

Diferencias entre un método convencional y otro con SIG para diagnóstico de NPK en un suelo del Valle del Cauca

Carlos Mauricio Mejía Álvarez

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica.

Manizales, 2024

Resumen

El problema central del presente estudio parte de la falta de conocimiento acerca de la variabilidad del suelo en cultivos extensivos de caña de azúcar, lo que conduce a prácticas agronómicas ineficientes, especialmente en términos de fertilización. El objetivo es identificar las principales diferencias entre un método convencional de diagnóstico generalizado de nutrientes en el suelo y un enfoque respaldado en un sistema de información geográfica que considera la variabilidad en la disponibilidad de nutrientes del suelo de un predio cultivado tradicionalmente con caña de azúcar. Entre otros objetivos se plantea establecer las diferencias en la disponibilidad de nutrientes obtenidas a través de ambos métodos y representar su variabilidad espacial a través de sistemas de información geográfica. La justificación se basa en la importancia de la nutrición vegetal dentro del proceso productivo de la caña de azúcar y la necesidad de suministrar los minerales necesarios de acuerdo con la variabilidad espacial de los mismos en el suelo y su extracción por parte del cultivo para garantizar una mayor productividad y sostenibilidad agrícola. Se destaca el uso de herramientas de agricultura de precisión para evaluar la variabilidad del suelo y mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes. Además, señala la importancia de contar con cartografía actual y detallada del suelo mediante el uso de sistemas de información geográfica apoyado en imágenes satelitales.

Palabras clave: Agricultura de precisión, manejo de nutrientes específico por sitio, variabilidad espacial, diagnóstico del suelo, disponibilidad de nutrientes, sistemas de información geográfica.

Abstract

The central problem of the present study is based on the lack of knowledge about soil variability in extensive sugarcane crops, which leads to inefficient agronomic practices, especially in terms of fertilization. The objective is to identify the main differences between a conventional method of generalized diagnosis of nutrients in the soil and an approach supported by a geographic information system that considers the spatial variability in the availability of nutrients in the soil of a property traditionally cultivated with sugar cane. Among other objectives, it is proposed to establish the differences in nutrient availability obtained through both methods and represent their spatial variability through geographic information systems. The justification is based on the importance of plant nutrition within the sugarcane production process and the need to supply the necessary minerals according to their spatial variability in the soil and their extraction by the crop to guarantee a greater productivity and sustainability. The use of precision agriculture tools is highlighted to evaluate soil variability and improve efficiency in the use of fertilizers. In addition, it points out the importance of having current and detailed soil mapping through the use of geographic information systems supported by satellite images.

Keywords: Precision agriculture, site-specific nutrient management, spatial variability, soil diagnosis, nutrient availability, fertilizers, geographic information system.

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	7
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	8
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
2. OBJETIVOS.....	12
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. ANTECEDENTES	13
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	20
5. REFERENTE TEÓRICO.....	23
5.1. <i>Fertilidad del suelo.....</i>	<i>23</i>
5.1.1. <i>Propiedades químicas del suelo</i>	<i>23</i>
5.1.2. <i>Diagnóstico, muestreo y análisis de las propiedades del suelo</i>	<i>25</i>
5.2. <i>Agricultura de precisión.....</i>	<i>27</i>
5.2.1. <i>Variabilidad del suelo.....</i>	<i>28</i>
5.2.2. <i>Manejo específico por sitio.....</i>	<i>29</i>
5.2.3. <i>Fertilización con tasa variada.....</i>	<i>29</i>
5.2.4. <i>Geoestadística y sistemas de información geográfica.....</i>	<i>30</i>
5.2.5. <i>Mapeo de suelos</i>	<i>30</i>
5.2.6. <i>Imágenes satelitales y sensoramiento remoto</i>	<i>31</i>
6. METODOLOGÍA	32
6.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	34
6.2. TIPO DE ESTUDIO	34
6.3. PROCEDIMIENTO.....	35
6.3.1. <i>Fase 1. Definición y reconocimiento del área de estudio</i>	<i>35</i>
6.3.2. <i>Fase 2. Muestreo y análisis de suelo</i>	<i>38</i>
6.3.3. <i>Fase 3. Representación de los resultados analíticos de cada método</i>	<i>41</i>
7. RESULTADOS.....	45
8. CONCLUSIONES.....	54
9. RECOMENDACIONES.....	55
10. REFERENCIAS.....	59

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.	9
Figura 2.	34
Figura 3.	34
Figura 4.	36
Figura 5.	38
Figura 6.	39
Figura 7.	40
Figura 8.	42
Figura 9.	48
Figura 10.	49
Figura 11.	50
Figura 12.	51
Figura 13.	52
Figura 14.	53

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.	35
Tabla 2.	37
Tabla 3.	41
Tabla 4.	45
Tabla 5.	46
Tabla 6.	46
Tabla 7.	47
Tabla 8.	53

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

Durante años, las practicas agronómicas y los avances tecnológicos han ejercido una gran influencia en el manejo de los recursos naturales e insumos, contribuyendo directamente al mejoramiento de la producción agrícola en diferentes sistemas de cultivo. La producción agrícola es el producto de la interacción de múltiples factores entre los que se encuentra la aplicación de prácticas de diagnóstico para la toma de decisiones durante los ciclos productivos de los cultivos.

El desconocimiento de aspectos como la variabilidad del suelo en cultivos extensivos y de alto valor, conduce a un manejo generalizado e ineficiente de las prácticas agronómicas entre las cuales se encuentra la fertilización. El cultivo tecnificado de la caña de azúcar en Colombia ocupa una extensión aproximada de 245,000 hectáreas, en las que se producen en promedio 14 t/ha de azúcar al año, demandando una gran cantidad de insumos y recursos altamente costosos.

Teniendo en cuenta lo anterior, la identificación de los nutrientes disponibles en los suelos se convierte en una preocupación constante de los agricultores en la zona productiva de caña. Aquellos que tienen grandes extensiones de cultivos pueden aprovechar mejor los recursos, optimizar los procesos productivos, elaborar planes de fertilización ajustados a la disponibilidad y requerimiento del cultivo sin afectar el medio ambiente.

1.1 Descripción del área problemática

Dentro de los principales parámetros para el establecimiento de un sistema agrícola, la nutrición vegetal cobra gran importancia. El suministro de nutrientes de forma balanceada y precisa es un requerimiento para el desarrollo sustentable de la agricultura que produce alimentos y derivados con el propósito de alcanzar una seguridad alimentaria estable. Sin embargo, la aplicación de nutrientes de manera generalizada en suelos heterogéneos puede generar desbalances causados por excesos en zonas de alta disponibilidad o déficit en las zonas de disponibilidad baja. Esto puede reducir el potencial productivo de las especies causando además impactos negativos en la salud del suelo o el medio ambiente (Mittermayer et al. 2021).

En este sentido, la nutrición específica del suelo y de los cultivos incrementa la productividad agrícola asegurando una máxima absorción de nutrientes por las plantas y al mismo tiempo reduciendo las pérdidas de nutrientes al ambiente. Muchas zonas de cultivo muestran variaciones espaciales en los rendimientos y la absorción de Nitrógeno (N) de los cultivos debido a diferencias en las pendientes y topografía (Hatfield 2000; Godwin et al. 2003). El suelo, la textura, la capacidad de agua disponible, el pH, el contenido de humus y los nutrientes pueden variar considerablemente dentro de un área pequeña, incluso en campos que han sido cultivados uniformemente durante muchos años (Hülsbergen 2003; López-Lozano et al. 2010; Servadio et al. 2017).

El empleo de herramientas de agricultura de precisión para determinar la fertilidad de los suelos permite visualizar la disponibilidad de elementos nutricionales ligados a la fertilidad, considerando la variabilidad espacial. En suelos donde la fertilidad es insuficiente, el empleo de nuevos métodos de diagnóstico puede ser de gran utilidad para definir tasas diferenciadas de

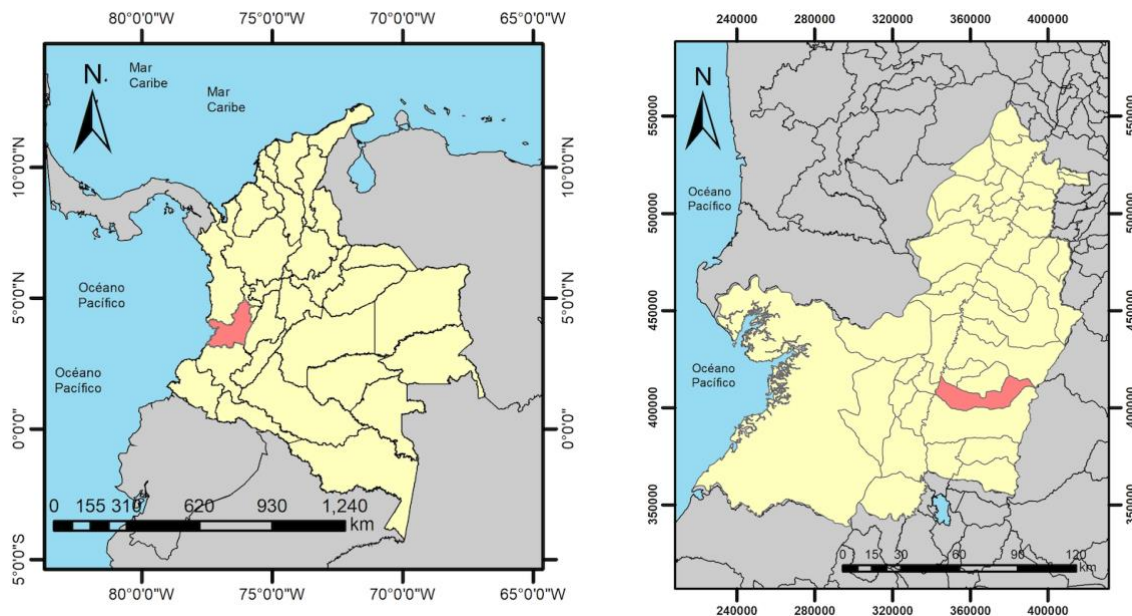
nutrientes con el propósito de reducir factores limitantes, disminuir las pérdidas relacionadas con la nutrición, incrementar la eficiencia nutricional para los cultivos, mejorar la salud de los suelos y el ambiente.

En Colombia, el sector agroindustrial de la caña de azúcar se concentra en más de 50 municipios de 5 departamentos (Valle, Cauca, Risaralda, Caldas y Quindío) a lo largo del valle del río Cauca. El área cultivada es heterogénea respecto a sus condiciones de suelo y clima.

El presente trabajo se realizó con base en la información obtenida durante la etapa de diagnóstico de suelo de un bloque de cultivo de caña de la finca La Merced, zona rural del municipio El Cerrito, ubicado en el centro sur del departamento del Valle del Cauca, cuyo territorio cuenta con diferentes tipos de suelo y sobre todo, diferentes aptitudes agrícolas para una gran variedad de cultivos.

