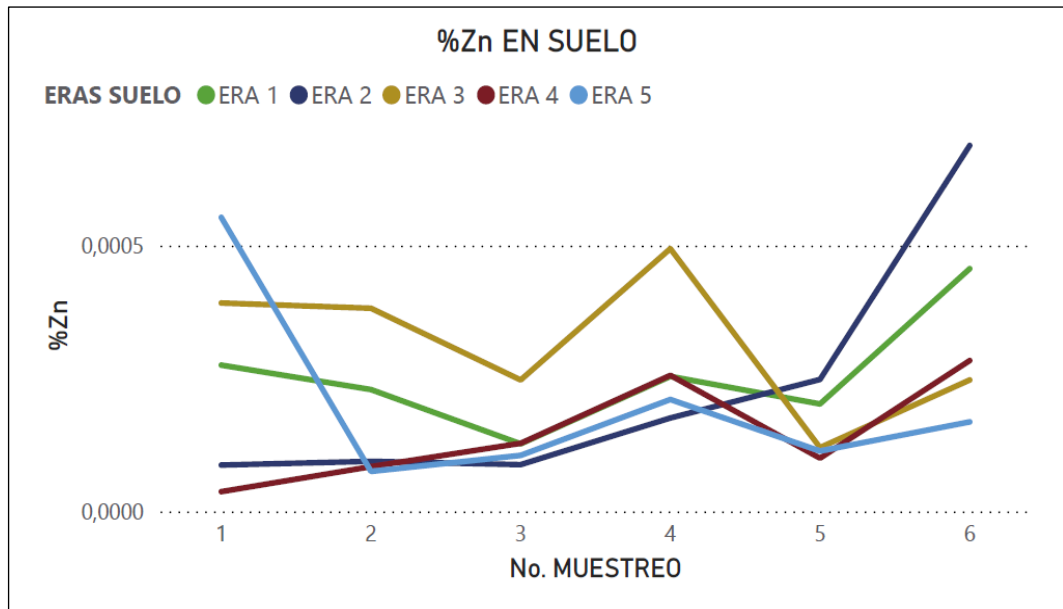


Figura 14 Porcentaje de zinc (Zn) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

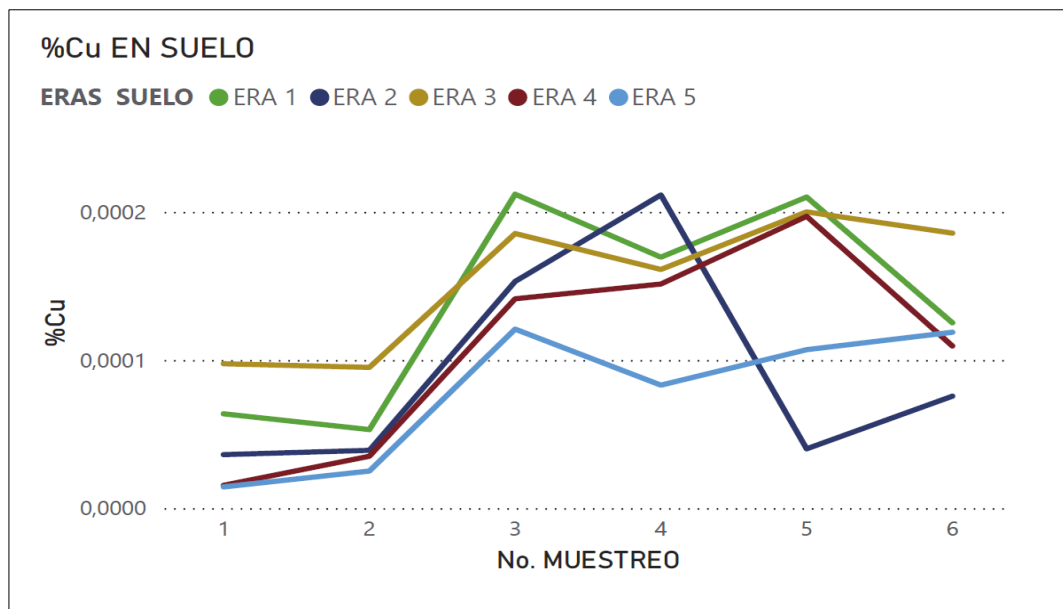


Figura 15 Porcentaje de cobre (Cu) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