Figura 1.

Ubicación del municipio El Cerrito, Valle del Cauca



Fuente: elaboración propia ArcMap versión 10,8

1.2 Formulación del problema

Durante años, las prácticas convencionales para el diagnóstico de nutrientes del suelo agrícola han permitido obtener información clave para la nutrición vegetal. Del mismo modo, la productividad de los cultivos tecnificados depende de un buen diagnóstico y de un manejo nutricional integrado, en el que se considera fundamentalmente los requerimientos del cultivo, la disponibilidad de los nutrientes en el suelo y la diferencia entre estos dos aspectos para definir las cantidades necesarias de nutrientes que puedan suplir la demanda del cultivo de acuerdo con el potencial de aporte natural del suelo. Sin embargo, debido a múltiples factores, la disponibilidad de los nutrientes y las propiedades del suelo son muy variables, impidiendo determinar un suministro balanceado y ajustado a las condiciones particulares de cada suelo. Actualmente, con los avances tecnológicos se ha venido desarrollando nuevas metodologías de diagnóstico que permiten distinguir algunas características con mayor precisión del suelo. De acuerdo con lo anterior, con el presente trabajo se propone identificar algunas diferencias entre las metodologías disponibles que permiten destacar los beneficios de las nuevas herramientas y tecnologías enfocadas al mejoramiento de la productividad agrícola.

¿Se puede determinar las diferencias entre una metodología de diagnóstico nutricional convencional del suelo realizada a partir de muestreos de suelo generalizados, por una que permita considerar y visualizar la variabilidad espacial de las principales propiedades del mismo suelo apoyada a su vez en herramientas de información geográfica?

1.3 Justificación

Debido a las condiciones agro-edafoclimáticas y los avances tecnológicos, la agroindustria de la caña de azúcar de Colombia presenta los mayores indicadores de productividad a nivel mundial. Mantener este sistema productivo, sostenible, rentable y en continuo progreso requiere la implementación de enfoques de manejo que consideren la variabilidad de los factores de producción, con especial énfasis en el suelo. Implementar el enfoque de agricultura de precisión basado en la variabilidad del suelo puede ser una alternativa viable para aumentar la eficiencia en el uso de insumos y la rentabilidad.

Sin embargo, el desarrollo de este enfoque implica la disponibilidad de cartografía de suelos detallada. Obtener cartografía de este tipo con métodos tradicionales es un proceso lento y costoso, de allí la importancia de explorar técnicas alternativas como el sensoramiento remoto en combinación con prácticas mejoradas de muestreo de suelo, que permitan proyectar los contenidos de los nutrientes a través de cartografía digital, simple y fácil de interpretar para que los agricultores puedan gestionar planes de manejo variables, económicamente eficientes y ambientalmente sostenibles.

2. Objetivos

1.4 Objetivo general

Identificar y comparar las principales diferencias entre los valores de macronutrientes NPK de un suelo a partir de un método de muestreo aleatorio y de otro apoyado en herramientas de agricultura de precisión para un cultivo de caña de azúcar en El Cerrito, Valle del Cauca.

1.5 Objetivos específicos

- Determinar los valores de las variables químicas NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) de los análisis de suelo a través de dos métodos diferentes de diagnóstico.
- Comparar los valores de NPK encontrados en los análisis de suelo obtenidos a partir de cada método de diagnóstico.
- Visualizar la variabilidad espacial de los valores de NPK en el suelo para ambos métodos de diagnóstico.

3. Antecedentes

Se ha venido realizando estudios similares en diversos lugares para poder determinar cuáles son las metodologías apropiadas que ayuden a caracterizar diferentes propiedades en el suelo agrícola y emplear racionalmente los recursos para el desarrollo de una agricultura sostenible y productiva.

Las propiedades del suelo presentan diferentes grados de variabilidad, la cual es el resultado de factores como material parental, clima, organismos, topografía y tiempo, así como de procesos de formación como translocaciones, adiciones, transformaciones y remociones de materiales (Valle, 2014). De acuerdo con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2013, conocer las características del suelo es de vital importancia para tomar cualquier decisión con respecto a su uso, por ello, realizar un buen análisis de suelo es una guía importante para poder diagnosticar sus condiciones, lo cual permitirá una planificación más precisa de todas y cada una de las actividades y el manejo que se le debe dar. El método de muestreo en los suelos depende de la variabilidad existente. El análisis de suelos es una práctica clave para aumentar la eficiencia del manejo de nutrientes en la agricultura. Desde principios del siglo XX, se han desarrollado métodos cada vez más sofisticados para describir y manipular la variabilidad espacial inherente en las propiedades químicas del suelo dentro del ámbito de la estadística clásica y espacial. En este artículo, Lawrence PG, et al. (2020) revisaron dos métodos de muestreo de suelos: el clásico basado en diseño y el geoestadístico, para proponer estrategias de muestreo alineadas con los objetivos de manejo agronómico en cultivos anuales. Compararon las recomendaciones actuales en EE. UU. con la literatura revisada por pares, encontrando variabilidad en los tamaños de muestra, profundidades, número de núcleos y diseños. Los nutrientes móviles, como el NO₃, a

menudo no se consideran en el manejo específico del sitio, mientras que los nutrientes no móviles, como el P, presentan estructuras espaciales inconsistentes. Se sugiere el muestreo basado en diseño por su simplicidad y costo, aunque el protocolo actual debe modificarse para ser más aleatorio y adecuado para variables con distribución logarítmica normal. El artículo también recomienda enfoques estructurados para delinear zonas de manejo y listar variables de confusión.

De otro lado, estudios se han encargado de la elaboración de mapas para caracterizar la variabilidad espacial de los atributos del suelo ayuda en la planificación estratégica y la toma de decisiones de los gerentes agrícolas. De acuerdo con Nélide E. et al, en 2018, la precisión de los mapas está relacionada con la densidad de muestreo ideal para caracterizar el patrón de variabilidad. Ellos realizaron un estudio con el objetivo de identificar la densidad de muestreo para representar la variabilidad de la calidad física del suelo utilizando atributos con diferentes magnitudes de variación en un área cultivada con café. Según sus resultados, para elaborar los mapas de variabilidad con hasta un 15 % de error y atributos del suelo con un coeficiente de variación cercano al 50 %, se sugiere una densidad de muestreo de 3 puntos ha⁻¹.

En especies de pastos en Brasil, Otavio D. et al, (2020) realizaron un estudio en Brasil sobre la variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo y su impacto en el rendimiento de la hierba Tifton 85. El experimento se llevó a cabo en una granja de 3,91 hectáreas, donde se muestrearon suelos de dos capas (0-0.20 m y 0.20-0.40 m) en 50 puntos georreferenciados. Se analizaron parámetros químicos del suelo como pH, Al⁺³, Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, P, H⁺Al y carbono orgánico total (TOC), así como el rendimiento de materia seca (DMY) de Tifton 85, que tuvo un promedio de 2248 kg ha⁻¹. Los resultados mostraron correlaciones significativas entre DMY y los parámetros Na⁺, Ca⁺², TOC y H⁺Al, lo que indica su relevancia en el rendimiento de

la hierba. El mapeo de estos atributos es esencial para entender la variabilidad en el rendimiento de Tifton 85 y debe complementarse con el desarrollo de mapas de atributos químicos del suelo. Así es como Baquero (2023), con su trabajo exploró diferentes posibilidades para encontrar una relación en la información cartográfica digital y el manejo de muestras de laboratorio de suelo para generar información de mayor calidad al momento de identificar la distribución y nutrientes del suelo en áreas de uso agrícola. Según su investigación, a partir de estos resultados, se podrá gestionar, de manera más eficiente, la aplicación de insumos agrícolas que, en muchas ocasiones, generan gastos innecesarios y así contribuir en la reducción de fertilizantes de síntesis química aplicados.

Vanessa C. et al. (2018) desarrollaron y probaron una metodología para evaluar la calidad del muestreo en cuadrícula en plantaciones de café (*Coffea arabica*) en Brasil. El estudio se realizó en tres áreas de 112, 50 y 26 hectáreas, donde se establecieron 224, 100 y 52 puntos georreferenciados, respectivamente, para analizar propiedades químicas del suelo como fósforo, potasio, calcio y magnesio. Se introdujeron tres índices: el índice de exactitud estandarizado (SAI), el índice de precisión estandarizado (SPI) y el indicador de cuadrícula óptima estandarizada (SOGI), para evaluar la calidad del muestreo. La metodología permitió identificar la cuadrícula más representativa para las propiedades estudiadas. Se concluyó que el muestreo georreferenciado con 2 puntos por hectárea es el más recomendado para la caficultura de precisión en las condiciones del estudio.

Otras investigaciones como la de Eduardo Leonel Bottega et al. (2022), estudiaron la variabilidad del suelo en el contexto de la agricultura de precisión, enfocándose en las zonas de manejo específico por sitio. El estudio se llevó a cabo en dos campos con texturas de suelo contrastantes en el sur de Brasil, utilizando la conductividad eléctrica aparente (CEa) para

delinear zonas de manejo (MZ). Se aplicó un esquema de cuadrícula de 50 x 50 m para medir la CEa, realizar análisis de suelo y evaluar el rendimiento de soja. Las MZ se definieron según la distribución espacial de la CEa, y se realizaron pruebas estadísticas para comparar los atributos químicos y físicos del suelo entre ellas. Los resultados mostraron que las MZ podían distinguir diferencias significativas en propiedades como arcilla, pH y nutrientes, así como en el rendimiento de soja en campos con textura franco arcillo arenosa. El estudio concluye que la CEa es una herramienta eficaz para delinear MZ y comprender la variabilidad del suelo, lo que permite ajustar los insumos agrícolas de manera más precisa.

El estudio de Ramesh Chand B. et al. (2020) en India subraya la importancia del manejo de nutrientes para lograr la autosuficiencia en la producción de cereales. Ante el aumento de los precios de los fertilizantes químicos y la creciente contaminación, se ha promovido el uso de herramientas de precisión, como el manejo de nutrientes específico por sitio (SSNM). Este enfoque optimiza el equilibrio entre la oferta y la demanda de nutrientes, resultando en rendimientos significativamente mayores de cultivos como maíz, arroz y trigo en comparación con las dosis recomendadas de fertilizantes y las prácticas agrícolas convencionales. El SSNM permite una aplicación en tiempo real de nutrientes, teniendo en cuenta la variabilidad espacial del suelo, lo que mejora la productividad y la eficiencia en el uso de nutrientes (NUE) mientras se minimiza el desperdicio. Para implementar SSNM de manera efectiva, se utilizan tecnologías como dispositivos de detección de nutrientes, sistemas de apoyo a la toma de decisiones, SIG, teledetección y modelos de simulación, además de técnicas tradicionales como la fertilización equilibrada y el uso de fertilizantes de liberación lenta. En conjunto, estos enfoques pueden aumentar la productividad de los cultivos y promover la sostenibilidad agrícola.