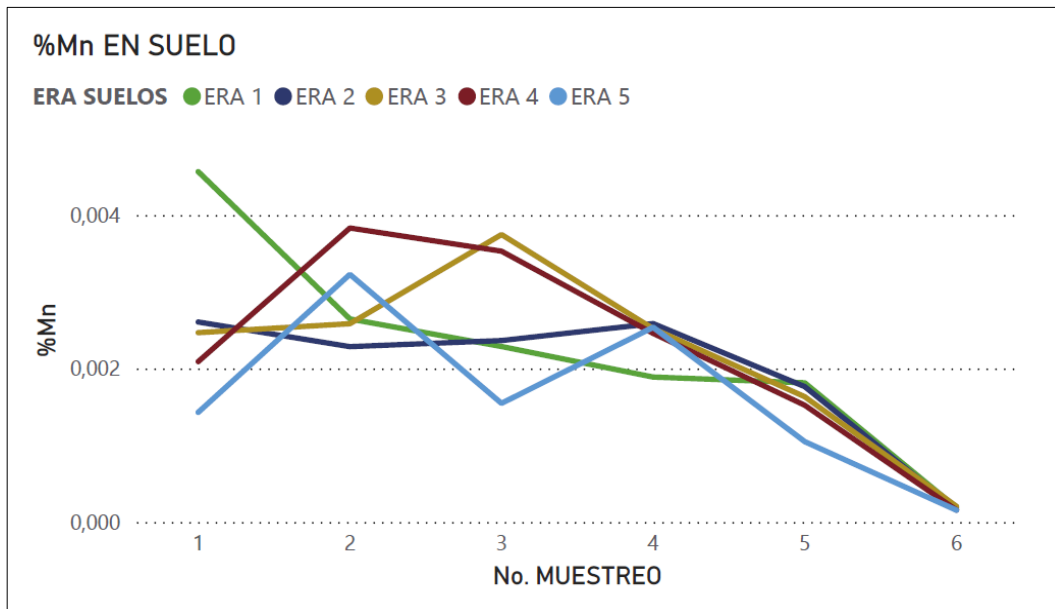


Figura 16 Porcentaje de manganeso (Mn) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

En cuanto al hierro (Fe) **Figura 17** inicialmente el suelo contenía exceso de este elemento, valor que disminuyó considerablemente pero sin alcanzar los valores mínimos sin que pueda representar una toxicidad para la planta, lo que puede significar un crecimiento atrofiado, bronceado en las hojas y reducir la producción de cultivos, la mejora y disminución de la concentración de hierro se atribuye a la elevación del pH inicial, pues en suelos ácidos, la disponibilidad de este aumenta. (Patra et al., 2021).

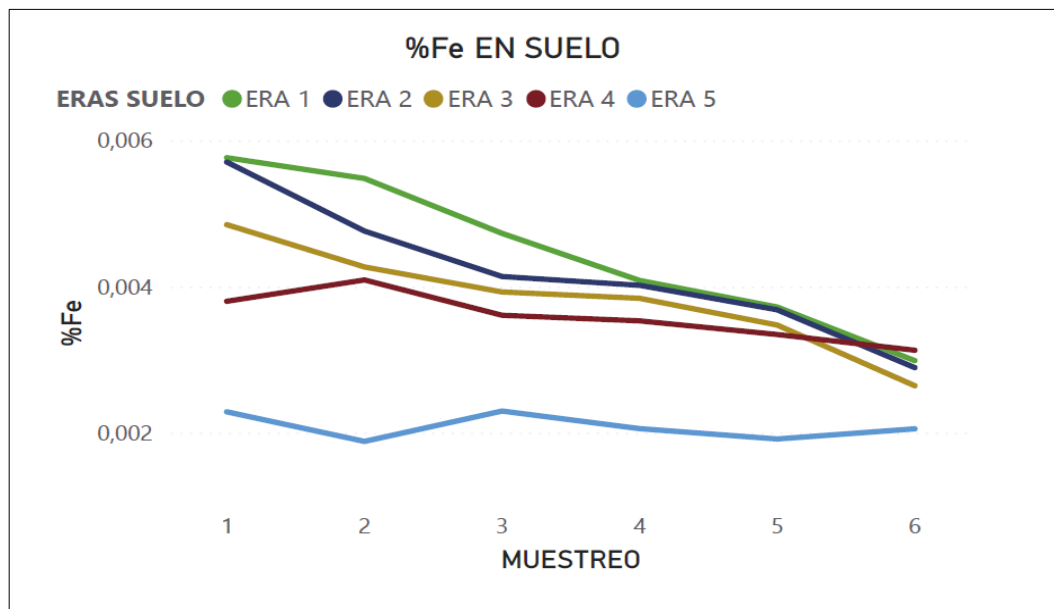


Figura 17 Porcentaje de hierro (Fe) en las 5 ERAS durante los 6 muestreos.

4.2.2. Efecto de las formulaciones, fertilizante comercial y comportamiento del suelo sin fertilizar (testigo).

En términos generales los resultados anteriores describen el comportamiento de los suelos fertilizados y no fertilizado para cada una de las ERAS sembradas. Se evidencia que las fórmulas propuestas en este trabajo aportan una mejoría en los parámetros principales (pH, CIC, CE) y en los elementos mayores o macronutrientes que mejoran la salud y calidad de las plantas y frutos, respectivamente. Aunque se encontraron deficiencias en la concentración de elementos menores, se esperaba que esto no afectara del todo el desarrollo, crecimiento y producción de las plantas y los frutos, en este caso en el frijol. Ahora, teniendo en cuenta los resultados y análisis anteriormente expuestos se hizo la comparación y contrapartida con el análisis morfológico de la planta durante su desarrollo y producción en el rango de tiempo de los 6 muestreos.

4.2.3. Análisis morfológico y foliar de las plantas de las 5 ERAS durante los seis (6) muestreos

Para el análisis de foliar el análisis del porcentaje total de nitrógeno en las plantas para el primer muestreo arrojó un porcentaje entre el 3,5 y 5 % para todas las ERAS siendo la más alta las ERAS 4 y 3. Sin embargo, con el paso del tiempo y los muestreos las ERAS disminuyeron evidentemente, la ERA con un comportamiento constante y que no oscilo significativamente disminuyendo su porcentaje de nitrógeno menor al 3 % fue la ERA número 3, la cual siempre varió entre un rango de 3 a 4,5% en contraste con las otras que en el último muestro tenían un contenido incluso menor al 2,5%, lo que ya representa una deficiencia de este elemento. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2014)

Para el caso del potasio el comportamiento entre ERAS fue disparejo en rangos de 2 a 4 %, la única ERA que presentó deficiencia de este elemento en las plantas fue la número 5, que corresponde al testigo y de la cual no se esperaba un cambio, lo que exhibe una mejoría con las formulaciones propuestas y con el fertilizante comercial.