Algunos otros estudios destacan la importancia de optimizar el muestreo de suelos en la agricultura de precisión; y es así como Mazur, P., et al. (2022) realizaron una investigación en campos de maíz en Polonia, cuyo objetivo fue evaluar las relaciones entre índices espectrales (NDWI y NDVI), la conductividad eléctrica (CE) aparente del suelo y el contenido de nutrientes (fósforo, potasio y magnesio) y pH. Los hallazgos revelaron correlaciones positivas significativas entre el NDVI del suelo desnudo y los nutrientes del suelo, así como el pH. Se observó una fuerte correlación entre la CE del suelo y el contenido de potasio, y una correlación moderada con el magnesio. Un análisis de regresión múltiple indicó que el contenido de potasio y fósforo estaba estrechamente relacionado con la CE y el NDVI. La principal novedad del estudio es que demuestra cómo estos índices espectrales y la CE pueden medirse fácilmente a escala de campo, facilitando la identificación de nutrientes clave. Esto permite implementar una fertilización optimizada de tasa variable, subrayando la relevancia del muestreo de suelos en la gestión agrícola de precisión.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad y protección del medio ambiente, la aplicación equilibrada de nutrientes es la clave para un entorno saludable, ya que emplea un enfoque basado en las necesidades para la aplicación de fertilizantes. Es así como Gurdeep Singh Malhi et al. (2022) abordaron el manejo de nutrientes específicos del sitio (SSNM) como un enfoque basado en necesidades para la aplicación de fertilizantes, destinado a cubrir el déficit entre los nutrientes requeridos para alcanzar rendimientos objetivos y la disponibilidad natural en el suelo. Utilizan diversas herramientas, como la tabla de colores de hojas y sensores ópticos, para detectar deficiencias de nutrientes y ajustar su suministro en el campo. El SSNM mejora la eficiencia en el uso de nutrientes (NUE) y asegura la aplicación adecuada de nutrientes en el momento y lugar correctos. Esto resulta en una mayor eficiencia agronómica y de recuperación de nutrientes,

umentando los rendimientos de los cultivos con menores tasas de aplicación. Además, el enfoque ayuda a prevenir la contaminación ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a un entorno más saludable. Finalmente, el aumento de la producción junto con el uso reducido de insumos genera mayores beneficios económicos para los agricultores, convirtiéndolo en una opción viable y sostenible.

Así mismo, el manejo de la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas es crucial para aumentar la eficiencia, mejorar la productividad y reducir riesgos ambientales. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) por ejemplo, es un indicador clave de la calidad del suelo y su capacidad para retener contaminantes. En este contexto, Mir Naser Navidi y Javad Seyedmohammadi (2020) realizaron un estudio en el norte de Irán, recolectando 255 muestras de suelo para analizar la CIC, nitrógeno total, potasio disponible y fósforo utilizando métodos estándar. Se elaboraron mapas de variabilidad espacial de estas propiedades mediante el método Kriging ordinario. Los resultados mostraron que los niveles de nitrógeno, potasio y fósforo superan el límite óptimo en varias áreas. Los criterios de evaluación indicaron que la precisión de los mapas era ideal. Estos mapas de distribución espacial son herramientas útiles para el manejo preciso de nutrientes (NPK), contribuyendo a la protección del medio ambiente y a la prevención de la contaminación de recursos hídricos subterráneos en la región estudiada.

La aplicación excesiva de fertilizantes puede resultar en desperdicio, aumento de costos y contaminación ambiental. Para abordar este problema, N. Subhasree et al. (2022) realizaron un estudio en la Granja Instructiva del campus de KCAET en Kerala, India, enfocándose en el manejo de nutrientes específico del sitio (SSNM) como solución para mejorar la eficiencia en la aplicación de nutrientes y aumentar la productividad de los cultivos. El estudio involucró la recolección y análisis de muestras de suelo para determinar propiedades químicas como pH, conductividad

eléctrica, nitrógeno, fósforo y potasio. Se utilizaron sistemas de información geográfica (SIG) y GPS para crear mapas de variabilidad espacial de estas propiedades, lo que permite identificar la distribución de nutrientes en el suelo. Los resultados indican que el uso de SIG y GPS es efectivo para generar mapas que facilitan recomendaciones de nutrientes específicas, mejorando la productividad de los cultivos y reduciendo el estrés ambiental. Además, este enfoque implica menos análisis de suelo, lo que disminuye los costos operativos en comparación con el análisis de parcelas individuales.

En materia de pronósticos en un sistema productivo para el cálculo de recursos y su representación cartográfica, Maiara Pusch et al. (2022) evaluaron el uso de múltiples covariables en la modificación geoestadística robusta para predecir propiedades químicas del suelo con valores atípicos. El estudio se realizó en dos áreas agrícolas del sureste de Brasil: una con pastoreo rotativo y otra con cultivo de caña de azúcar. Se compararon diferentes métodos de predicción espacial para cuatro propiedades del suelo: fósforo (P), potasio (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y saturación de bases (V). Las covariables se clasificaron en cinco categorías: suelo, vegetación, relieve, manejo y geografía. En general, incorporar covariables a los métodos de predicción robustos mejoró la precisión de la predicción espacial de las propiedades del suelo con valores atípicos. Sin embargo, esto no ocurrió en todas las situaciones, dependiendo de las características del conjunto de datos y la variabilidad espacial de los campos. Los autores concluyen que la información sobre prácticas de manejo es crucial para modelar tendencias en el mapeo digital del suelo con fines de prescripción de fertilizantes. Además, la regresión lineal múltiple robusta (RMLR) produjo resultados de predicción al menos equivalentes a los de la geoestadística robusta.

Finalmente, el documento de Arya Pradipta et al. en 2022, propuso explorar métodos y enfoques para apoyar la agricultura sostenible, centrándose en la caracterización detallada de las propiedades del suelo. Esta caracterización es esencial para la selección de cultivos y prácticas agrícolas, y puede prevenir la degradación del suelo si se implementa al inicio. Se destacan las aplicaciones de teledetección y estudios geofísicos como herramientas no invasivas y eficientes para evaluar los atributos agronómicos del suelo. La teledetección proporciona información sobre la superficie del suelo, mientras que la geofísica permite caracterizar el subsuelo. Los datos obtenidos pueden utilizarse para modelar las interacciones entre el suelo y el agua, mejorando la comprensión de los procesos fisicoquímicos en la zona de aireación. En resumen, el uso de tecnologías avanzadas como la teledetección y la geofísica es fundamental para desarrollar prácticas agrícolas precisas y sostenibles, garantizando un manejo adecuado del suelo y contribuyendo a la agricultura sostenible en el futuro.

4. Referente normativo y legal

En el presente trabajo se contempla un marco internacional para identificar cómo se deben manipular los datos geográficos que se emplean para la representación de diferentes escenarios, por lo que se considera lo propuesto en la norma ISO 19157:2013, que hace énfasis en los componentes determinadores de la calidad, estructura y validación de los datos geográficos. Los metadatos geográficos manejados en la interfaz gráfica de usuario deben ser ajustados, de acuerdo con la norma ISO 19115-1:2014, ya que deben proveer información acerca

de su identificación, extensión, elementos espaciales, referencia espacial y todas las propiedades digitales del dato geográfico.

Es importante contar con un referente normativo local para verificar qué tan importante es el aporte de la agricultura para el desarrollo local. En el caso colombiano, el manejo la información geográfica es estandarizado por la NTC-4611:2021, que define “el esquema requerido para describir información geográfica y servicios por medio de metadatos. Proporciona información acerca de la distribución de información y la descripción completa de los conjuntos de datos y servicios”.

5. Referente teórico

5.1. Fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo es la capacidad más importante en la nutrición de los cultivos por lo que es esencial su conocimiento para un mejor manejo. Muchas áreas agrícolas enfrentan graves problemas de producción, rendimiento y degradación de los suelos debido a la falta de información básica que permita establecer programas de manejo para una producción agrícola sustentable y sostenible en el tiempo (Henríquez, Killorn, Bertsch y Sancho, 2005; Ovalles, 1991). En áreas de agricultura tradicional, es poco usual evaluar la fertilidad de suelos, especialmente por ser lento y costoso (González-Pedraza, Rey y Atencio, 2014; Vilorio, Núñez, Machado, Elizalde y Pineda, 2009; Ovalles, 1992).

5.1.1. Propiedades químicas del suelo

pH: El pH del suelo indica su acidez o alcalinidad y afecta la disponibilidad de nutrientes. Un pH ideal para la mayoría de los cultivos es de 6.0 a 6.5, mientras que suelos muy ácidos (<5.5) pueden tener toxicidad por aluminio, y suelos muy alcalinos (>8.5) pueden dispersarse. El pH se ve influenciado por factores como la alcalinidad del agua, enmiendas orgánicas, y el uso de fertilizantes. (FAO, 2020).

Materia Orgánica (MO): La MO es una mezcla de residuos de plantas y animales en descomposición. Mejora la fertilidad del suelo al aumentar la retención de agua, la CIC y la actividad biológica. Su contenido varía según factores como el clima, la vegetación y el relieve. (Schnitzer, 1991).

Carbono Orgánico del Suelo (COS): El COS es el carbono que queda tras la descomposición de la materia orgánica y es crucial para el ciclo del carbono. Su pérdida indica degradación del suelo, y su cantidad varía según las condiciones geológicas y climáticas. (FAO, 2017).

Nitrógeno Total (Nt): En suelos tropicales, el contenido de nitrógeno varía entre 0.02% y 0.04%, pudiendo llegar hasta el 2% en suelos ricos en materia orgánica. Su cantidad está influenciada por factores climáticos, vegetación y condiciones locales. Estas propiedades químicas son fundamentales para entender la fertilidad del suelo y su manejo adecuado en la agricultura. (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Fósforo (P): Es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, aunque solo una pequeña fracción está disponible para ellas. La principal fuente de P proviene del intemperismo de minerales como la apatita. (Szogi et al., 2012).

Potasio (K): La concentración de K en el suelo varía entre 1 y 10 mg/kg y puede disminuir por absorción de las plantas, lixiviación o fijación en minerales de arcilla. Su disponibilidad depende de varios factores, incluyendo la textura del suelo y el pH (Havlin et al., 2014).

Calcio (Ca): El calcio es el catión más abundante en el suelo y generalmente no limita la producción agrícola, excepto en suelos ácidos donde puede ser necesario añadir carbonatos para elevar el pH. (Cajuste, 1977).