El fósforo, al contrario del potasio presentó un comportamiento menos variable en los rangos de 0,4 a 0,6% para las ERAS tratadas con fertilizantes, contenido requerido para la plata del frijol que indica un manejo agronómico adecuado. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, n.d.).

En cuanto al calcio y magnesio (Ca y Mg) los rangos oscilaron entre 1 – 3 % para el calcio 0,35 – 0,6 % para el magnesio, rangos favorables para el frijol que deben ser de 2% y de 0,35 – 1,3 % respectivamente (Manickavasagan & Thirunathan, 2020). La ERA número 5 fue la única que tiene valores menores a los requeridos por este cultivo y la ERA con mayor crecimiento fue la fertilizada con la formulación No.1 (ERA 1).

Para los elementos menores no se encontró necesaria la comparación entre las ERAS conforme pasaban los nuestros, debido a la evidencia presentada en el análisis fisicoquímico de suelo donde presentan una escasez marcada.

Acercas de la morfología de la planta, en la **Figura 18** se presenta la altura del tallo de la planta conforme pasaba el tiempo, se exhibe que la ERA 1 fue la que alcanzó la mayor altura, con un valor cercano a los 120 cm, seguida de las ERAS 2, 3 y 4 que alcanzaron una altura similar de 90 – 110 cm.

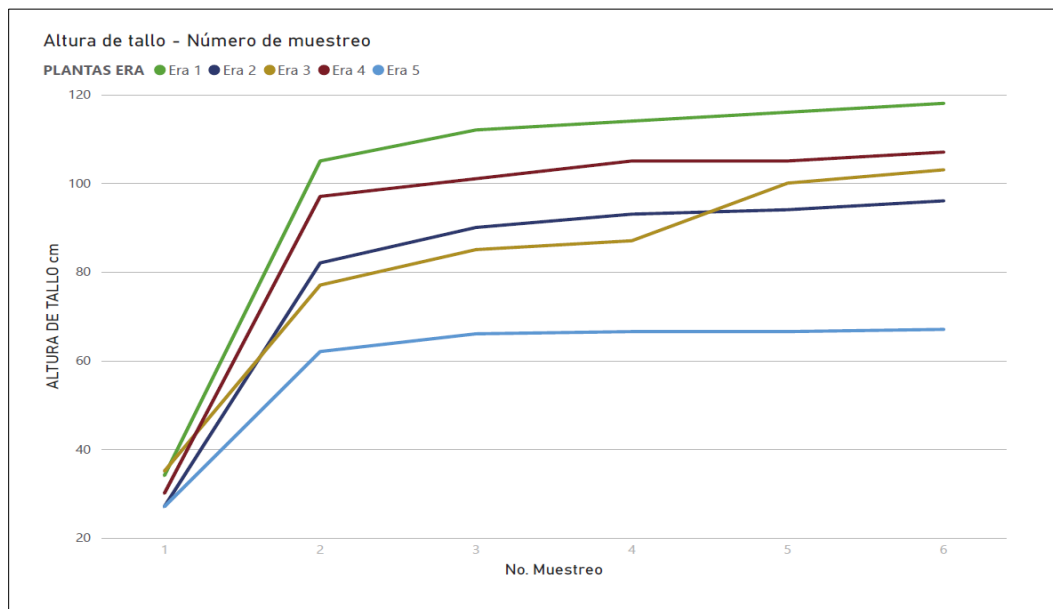


Figura 18 Seguimiento del largo de las plantas de las ERAS en los seis (6) muestreos.

Las ERAS del 1 al 4 alcanzaron un promedio de 30 a 40 hojas en el último muestreo, como se expone en la **Figura 19**. Para el caso de la ERA sin fertilizar se obtuvo un promedio de 25 hojas en el sexto muestreo, lo que indica que no está muy lejos de las otras, por lo que no considera un factor determinante para la selección de la ERA con mejores resultados fisicoquímicos y

morfológicos. Otro parámetro para analizar fue el de número de flores y en este si existe una discrepancia entre la ERA 1 y las demás ERAS como se muestra en la **Figura 20**. La ERA 1 alcanzo entre los muestreos 3 y 4 un promedio por planta de 8 flores mientras que el resto un máximo de 6. La ERA que menos número de flores tuvo, fue la 5 donde su máximo fue 3. Este resultado es importante ya que el número de flores esta correlacionado con el número de vainas, como se evidencia en la **Tabla 7**, es decir, en la producción de fruto.

Figura 18

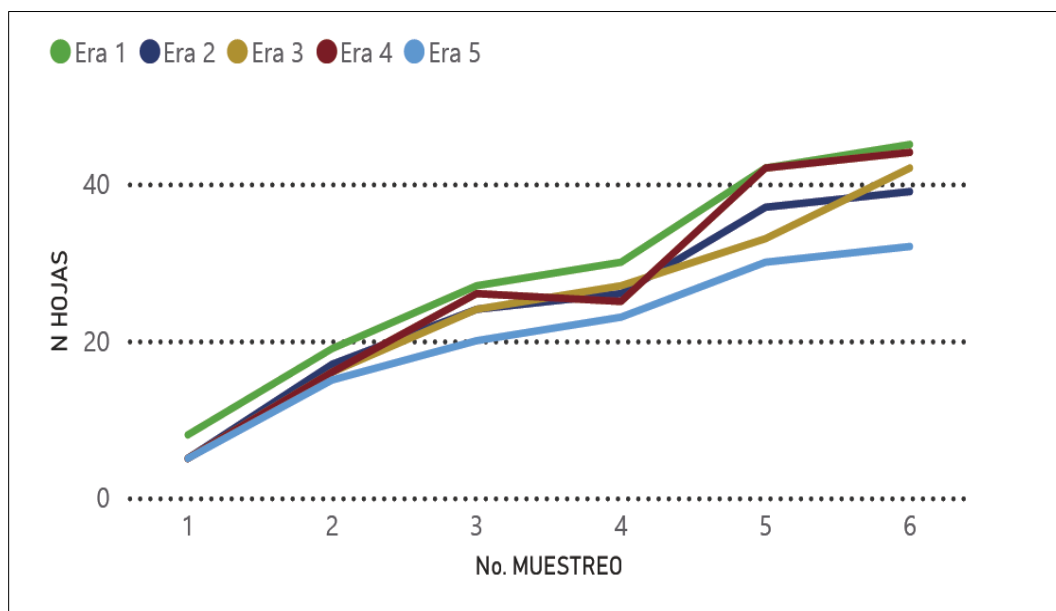


Figura 19 Seguimiento del número de hojas de las plantas de las ERAS en los seis (6) muestreos.

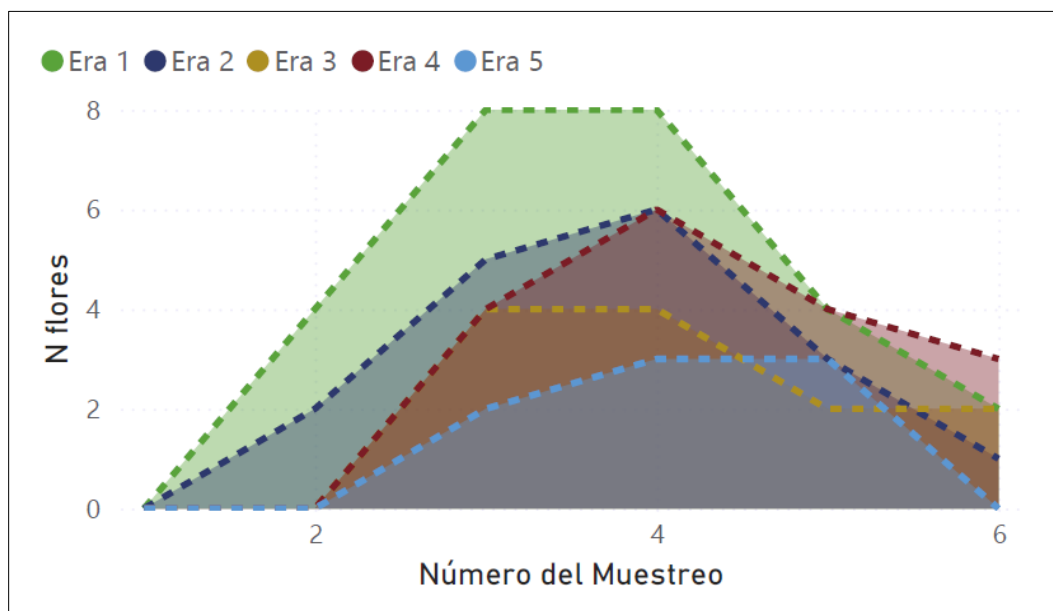


Figura 20 Seguimiento del número de flores de las plantas de las ERAS en los seis (6) muestreos.

ERA	MUESTREOS					
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	4	8	16	18
2	0	0	2	5	11	9
3	0	0	0	4	8	6
4	0	0	0	4	10	9
5	0	0	0	2	5	4

Tabla 7 Número de vainas de cada ERA en cada muestreo

Finalmente, en la **Figura 21** se visualiza una de las plantas de cada ERA transcurridos 2 meses desde la siembra, donde es evidente el crecimiento y vigorosidad de la ERA 1 con respecto a las otras, es por esto que teniendo en cuenta los resultados fisicoquímicos de los suelos, foliares y morfológicos durante los seis muestreos de las 5 ERAS, se seleccionó la ERA 1 y por tanto el fertilizante No. 1 como el más efectivo y con más influencia en la planta de un cultivo de frijol y

fue con este que se trabajó para analizar las relaciones entre las diferentes formas de nitrógeno y el potasio, la aplicación de un método estadístico con el fin de calcular como se podría a futuro mejorar esta fórmula y adicionalmente se realizó un análisis de metales pesados con el fin de descartar contaminaciones.



Figura 21 Fotografía de una planta de cada ERA en la fase final del cultivo de frijol después de dos meses de siembra. De izquierda a derecha ERAS de la 1 a la 5.