5.1.2. Diagnóstico, muestreo y análisis de las propiedades del suelo

El análisis de suelo es uno de los medios rápidos y económicos que sirve de apoyo técnico para proporcionar recomendaciones de fertilizantes y enmiendas para la mayoría de los cultivos de importancia económica. La eficacia de estas recomendaciones está muy relacionada con las respuestas del cultivo a las aplicaciones de un determinado nutrimento. En el caso del cultivo de la caña de azúcar, los efectos de las aplicaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) deben relacionarse no solamente con las respuestas obtenidas en producción de caña, sino también con las respuestas en concentración de sacarosa. Quintero D. (1993).

La definición de muestreo implica seleccionar el método más eficiente para elegir las muestras que se utilizarán para estimar las propiedades del área de estudio (Pennock et al., 2006). Sin embargo, en la mayoría de los casos, el muestreo de suelo no se realiza siguiendo una densidad de muestra adecuada para capturar la variabilidad del atributo estudiado en la escala deseada, siendo casos en los que la cantidad de muestras recolectadas no es suficiente o excesiva, siendo una tarea muy onerosa (Söderström et al., 2016).

El análisis de suelos es una herramienta fundamental para determinar la fertilidad y potencial del suelo de alguna localidad, región, lote, o cualquier otra área geográfica. Esta herramienta reúne una serie de parámetros que en conjunto van a dar un resultado al que se le dará una interpretación para un plan de fertilización, dependiendo del tipo de suelo, el tipo de cultivo, la edad y el sistema de producción.

Para esto es importante realizar de modo correcto el muestreo, ya que de no hacerlo se pueden presentar varios errores, como la mala interpretación de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio. Es por ello que el muestreo correcto del suelo constituye un factor primordial para la evaluación de su fertilidad, y ante la imposibilidad de analizar todo el volumen y/o peso de la capa arable de un suelo, se utilizan muestras que van a representar todo el universo que se quiere evaluar (Mendoza & Espinoza, 2017).

De acuerdo con Sainz et al. (2022), una distribución homogénea que garantice la mayor cantidad de información, de acuerdo con la variabilidad del campo, implica diseñar una grilla que abarque el 100% del área de estudio, esto garantiza que las muestras queden bien distribuidas y se pueda lograr una obtención de datos más completa y uniforme, el inconveniente es el alto costo que representa, por lo que actualmente se maneja tomas de muestras aleatorias.

Un muestreo georreferenciado de suelos se utiliza como herramienta para obtener diferentes puntos de los que se toman muestras, dicha georreferenciación nos ofrece una serie de datos con los cuales se pueden elaborar mapas que a su vez se pueden utilizar para determinar desde tratamientos eficientes de fertilización, hasta evidenciar los puntos específicos donde se presentan las condiciones más críticas en el terreno y así implementar estrategias de manejo integrado. (Castellanos & Castellanos, 2012).

5.2. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) se refiere a un concepto de gestión basado en observar, medir y responder a la variabilidad dentro de los campos agrícolas utilizando tecnología. E.

Balestrieri, L. (2018). El manejo de la AP se divide en cuatro fases:

1. Comprender e identificar la variabilidad
2. Determinación de zonas homogéneas
3. Fase de decisión
4. Manejo de Operaciones Agrícolas

Para lograr una mejor comprensión de la variabilidad dentro del campo, se utilizan diversos instrumentos y herramientas que permiten a los agricultores generar y gestionar big data, combinando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los sistemas de información geográfica. Estas tecnologías permiten recopilar datos en tiempo real con información posicional. Las técnicas más comunes para adquirir información sobre la variabilidad dentro de los campos son la detección remota y la detección próxima:

- La detección remota utiliza plataformas satelitales, aéreas o de drones con diferentes tipos de cámaras.
- La detección próxima analiza directamente los datos del suelo y los cultivos en tiempo real utilizando sensores cercanos al objeto a monitorear

5.2.1. Variabilidad del suelo

Una gran proporción de la variabilidad del rendimiento de los cultivos puede explicarse por la variabilidad espacial en las propiedades del suelo (Bramley, 2009). Su variabilidad depende de la escala de análisis, ya que está impulsada por la acción de los factores de formación en un continuo de escalas espaciales y temporales, lo que da como resultado estructuras de variación anidadas (Trangmar et al., 1985).

La variabilidad espacial del suelo puede ser alterada por perturbaciones naturales y antropogénicas, especialmente por prácticas agrícolas (Fraterrigo & Rusak, 2008). Algunas variables como los contenidos de nitrógeno (N) y fósforo (P) disponibles a menudo muestran un alto grado de variabilidad, mientras que otras propiedades más relacionadas con factores de formación más uniformes, como el pH, generalmente muestran una dispersión espacial más estrecha (Fu et al., 2013; Bogunovic et al., 2014).

La caracterización de la variabilidad se realiza mediante la recolección de muestras de suelo y el análisis de sus características fisicoquímicas, con un posterior análisis geoestadístico, el cual resulta una herramienta atractiva para el establecimiento de densidades de muestreo cuando la variación de las propiedades del suelo está bien caracterizada mediante el semivariograma (Kerry & Oliver, 2004). El rango, un parámetro de semivariograma, informa sobre el espaciamiento límite hasta el cual una determinada propiedad del suelo tiene continuidad espacial.

5.2.2. Manejo específico por sitio

El manejo de nutrientes específicos por sitio (SSNM) puede contribuir a enfoques sostenibles, respaldados por herramientas digitales, teniendo en cuenta la heterogeneidad espacial en las condiciones agronómicas y proporcionando recomendaciones específicas para el sitio sobre el manejo de nutrientes del suelo adaptándose al campo específico del agricultor. Los sistemas de extensión agrícola tradicionales suelen ofrecer recomendaciones generales o de única medida sobre fertilizantes en grandes áreas donde las condiciones del suelo y el clima varían entre los sitios (Shehu et al., 2018).

Estas recomendaciones generales sobre fertilizantes, incluso en combinación con subsidios a los fertilizantes, no han tenido mucho éxito, provocando un mayor uso de fertilizantes y una intensificación agrícola, conduciendo al uso excesivo de fertilizantes minerales en muchas partes. Un mal ajuste entre las recomendaciones de fertilizantes y los nutrientes disponibles del suelo puede dar como resultado una respuesta de rendimiento deficiente al uso de fertilizantes y, por lo tanto, puede desincentivar las inversiones en fertilizantes por parte de los agricultores, ralentizando el proceso de intensificación agrícola (Rurinda et al. 2020).

5.2.3. Fertilización con tasa variada

Las Tecnologías de Tasa Variable (Variable-Rate Technology, VRT), tratan de un grupo de mecanismos que ofrecen mejoras en la aplicación de suministros a un lote agrícola, con el fin de potenciar el rendimiento y administración de recursos. La base de las VRT surgió a finales de

1930 con la proporción variable de fertilizantes para preparar el suelo y tratar de mantener sus características homogéneas, con ayuda de pequeños vehículos dotados de equipos rudimentarios de transmisión (Q. Zhang, 2016); para 1985 dichas máquinas evolucionaron hasta combinar en marcha las mezclas y la tasa de suministro, dando a conocer las primeras VRT.

5.2.4. Geoestadística y sistemas de información geográfica

Con el uso de métodos y herramientas geoestadísticas es posible determinar la variabilidad espacial, permitiendo cuantificar el valor de las propiedades físicas y químicas de un suelo, que son indispensables para conocer la capacidad productiva que este tiene, así el productor podrá diseñar un manejo adecuado manteniendo o mejorando la calidad del suelo a través del tiempo. El método Kriging es una de las técnicas de interpolación más poderosas. Considera las correlaciones y dependencias espaciales para predecir variables desconocidas de manera adecuada y precisa.

5.2.5. Mapeo de suelos

Existen diferentes técnicas para evaluar la variabilidad espacial del suelo, incluidas la geoestadística y los sistemas de información geográfica (SIG). Son muy útiles para la evaluación de las variaciones del suelo y pueden caracterizar exactamente las propiedades del suelo según su distribución espacial. Estas evaluaciones e interpretaciones también son aplicables a áreas vecinales (Chen et al., 2009). En consecuencia, es beneficioso determinar la distancia a la que el muestreo es suficientemente preciso para su distribución. Las propiedades del suelo evaluadas se

ser mapeadas a diferentes distancias (Foroughifar et al., 2013). Los mapas de distribución espacial ayudan al manejo correcto de los nutrientes del suelo (Brevik et al., 2015).

Estos mapas son necesarios para comprender los patrones y procesos de la variabilidad espacial del suelo y la distribución de nutrientes a diferentes escalas espaciotemporales combinadas con diferentes actividades antropogénicas. Las herramientas geoestadísticas son útiles en la preparación de mapas basados en el número limitado de muestras recolectadas de diferentes prácticas agrícolas en diferentes topografías. La técnica de interpolación Kriging predice los valores en ubicaciones no muestreadas mediante correlación espacial y reduce la varianza del error de estimación y los costos de investigación (Rosemary et al., 2017).

5.2.6. Imágenes satelitales y sensoramiento remoto

Gonzaga (2014) define “una imagen satelital como el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial a través de la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo”, señalando además que: Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, dependiendo del tipo de sensor. Desde las primeras cámaras fotográficas montadas en satélites en la década de los 60 hasta los más sofisticados y sensibles sensores hiperespectrales. Existe una amplia gama de tipos de imágenes satelitales que hoy se utilizan en las más diversas áreas, dependiendo de su resolución espacial, así como de la información espectral que poseen; desde el espionaje militar, el monitoreo del cambio climático, monitoreo de incendios e inundaciones, seguimiento de huracanes y tifones, evaluaciones multiespectrales de vegetación etc.

6. Metodología

El presente trabajo se desarrolla a partir del requerimiento del agricultor, quien necesitó identificar oportunamente la disponibilidad de nutrientes en su predio. En un siguiente procedimiento, su propósito será elaborar un plan de manejo nutricional que permita suministrar los nutrientes necesarios para cubrir la demanda del cultivo durante su ciclo productivo hasta la cosecha, logrando un rendimiento rentable y sustentable.

Este estudio propone señalar diferencias entre los valores de macronutrientes NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio), obtenidos mediante un método aleatorio y un método cuyo proceso está apoyado en herramientas de información geográfica para un cultivo de caña de azúcar. La empresa Agrosat¹ de Chile, a través de su servicio Nutricheck suelo², suministró el apoyo geomático para el desarrollo y procesamiento de la información geográfica. Previamente se obtuvo información de ubicación, área y fecha de cosecha para programar el muestreo.

El área de estudio constó de cuatro suertes (unidad parcelaria o lote) continuos con características topográficas homogéneas. El cultivo fue cosechado cinco días antes del muestreo de suelo. El muestreo de suelo se realizó el mismo día para ambos métodos.