4.3. Análisis estadístico para la optimización de la formulación del fertilizante No. 1

```

104
105 # Cantidades totales de los componentes
106 cantidad_total <- sum(result$par)
107
108 # Proporciones relativas de cada componente
109 p_v <- result$par[1] / cantidad_total
110 p_l <- result$par[2] / cantidad_total
111 p_m <- result$par[3] / cantidad_total
112
113 # Calcular los porcentajes de cada componente respecto al total
114 porcentaje_v <- (result$par[1] / cantidad_total)
115 porcentaje_l <- (result$par[2] / cantidad_total)
116 porcentaje_m <- (result$par[3] / cantidad_total)
117
118 # Imprimir los porcentajes
119 cat("Porcentaje del vástago de plátano respecto al total:", porcentaje_v, "%\n")
120
121 cat("Porcentaje de lodolita respecto al total:", porcentaje_l, "%\n")
122
123 cat("Porcentaje de microsienita respecto al total:", porcentaje_m, "%\n")
124
125
126 potasio_total <- porcentaje_v*(K_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(K_l$result$par[2]/cantidad_l) + porcent
127 nitrogeno_total <- porcentaje_v*(N_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(N_l$result$par[2]/cantidad_l) + porce
128 fosforo_total <- porcentaje_v*(P_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(P_l$result$par[2]/cantidad_l) + porcent
129 manganeso_total <- porcentaje_v*(Mn_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(Mn_l$result$par[2]/cantidad_l) + por
130 hierro_total <- porcentaje_v*(Fe_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(Fe_l$result$par[2]/cantidad_l) + porcent
131 cobre_total <- porcentaje_v*(Cu_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(Cu_l$result$par[2]/cantidad_l) + porcent
132 zinc_total <- porcentaje_v*(Zn_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(Zn_l$result$par[2]/cantidad_l) + porcenta
133 boro_total <- porcentaje_v*(B_v$result$par[1] / cantidad_v) + porcentaje_l*(B_l$result$par[2]/cantidad_l) + porcentaje
134

```

```

144:1 (Top Level) >
R Script

```

```

~/
>
>
>
>
> source('~/.active-rstudio-document', encoding = 'UTF-8')
Cantidades óptimas de cada componente:
Vástago de plátano: 378.0444 g
Lodolita: 99.25588 g
Microsienita: 90.68974 g
Porcentaje del vástago de plátano respecto al total: 0.6655828 %
Porcentaje de lodolita respecto al total: 0.1747493 %
Porcentaje de microsienita respecto al total: 0.1596678 %
Potasio total: 2.841235
Nitrógeno total: 4.664404
Fósforo total: 1.395583
Manganeso total: 0.02389579
Hierro total: 1.156346
Cobre total: 0.001709067
Zinc total: 0.008838407
Boro total: 0.001195194

```

Figura 22. Captura de pantalla de RStudio del análisis estadístico de proporciones para la formulación de fertilizante No. 1.

El análisis estadístico realizado en R (**Figura 22**) determinó las cantidades óptimas de cada componente para la formulación del fertilizante No. 1, expresadas tanto en gramos como en porcentajes. Este estudio se basó en los datos obtenidos de muestras de suelo acondicionado,

recolectadas sistemáticamente cada 10 días. el cual demostró los mejores resultados entre todas las formulaciones evaluadas. Los resultados revelaron que la formulación óptima debe contener:

Vástago de Plátano (Péndulo de Plátano): 378.04 g (66.56% de la mezcla) Este componente orgánico constituye la base de la formulación, aportando principalmente potasio y materia orgánica, y actuando como el principal vehículo de nutrientes en el fertilizante.

Lodolita: 99.26 g (17.47% de la mezcla). Este componente mineral, aunque en menor proporción, aporta micronutrientes como hierro y manganeso, complementando la base orgánica de manera secundaria pero esencial. **Microsienita:** 90.69 g (15.97% de la mezcla). Al igual que la lodolita, este mineral, aunque en menor proporción, es clave para equilibrar nutrientes como fósforo y zinc, completando el perfil nutricional del fertilizante.

Esta combinación estratégica de componentes da lugar a un equilibrio, que en el suelo mejorado con el aporte del fertilizante No. 1 proporciona macronutrientes en proporciones de 0.82:0.24:0.50, junto con un suministro controlado de micronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

4.4. Análisis de la relación entre las formas de nitrógeno y la absorción de potasio

Para analizar la relación entre las dos formas en que el nitrógeno es comúnmente absorbido por las plantas, amoniacal (NH_4^+) y nítrica (NO_3^-), y el potasio, se utilizó nuevamente el análisis estadístico RStudio, basado en los datos recolectados de todas las eras (base de datos de los resultados del muestreo foliar cada 10 días en 5 eras diferentes). Se evaluó la correlación entre el porcentaje de potasio foliar (%K) y las fracciones nitrogenadas (%N- NO_3^- y %N- NH_4^+) para identificar patrones de absorción. Para ello, se realizó un análisis de correlación entre las variables y se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple, con el objetivo de estimar tanto la magnitud como la dirección del efecto de cada forma de nitrógeno sobre el contenido de potasio.

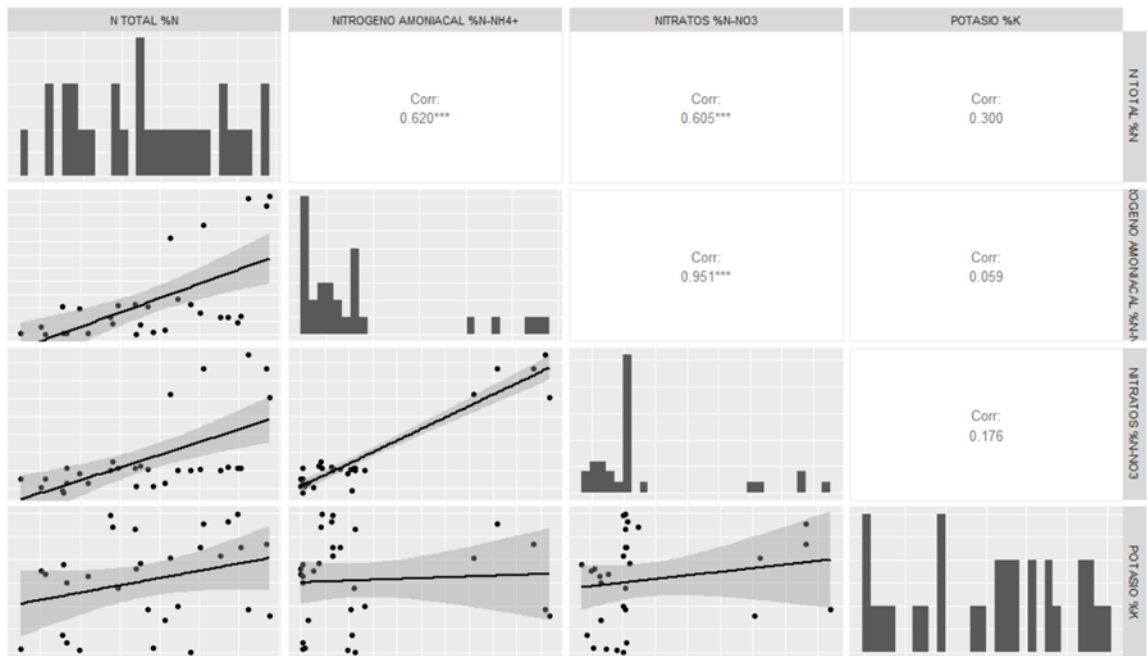


Figura 23. Análisis de correlación entre variables de potasio (%K), nitrógeno nítrico (%N-NO₃⁻) y nitrógeno amoniacal (%N-NH₄⁺)

A partir de la matriz de correlación y los diagramas de dispersión (**Figura 23**), no se evidenciaron correlaciones significativas entre el contenido de potasio y las formas de nitrógeno analizadas, lo que sugiere que la concentración de potasio foliar podría estar influenciada por otros factores no contemplados en este modelo inicial.

Por tal razón se opta por un análisis de **Modelo Cuadrático** como se observa en la gráfica N.23 que describe la relación entre el contenido de potasio (%K) y el nitrógeno amoniacal (%N-NH₄⁺). La ecuación del modelo es:

$$y = 2.12 + 4.92 x - 7.64x^2$$

Ecuación 1. Ecuación cuadrática para la relación de potasio y nitrógeno amoniacal.

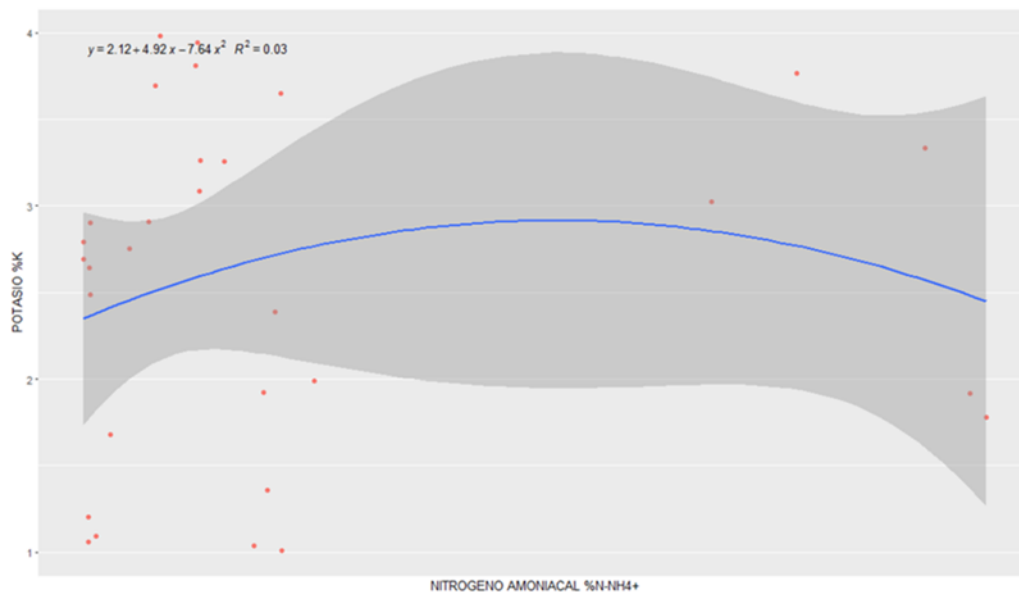


Figura 24. Relación contenida entre el potasio y el nitrógeno amoniacal.

Este modelo cuadrático presentó un coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0,03$), indicando que únicamente explica el 3 % de la variabilidad observada en el contenido de potasio, lo cual sugiere una relación muy débil entre ambas variables.

Ante estos resultados, se procedió a realizar un **análisis multivariado** con el objetivo de determinar el efecto conjunto del nitrógeno en sus formas amoniacal ($\%N-NH_4^+$) y nítrica ($\%N-NO_3^-$) sobre el contenido de potasio ($\%K$) en las hojas de frijol. El modelo ajustado presentó la siguiente forma:

Este nuevo modelo mostró un mejor ajuste en comparación con los anteriores, indicando que las variables consideradas en conjunto son buenos predictores del contenido de potasio foliar. Además, los resultados reflejan una **relación antagónica** entre el potasio y el nitrógeno en su forma amoniacal, y una **relación sinérgica** entre el potasio y el nitrógeno en forma de nitratos. Lo anterior es expresado en la **Ecuación 2**.