¹ Agrosat: Es una compañía dedicada a la creación, desarrollo e implementación de tecnologías de información geográfica para el sector agrícola. <https://www.agrosat.cl>

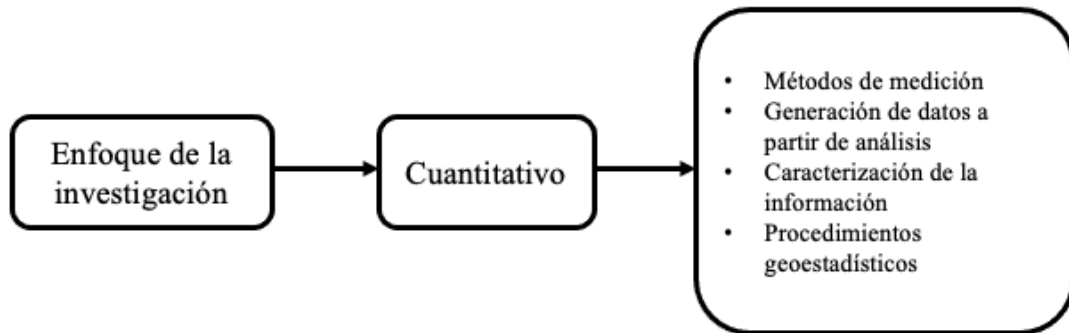
² Nutricheck Suelo, servicio que permite visualizar a partir de mapas las distintas concentraciones de macronutrientes y micronutrientes en el suelo.

Las muestras se tomaron usando ambos métodos, se etiquetaron y se enviaron al laboratorio para su análisis, generando los valores correspondientes a los macroelementos NPK. Los resultados de ambos métodos fueron tabulados para identificar y clasificar los valores de NPK destacando las diferencias entre ellos. Posteriormente, los resultados obtenidos con el método SIG fueron configurados y proyectados a través de mapas en las áreas de cultivo representadas espacialmente en la Geodatabase (GDB) de Agrosat para su interpretación visual.

6.1. Enfoque metodológico

El enfoque metodológico utilizado en el presente trabajo es cuantitativo. Propone obtener datos a partir de análisis, métodos y caracterización de información geoestadística.

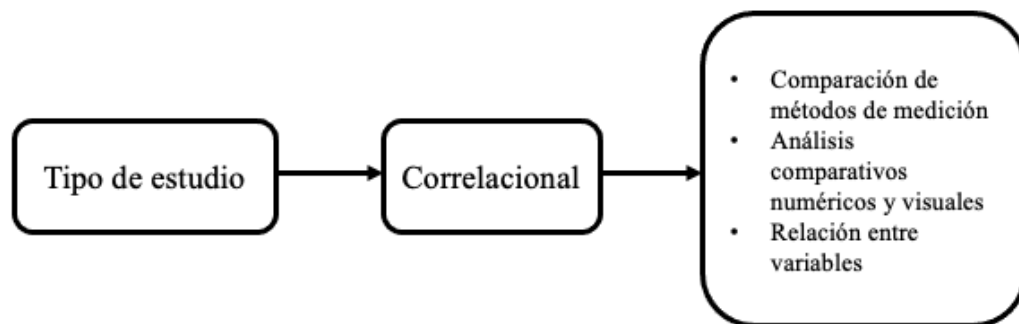
Figura 2.



6.2. Tipo de estudio

El tipo de estudio es correlacional. Explicado desde el análisis comparativo entre metodologías y el contraste entre las variables.

Figura 3.



6.3. Procedimiento

6.3.1. Fase 1. Definición y reconocimiento del área de estudio

Actividad 1.1. Requerimiento de servicio por parte del agricultor. Se le comunicó acerca de las características de cada método de diagnóstico. Se obtuvo información detallada del sitio, antecedentes del cultivo y se realizó inspección previa. El predio pertenece a Hacienda La Merced, que se ubica en zona rural del municipio El Cerrito, Valle del Cauca. Coordenadas geográficas: Lat: 3°45'00" N Long: 76°30'00" O. La última cosecha de caña fue realizada el 20 de julio (6to corte) y el muestreo tomado el 25 de julio de 2022 (5 días después del último corte), en las suertes 8, 9, 10 y 11 (área total: 28.91 ha)

Tabla 1.

Información del área de estudio

Información del área de estudio			
Punto	Suerte o lote	Área (ha)	Variedad
1	Suerte 8	6,37	CC 011940
2	Suerte 9	3,11	CC 011940
3	Suerte 10	9,73	CC 011940
4	Suerte 11	9,7	CC 011940

Fuente: elaboración propia

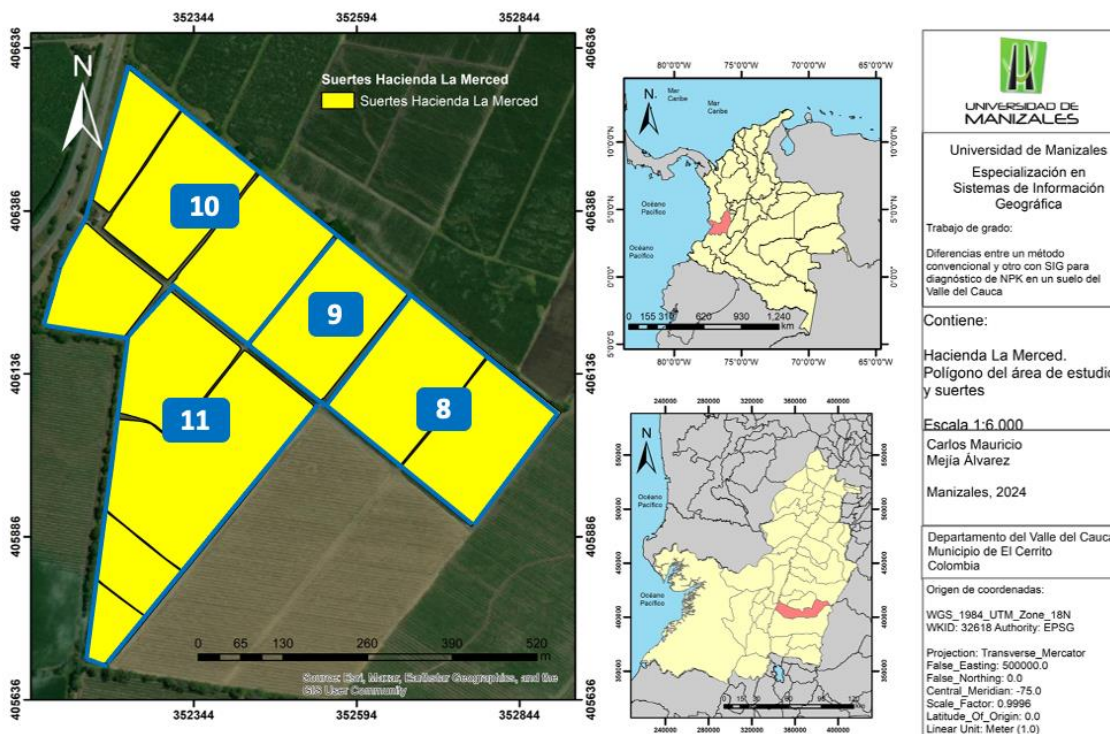
Actividad 1.2. Se realizó una descripción al agricultor de cada metodología de diagnóstico del suelo y muestreo para destacar los beneficios de cada una y programar el muestreo.

1. Método de diagnóstico convencional: Aleatorio
2. Método de diagnóstico alternativo: Con sistemas de información geográfica

Actividad 1.3. Con la ayuda de sistemas de información geográfica básicos como Google Earth, se elaboró un polígono preliminar del predio para delimitar y georreferenciar su ubicación. Se resaltaron las suertes (lotes) evaluadas.

Figura 4.

Hacienda La Merced. Polígono del área de estudio y suertes



Fuente: elaboración propia ArcMap versión 10,8

Actividad 1.4. Se definieron los parámetros o variables a estimar por ambos métodos de diagnóstico: Valores de disponibilidad de macronutrientes NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) en el suelo de estudio y las unidades utilizadas para calcular las diferencias entre los valores.

Tabla 2.

Variables de evaluación del análisis de suelo

Variable	Símbolo	Ión	Unidad de medida	Método analítico
Nitrógeno	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	%	% M.O
Fósforo	P	P ₂ O ₅	mg/kg, ppm	Bray II
Potasio	K	K ₂ O	cmol/Kg, meq/100g	Acet. de Amonio

Actividad 1.5. Para el método apoyado con SIG, se extrajo de Google Earth el archivo KML del polígono. Este archivo se utilizó como referencia espacial para gestión de las imágenes satelitales multitemporales requeridas para este estudio. Con el soporte del equipo de geomática de la empresa Agrosat, la información fue procesada con la ayuda de su servicio Nutricheck Suelo, el cual integra modelos de optimización, analizando distintas características biofísicas que incluyen índices de vegetación, actividad fotosintética, índices de biomasa, topografía y otros indicadores de la superficie del suelo.

Una vez la información fue procesada y analizada por Agrosat, se determinaron zonas homogéneas representadas con puntos georreferenciados que correspondieron al sitio de muestreo. De acuerdo con las características evaluadas se definieron cuatro puntos que representaron el total de la zona de estudio coincidiendo uno en cada suerte. El archivo KML con los puntos es cargado a un GPS para su localización en campo.

Figura 5.

Puntos de muestreo definidos para método SIG



Fuente: Google Earth (polígono) y Agrosat (puntos).

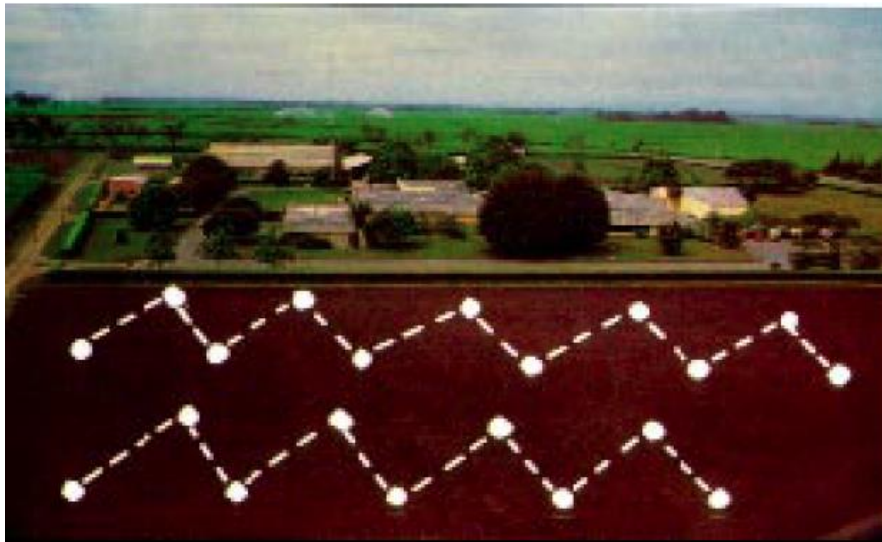
6.3.2. Fase 2. Muestreo y análisis de suelo

Actividad 2.1. En esta etapa se llevó a cabo la toma de muestras con ambos métodos. Para realizar el muestreo por método convencional para la elaboración de un análisis químico se hizo énfasis la representatividad. Según (Quintero D, 1993), Cenicaña (Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia), en un suelo homogéneo se recomienda una muestra de suelo por cada 10 has de cultivo. Para cada muestra se tomaron 15 submuestras de suelo en sitios seleccionados al azar y distribuidos uniformemente en zig-zag. Para cada submuestra se extrae con la ayuda de un barreno una porción de suelo a la profundidad requerida para el cultivo de caña de azúcar (20 cm).