$$\%K = 2.2070 - 6.7746 (\%N-NH_4^+) + 5.6220 (\%N-NO_3^-)$$

Ecuación 2. Relación entre el contenido de potasio, el nitrógeno amoniacal y nitrato.

```
Call:
lm(formula = "POTASIO %K" ~ "NITROGENO AMONICAL %N-NH4+" + "NITRATOS %N-NO3",
    data = DPO_N)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.8426 -0.3898  0.0677  0.6064  1.3719

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    2.2070    0.2774   7.957 1.49e-08 ***
`NITROGENO AMONICAL %N-NH4+` -6.7746    3.4392  -1.970  0.0592 .
`NITRATOS %N-NO3`    5.6220    2.5797   2.179  0.0382 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.9175 on 27 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1526,    Adjusted R-squared:  0.08983
F-statistic: 2.431 on 2 and 27 DF,  p-value: 0.1069
```

Figura 25. Análisis multivariado

Este nuevo modelo mostró mejores resultados que los anteriores, indicando que las variables estudiadas en conjunto son buenas predictoras y denotan la relación antagónica existente entre el potasio y nitrógeno amoniacal y la relación sinérgica existente entre el potasio y el nitrógeno como nitratos.

4.5. Análisis adicionales de metales pesados

Adicionalmente, al fertilizante no. 1 se analizó el contenido de metales pesados resumidos en la (**Tabla 8**) concluyendo que no existe presencia relevante, ni peligrosa de metales pesados en el cultivo del frijol, por ende, la formulación está libre de este tipo de contaminaciones.

Tabla 8. Contenido de metales pesados presentes en el sexto muestreo de la ERA 1, fertilizada con la formulación No. 1

Metales pesados	Metodología	5	mg/Kg máximo permitido según norma 5167	Límite mínimo cuantificable técnica
As	Absorción Atómica, NTC 5167:2022	<0,001	41	<0,001
Cd	Absorción Atómica, NTC 5167:2022	<0,008	39	<0,008
Cr	Absorción Atómica, NTC 5167:2022	<0,100	1200	<0,100
Hg	Absorción Atómica, NTC 5167:2022	0,0015	17	<0,001
Pb	Absorción Atómica, NTC 5167:2022	<0,100	20	<0,100

Finalmente, al revisar la resolución del ICA para Abonos Orgánicos Minerales, se encuentra que de acuerdo con la Norma Técnica Colombia 5167:2022 se definen los valores de los análisis fisicoquímicos requeridos para los “Productos para la industria agrícola. Productos Orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo” (Norma Técnica Colombiana, 2022), el fertilizante propuesto le falta cumplir con algunos parámetros, para poder adquirir y pensar en la idea de la comercialización, sin embargo, es una buena y económica alternativa para el sector agrícola y la comunidad, además de ser amigable con el medio ambiente.

5. Conclusiones

A través del análisis estadístico realizado con el código R, se determinó que la proporción óptima para la formulación del fertilizante orgánico-mineral está compuesta de un 66,56% de pedúnculo de plátano, 17,47% de lodolita y 15,97% de Microsienita. Esta combinación permitió maximizar la eficacia del fertilizante, asegurando un balance adecuado entre los componentes orgánicos y minerales, lo que resultó en un producto que mejora significativamente las propiedades del suelo y el crecimiento del cultivo de frijol. La reducción de los componentes minerales a una quinta parte del total del fertilizante demostró ser suficiente para aportar los nutrientes necesarios sin sobrecargar el suelo con minerales.

El estudio evidenció una relación compleja entre las formas del nitrógeno (amoniaco y nítrico) y el potasio en el suelo. Se observó que el nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) tiene un efecto inhibitorio sobre la absorción de potasio (K^+), lo que sugiere un antagonismo entre estas iones. Por otro lado, el nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-) mostró una influencia positiva en la disponibilidad de potasio. Esta interacción fue modelada matemáticamente, y se obtuvo una ecuación multivariable que describe cómo el potasio en el suelo está influenciado negativamente por la presencia de amonio y positivamente por la presencia de nitrato. Este hallazgo es crucial para entender la dinámica de absorción de nutrientes en el cultivo de frijol y para optimizar futuras formulaciones de fertilizantes.

La efectividad del fertilizante elaborado (ERA1), formulado con Microsienita, lodolita y biomasa, demostró ser más efectivo que el fertilizante comercial en varios aspectos clave. En primer lugar, mejoró significativamente el pH del suelo, llevándolo a un rango neutro (6.5-7.5), lo

que favorece la disponibilidad de nutrientes y reduce la toxicidad por aluminio y manganeso. Además, el fertilizante propuesto aumentó la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la conductividad eléctrica (CE) del suelo, indicadores importantes para la fertilidad del suelo. En términos de crecimiento del cultivo, las plantas tratadas con el fertilizante propuesto mostraron un mayor número de flores y vainas, así como un crecimiento más vigoroso en comparación con las tratadas con el fertilizante comercial. Estos resultados sugieren que el fertilizante orgánico-mineral no solo es una alternativa viable, sino también superior en términos de eficacia y sostenibilidad.

Finalmente, el fertilizante orgánico-mineral desarrollado en este estudio demostró ser una alternativa efectiva y sostenible para reemplazar los fertilizantes químicos convencionales. Aunque el fertilizante comercial mostró un buen desempeño en algunos parámetros, como el contenido de fósforo, el fertilizante propuesto superó en la mayoría de los indicadores de crecimiento y salud del cultivo. Además, el análisis de metales pesados confirmó que el fertilizante propuesto está libre de contaminantes, lo que lo hace seguro para su uso en la agricultura. Sin embargo, para su comercialización, es necesario ajustar algunos parámetros fisicoquímicos según la normativa colombiana (NTC 5167:2022). En conclusión, este fertilizante representa una opción económica, ecológica y eficaz para pequeños y medianos productores, contribuyendo a reducir la dependencia de insumos químicos y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

6. Recomendaciones

Realizar un estudio exhaustivo y profundo en la relación de potasio y las formas de nitrógeno, recolectando mayores datos para poder modelar matemáticamente la relación entre estos dos elementos y sus efectos inhibitorios y favorecedores, con el propósito de ampliar el conocimiento y ofrecer alternativas para cultivos con deficiencias de estos.