Los volúmenes obtenidos de cada submuestra se mezclaron para formar una muestra representativa compuesta de hasta 1000 g. Para efectos del estudio se tomaron cuatro muestras, una para cada suerte (lote).

Figura 6.

Distribución submuestreo convencional

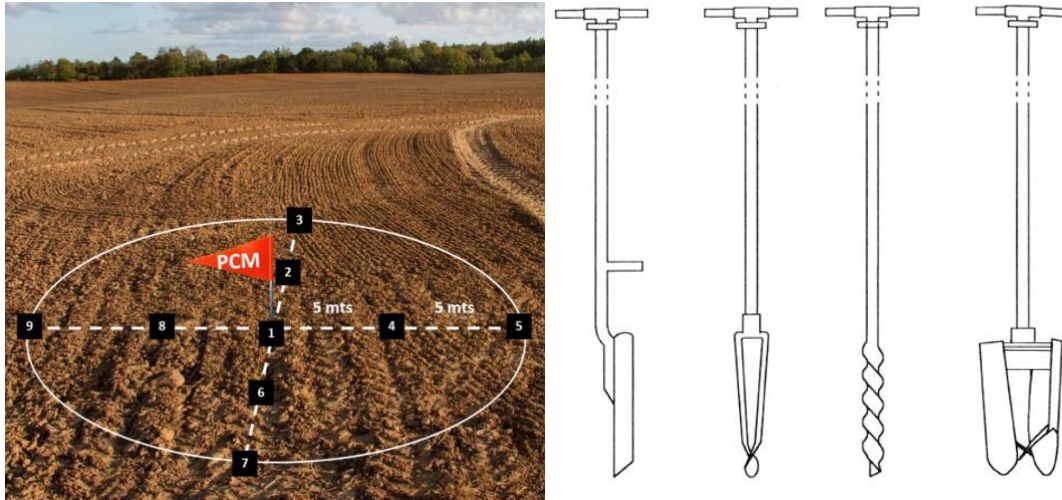


Fuente: Cenicaña 1993

Actividad 2.2. Para el muestreo por método alternativo con SIG, se procedió el mismo día localizando uno a uno los puntos precargados en el GPS. Una vez localizado cada punto se estableció un protocolo con 9 submuestras a 5 y 10 m sobre los cuatro puntos cardinales y con la ayuda de un barreno se procedió con el submuestreo en cada punto georreferenciado hasta alcanzar un volumen total de entre 800 y 1000 g de suelo.

Figura 7.

Protocolo de submuestreo para conformar una muestra de suelo con SIG y los diferentes tipos de barreno.



Fuente: Agrosat

Actividad 2.3. Las muestras obtenidas por ambos métodos fueron rotuladas y llevadas al laboratorio de suelos de confianza del agricultor. El laboratorio procesó y analizó las muestras identificando la cantidad disponible de las principales propiedades en el suelo.

Actividad 2.4. Los resultados analíticos de las variables NPK provenientes del método convencional fueron tabulados y dispuestos para el análisis comparativo del trabajo.

Paralelamente, los resultados analíticos de las variables NPK originados con el método alternativo SIG también fueron tabulados y posteriormente procesados con la ayuda de análisis geoestadístico con Agrosat.

Actividad 2.5. Una vez realizado el procesamiento geoestadístico, los resultados del análisis fueron configurados y utilizados en la construcción de los mapas para su visualización y diagnóstico.

6.3.3. Fase 3. Representación de los resultados analíticos de cada método

Actividad 3.1. Los resultados obtenidos de NPK con el método convencional se representaron en una tabla con los valores obtenidos de cada suerte para ser comparados con los valores del método alternativo SIG. La comparación se realizó básicamente para demostrar la variabilidad en la disponibilidad de nutrientes que se presentó en el área de estudio.

Actividad 3.2. Una vez procesados los datos de las variables obtenidos con el método alternativo SIG, se configuraron con base en los niveles críticos para el cultivo de caña a fin de representar los contenidos de NPK a través de mapas colorimétricos.

Tabla 3.

Niveles críticos de NPK en suelo para el cultivo de caña de azúcar.

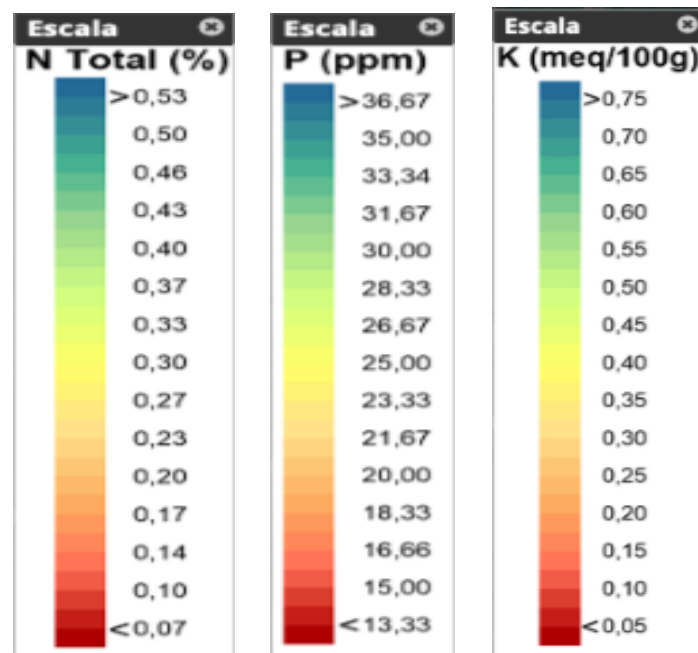
Variable	Niveles críticos		
	Bajo	Medio	Alto
N %	< 0,2	0,2 - 0,3	0,4 <
P ppm	< 20	20 - 30	30 <
K meq/100g	< 0,2	0,2 - 0,4	0,4 <

Fuente: Cenicaña 1993

Actividad 3.3. La representación cartográfica tiene asociada una escala colorimétrica de referencia con base en rangos de valores críticos de cada propiedad para el cultivo de caña. Los colores entre verde y azul indican suficiencia del elemento, amarillos indican una disponibilidad media y entre naranja y rojos indican baja disponibilidad o deficiencia en suelo.

Figura 8.

Escalas colorimétricas de referencia



Fuente: Agrosat

Actividad 3.3. Para una mejor interpretación visual de los resultados, cada variable representa una capa configurada con colores referentes a las escalas de rangos definidos previamente. luego son digitalizados y proyectados a través de la geodatabase de Agrosat, representando espacialmente la disponibilidad de cada propiedad en el predio.

Actividad 3.4. Una vez recibidos los resultados se identifican los valores de NPK para ambos métodos de diagnóstico y se procede con el análisis comparativo e interpretación de los resultados.

7. Resultados

7.1. Información del análisis de suelo y las diferencias entre los valores por ambos métodos

Tabla 4.

Contenido y diferencia entre valores de Nitrógeno Total en suelo por ambos métodos

# Ste (lote)	Nitrógeno Total NO ₃ ⁻ , NH ₄ (%)		
	Conv.	SIG	Dif.
8	0,117	0,120	0,003
9	0,121	0,127	0,006
10	0,151	0,132	0,020
11	0,105	0,158	0,053
Prom.	0,124	0,134	0,021

Fuente: elaboración propia

Los resultados de Nitrógeno mostraron en general un contenido bajo de este elemento en todo el predio con valores inferiores a 0,2%, con una corta diferencia entre ambos métodos (0,053%).

Los valores obtenidos con ambos métodos permiten evidenciar que el 100% del área de cultivo presenta una clara deficiencia de este nutriente. En los suelos con clima tropical, el contenido de nitrógeno varía ampliamente entre 0.02% y 0.04%. El clima tiene una influencia determinante sobre el nivel de nitrógeno en los suelos a través de los efectos de la temperatura y las condiciones de humedad (régimen de lluvias) sobre el desarrollo de las plantas (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Tabla 5.*Contenido y diferencia entre valores de Fósforo en suelo por ambos métodos*

# Ste (lote)	Fósforo P ₂ O ₅ ppm		
	Conv.	SIG	Dif.
8	16,30	6,70	9,60
9	11,00	12,60	1,60
10	17,60	14,60	3,00
11	19,00	21,90	2,90
Prom.	15,98	13,95	4,28

Fuente: elaboración propia

Los valores de fósforo mostraron niveles bajos en todos los resultados del muestreo convencional. Con el método SIG los valores originales muestran niveles bajos en las suertes 8, 9 y 10, mientras que la suerte 11 presentó un valor medio de fósforo (21,90 ppm). Comparando los resultados entre ambos métodos, se puede apreciar una mayor diferencia en la suerte 8 (9,6 ppm).

Tabla 6.*Contenido y diferencia entre valores de Potasio en suelo por ambos métodos*

# Ste (lote)	Potasio (K ₂ O) meq/100g		
	Conv.	SIG	Dif.
8	0,25	0,32	0,07
9	0,24	0,26	0,02
10	0,29	0,31	0,02
11	0,28	0,45	0,17
Prom.	0,27	0,34	0,07

Fuente: elaboración propia

Según los niveles críticos establecidos para el potasio, su contenido mostró un nivel medio en todos los resultados obtenidos por el método convencional. Para el método SIG se presentó un comportamiento similar; no obstante, la muestra de la suerte 11 mostró un valor superior que indica un nivel ligeramente alto.

7.2. Identificación y representación de la disponibilidad de macronutrientes NPK en el suelo

7.2.1 Representación de los valores de NPK con método convencional

Tabla 7.