Experimentar con otras materias primas orgánicas y minerales, con el fin de fortalecer la industria agrícola y encontrar suplir los elementos que no tuvieron mejoría en este trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Ahmad, S., & Islam, N. (2022). Major and trace elements geochemistry of metasedimentary rocks from Bomdila Group, Arunachal Pradesh, NE Lesser Himalaya: Paleo-weathering, provenance and tectonic setting. *International Journal of Engineering Research and Applications Wwww.Ijera.Com*, 12, 100–113. <https://doi.org/10.9790/9622-1210100113>
- Barman, U., & Choudhury, R. D. (2020). Soil texture classification using multi class support vector machine. *Information Processing in Agriculture*, 7(2), 318–332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.08.001>
- DANE. (2023). *Boletín Estadístico: Sectorial Agropecuario 2023*.
- Devrim Coskun, Dev T. Britto, & Herbert J. Kronzucker. (2015). The nitrogen-potassium intersection membranes, metabolism and mechanism. *Plant, Cell and Environment*.
- European Union. (2024). *Glossary_Fertiliser - Statistics Explained*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Fertiliser>
- FAO. (2022). *ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE LA FERTILIZACIÓN DE SUELOS Y NUTRICIÓN VEGETAL*. https://dgroups.org/fao/soil_lac
- Fuentes-Lara, L. O., Medrano-Macías, J., Pérez-Labrada, F., Rivas-Martínez, E. N., García-Enciso, E. L., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Rincón-Sánchez, F., & Benavides-Mendoza, A. (2019). From elemental sulfur to hydrogen sulfide in agricultural

- soils and plants. In *Molecules* (Vol. 24, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules24122282>
- Gowhar Hamid Dar, Rouf Ahmad Bhat, Mohammad Aneesul Mehmood, & Khalid Rehman Hakeem. (2021). *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2* (1st ed., Vol. 2).
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2003). *Fertilizante*. <https://www.ica.gov.co/el-ica/glosario/f/fertilizante>
- Jiaying, M., Tingting, C., Jie, L., Weimeng, F., Baohua, F., Guangyan, L., Hubo, L., Juncai, L., Zhihai, W., Longxing, T., & Guanfu, F. (2022). Functions of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Energy Status and Their Influences on Rice Growth and Development. *Rice Science*, 29(2), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005>
- Lapaz, A. de M., Yoshida, C. H. P., Gorni, P. H., de Freitas-Silva, L., Araújo, T. de O., & Ribeiro, C. (2022). Iron toxicity: effects on the plants and detoxification strategies. In *Acta Botanica Brasilica* (Vol. 36). Sociedade Botanica do Brasil. <https://doi.org/10.1590/0102-33062021abb0131>
- Long, Y., & Peng, J. (2023). Interaction between Boron and Other Elements in Plants. In *Genes* (Vol. 14, Issue 1). NLM (Medline). <https://doi.org/10.3390/genes14010130>
- Manickavasagan, A., & Thirunathan, P. (2020). Pulses: Processing and product development. In *Pulses: Processing and Product Development*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41376-7>
- McGrath, J. M., Spargo, J., & Penn, C. J. (2014). Soil Fertility and Plant Nutrition. In *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 166–184). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7>

- Moody, P. W. ., & Phan, T. Cong. (2008). *Soil constraints and management package (SCAMP) : guidelines for sustainable management of tropical upland soils*. Australian Centre for International Agricultural Research.
- Norma Técnica Colombiana. (2022). *NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5167 PRODUCTOS PARA LA INDUSTRIA AGRÍCOLA. PRODUCTOS ORGÁNICOS USADOS COMO ABONOS O FERTILIZANTES Y ENMIENDAS O ACONDICIONADORES DE SUELO*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (n.d.). *El SUELO*. Retrieved February 22, 2025, from <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s04.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2014). *Manejo agronómico del frijol*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2016). *Uso de la tierra en la agricultura según las cifras _Alimentación y agricultura sostenibles*. <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/>
- Pahalvi, H. N., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B., & Kamili, A. N. (2021). Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. In G. H. Dar, R. A. Bhat, M. A. Mehmood, & K. R. Hakeem (Eds.), *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs* (pp. 1–20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1
- Parikh, S. J., & James, B. R. (2012). *Soil_ The Foundation of Agriculture*. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-the-foundation-of-agriculture-84224268/>

Patra, A., Sharma, V. K., Jatav, H. S., Dutta, A., Rekwar, R. K., Chattopadhyay, A., Trivedi, A., Mohapatra, K. K., & Anil, A. S. (2021). Chapter 19 - Iron in the soil–plant–human continuum. In T. Aftab & K. R. Hakeem (Eds.), *Frontiers in Plant-Soil Interaction* (pp. 531–546). Academic Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90943-3.00009-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90943-3.00009-2)

Soil Science Society of America. (2015). *Soils Support Agriculture*. www.soils.org/IYS

USDA Natural Resources Conservation Service. (2011). *Soil Quality Indicators Soil Electrical Conductivity*.