Valores de NPK con método convencional

# Ste (lote)	Nitrógeno Total NO ₃ ⁻ , NH ₄ (%)	Fósforo P ₂ O ₅ ppm	Potasio (K ₂ O) meq/100g
8	0,117	16,30	0,25
9	0,121	11,00	0,24
10	0,151	17,60	0,29
11	0,105	19,00	0,28
Prom.	0,124	15,98	0,27

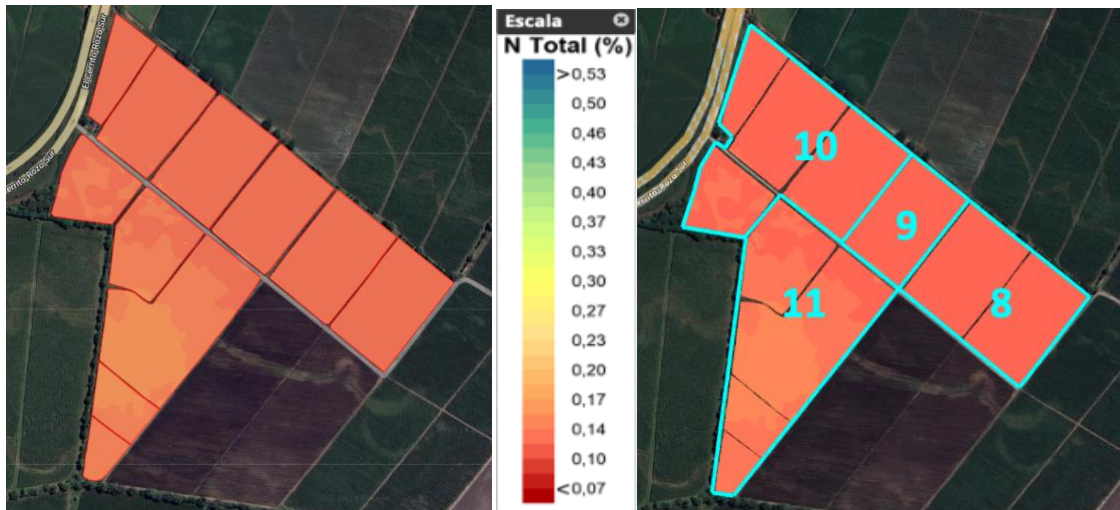
Fuente: elaboración propia

Los valores obtenidos con el método convencional muestran claramente la variabilidad en la disponibilidad de NPK, principalmente en el fósforo con amplias diferencias entre suertes.

7.2.2. Representación de los valores de NPK con método SIG

Figura 9.

Nitrógeno total % (suertes 8, 9, 10 y 11)

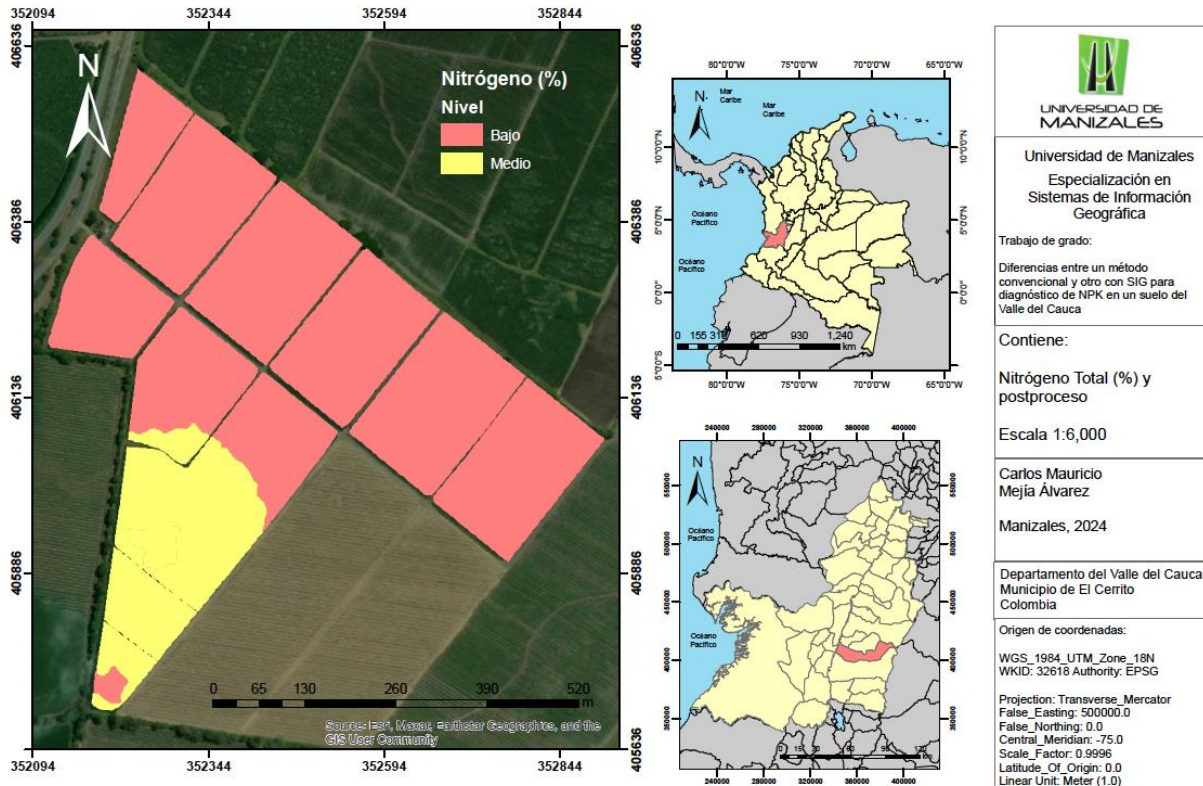


Fuente: Agrosat (GDB)

Aunque los valores muestran un nivel bajo de nitrógeno generalizado en todo el predio, la representación en la imagen permite observar variabilidad en la disponibilidad del nitrógeno en el área de estudio, el cual indicó un leve cambio en su contenido en la suerte 11.

Figura 10.

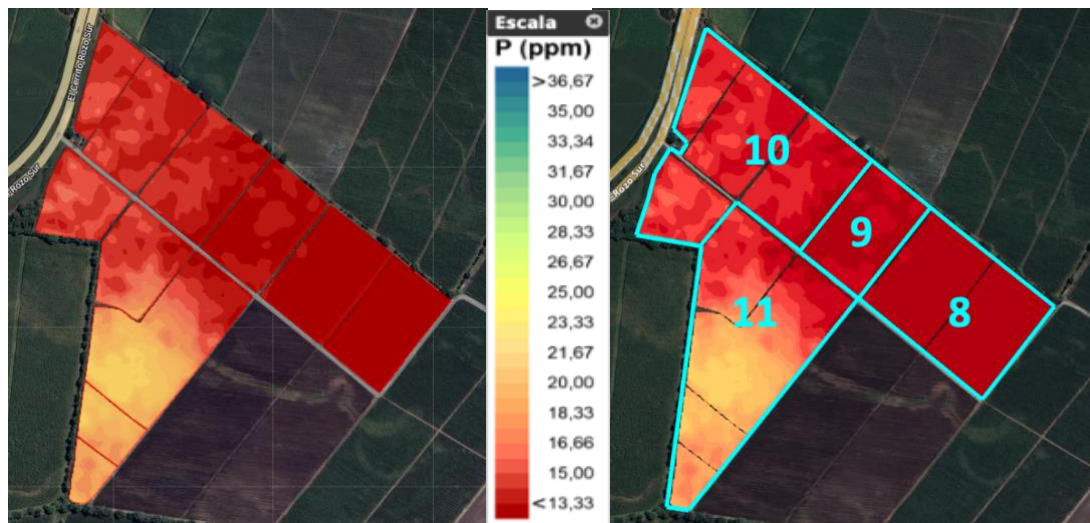
Nitrógeno total % y postproceso



Fuente: Postproceso Agrosat (GDB) y elaboración propia ArcMap versión 10,8

A la imagen inicial se le realizó un postproceso para ilustrar los rangos de valores críticos con un solo color. En este caso se logró revelar claramente las zonas de nivel bajo con rojo y la zona de nivel medio en amarillo.

Las variaciones espaciales de las propiedades del suelo se pueden mapear a través de técnicas geoestadísticas que permiten delimitar áreas de manejo diferencial; sin embargo, los suelos son cuerpos variables aún en cortas distancias, esta variabilidad es producto de las interacciones entre factores y procesos formadores de suelos (Andriotti, 2010).

Figura 11.**Fósforo ppm (suertes 8, 9, 10 y 11)**

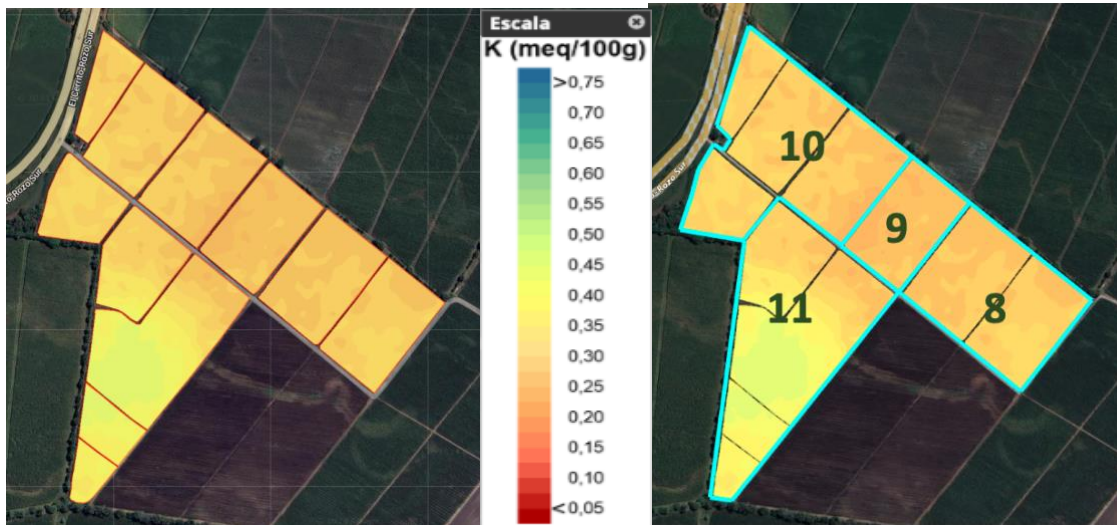
Fuente: Agrosat (GDB)

Se observó una alta variabilidad en la disponibilidad del fósforo manifestada claramente con la variación de color de menor a mayor disponibilidad. La suerte 11 presenta un incremento en la disponibilidad en parte del área.

El trabajo de Acevedo et al., 2007, mencionó que la materia orgánica y el fosforo a diferencia de otras propiedades tiene una media a alta variabilidad, esto se puede deber al manejo que se le da al suelo, como la incorporación de residuos orgánicos y la aplicación de fertilizantes. Según el trabajo de Otavio D. et al, 2020, los valores de P son muy heterogéneos en cuanto a su distribución espacial en el suelo, lo que se puede atribuir a la baja movilidad del P en el suelo, su baja disponibilidad en suelos ácidos y su alta variación en distancias cortas debido a su rápida complejación cuando se aplican fertilizantes fosfatados en estos suelos.

Figura 13.

Potasio meq/100gr (suertes 8, 9, 10 y 11)

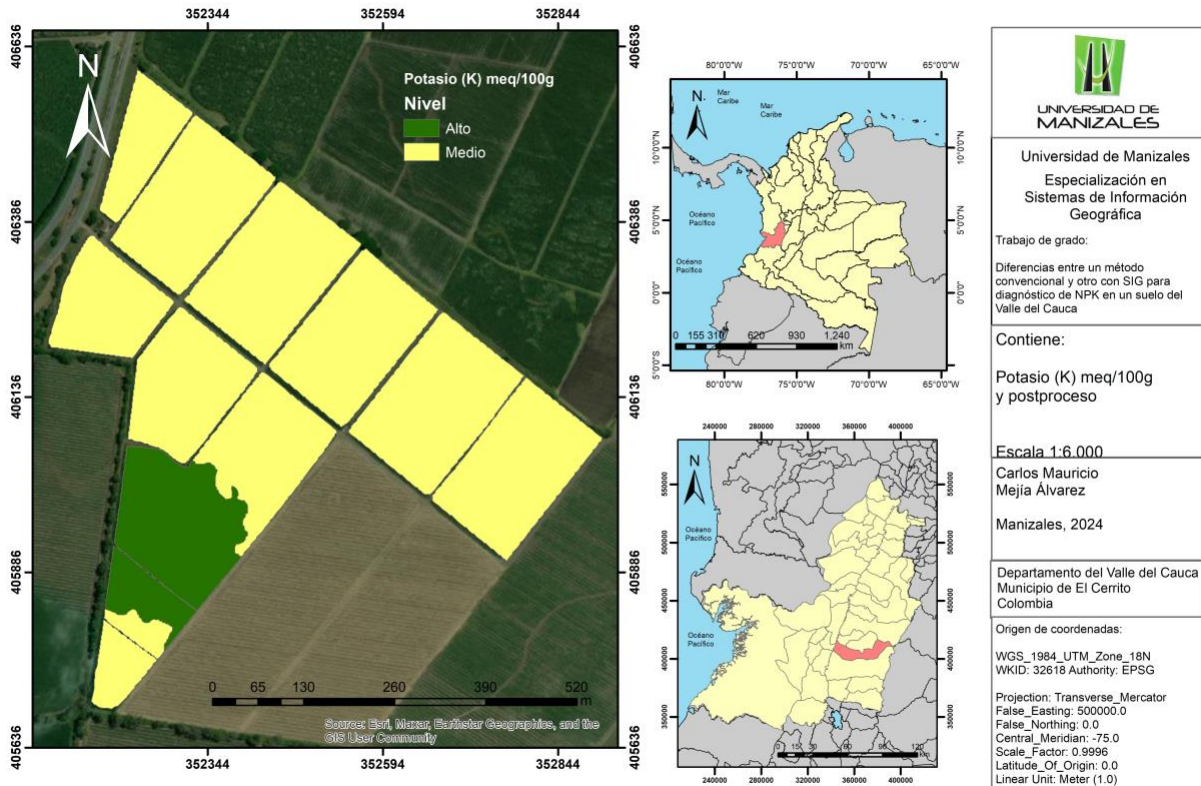


Fuente: Agrosat (GDB)

La representación de la disponibilidad del potasio permitió apreciar un nivel alto de disponibilidad de este elemento en parte de la suerte 11 (13%). La mayor parte del área de estudio presentó un nivel medio (87%).

Figura 14.

Potasio meq/100gr y postproceso



Fuente: Postproceso Agrosat (GDB) y elaboración propia ArcMap versión 10,8

La imagen sectorizada permitió validar con claridad la disponibilidad media en la mayor parte de la zona de estudio y una fracción menor con un nivel alto

8. Conclusiones

- El presente trabajo permitió realizar una revisión aproximada de las características de dos métodos de diagnóstico que contrastan por la calidad de la información. Los datos obtenidos de manera aleatoria con el método convencional permitieron obtener una información generalizada e individual de la disponibilidad de los nutrientes en cada suerte asumiendo una homogeneidad en los contenidos en suelos de cultivos agrícolas. Por otro lado, los datos obtenidos con el método SIG, logró representar a través de mapas digitalizados, una caracterización detallada de la disponibilidad de los nutrientes destacando la variabilidad espacial de sus contenidos.
- En general, con cualquier método de diagnóstico, las condiciones nutricionales en términos de NPK mostraron un déficit generalizado de estos nutrientes indiferentemente de la variabilidad espacial de sus contenidos.
- El área de estudio mostró una alta variabilidad en los contenidos de fósforo y potasio. La suerte 11 mostró una mejor condición nutricional de NPK, sin embargo, la visualización de la disponibilidad de las variables evaluadas permitió distinguir espacios o sectores de la suerte con una reducción en los contenidos similar al resto de las suertes.

9. Recomendaciones

- Disponer de información clara acerca de la variabilidad espacial de los macronutrientes NPK en suelo y de un diagnóstico SIG acompañado de mapas digitalizados precisos, es un avance importante para un mejor manejo agronómico y una mitigación a los problemas ambientales en los suelos causados por prácticas convencionales.
- Identificar la distribución espacial de las características del suelo es fundamental para la optimización de los recursos (ej.: fertilizantes), para estimar los contenidos nutricionales del suelo en lugares no muestreados y para mejorar las metodologías de diagnóstico para incrementar la confianza en los datos obtenidos.
- NPK (nitrógeno, el fósforo y potasio) son los elementos más importantes de la calidad del suelo de cultivos agrícolas y están directamente relacionados con la productividad del suelo. Sin embargo, el manejo indiscriminado de NPK produce nitratos y fosfatos, que son también los principales contaminantes de las aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto, la información de la distribución espacial de estos elementos en el suelo es indispensable para validar la calidad de los planes de manejo nutricional y la disminución de la contaminación en los suelos agrícolas.
- El método de diagnóstico SIG puede emplearse como herramienta para determinar la distribución espacial de las propiedades del suelo y así proporcionar recomendaciones convenientes y específicas de nutrientes para cada sitio.

- Los mapas de variabilidad de propiedades del suelo apoyados en SIG, facilitan el diagnóstico y las recomendaciones de fertilizantes específicas para cada sitio, reducen la cantidad de muestras de suelo, mitigando los costos operativos comparado con el análisis generalizado por suerte o lote.
- El siguiente paso es masificar estas metodologías de diagnóstico SIG en áreas de minifundios para contribuir con tecnologías en el desarrollo agrícola menos favorecido.

10. Referencias

- Acevedo, D., Alvarez, M., Hernandez, E., Maldonado, R., Perez, M., & Castro, R. (2007). Variabilidad Espacial De Propiedades Químicas Del Suelo Y Su Uso En El Diseño De Experimentos. Recuperado el 09 de noviembre de 2018, de [file:///C:/Users/ACER/Downloads/Vol_26-Num_4-264317%20\(7\).pdf](file:///C:/Users/ACER/Downloads/Vol_26-Num_4-264317%20(7).pdf)
- Andriotti, J. L. S. (2010). Fundamentos de Estadística e Geoestadística (165 pp.). São Leopoldo, Rio Grande del Sur, Brasil: Editora Unisinos.
- Baquero H., D. (2023) Modelo para identificación de fertilidad de suelos a partir de imágenes satelitales e interpolación geoestadística. Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones. Universidad de Manizales.
- Bottega, E.L.; Safanelli, J.L.; Zeraatpisheh, M.; Amado, T.J.C.; Queiroz, D.M.d.; Oliveira, Z.B.d. Site-Specific Management Zones Delineation Based on Apparent Soil Electrical Conductivity in Two Contrasting Fields of Southern Brazil. *Agronomy* 2022, 12, 1390. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061390>.
- Bogunovic, I; M Mesic; Z Zgorelec; J Aurisic & D. Bilandzija. 2014. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil Till Res* 144: 174-183.
- Bramley, RGV. 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop Past Sci* 60: 197-217.
- Brevik, E. C., Cerda, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., & Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of soil. *The Soil*, 1, 117–129.

- Castellanos, C., & Castellanos, J. (2012). agricultura101.com. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de agricultura101.com: <http://agricultura101.com/2012/03/aplicacion-del-gps-en-la-agricultura/>.
- Chen, H., Shen, Z., Liu, G., & Tong, Z. (2009). Spatial heterogeneity of available zinc, copper, and manganese in Xiangcheng tobacco planting fields, Henan Province, China. *Frontiers of Biology in China*, 4, 469–476.
- E. Balestrieri, L. De Vito, F. Lamonaca, F. Picariello, S. Rapuano, I. Tudosa, Research challenges in measurement for Internet of Things systems. *ACTA IMEKO*, 7(4), 2018, pp. 82-94. Online [Accessed 23 September 2020]
DOI: https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i4.675
- Eudocio Rafael Otavio Da Silva, Murilo Machado De Barros, Marcos Gervasio Pereira, João Henrique Gaia Gomes, Stephany Da Costa Soares. (2020). Effects Of Spatial Variability Of Soil Chemical Parameters On Tifton 85 Grass Yield. *Rev. Caatinga, Mossoró*, v. 33, n. 1, p. 236 – 245, jan. – mar., 2020.
- FAO. (2017). Mapa de carbono orgánico del suelo. Versión 1.2.0.
- FAO. (2020). Portal de Suelos de la FAO. Recuperado el 22 de marzo de 2020, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura website: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-desuelos/sistema-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.

-
- Figueiredo, V. C.; Da Silva, F. M.; E Silva Ferraz, G. A.; De Oliveira, M. S.; Dos Santos, s. a. Development of a methodology to determine the best grid sampling in precision coffee growing. *Coffee Science* - ISSN 1984-3909, [S. l.], v. 13, n. 3, p.312–323, 2018.
- Foroughifar, H., Jafarzadeh, A. A., Torabi, H., Pakpour, A., & Miransari, M. (2013). Using geostatistics and geographic information system techniques to characterize spatial variability of soil properties, including micronutrients. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(8), 1273–1281. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.758279>
- Fraterrigo, JM & JA Rusak. 2008. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. *Ecol Lett* 11: 756–770.
- Fu, W; K Zhao; P Jiang; Z Ye; H Tunney & C Zhang. 2013. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Res* 51: 503-512.
- Gonzaga Aguilar, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34487>
- Godwin, R. J., Wood, G. A., Taylor, J. C., Knight, S. M., & Welsh, J. P. (2003). Precision farming of cereal crops: A review of a six year experiment to develop management guidelines. *Biosystems Engineering*, 84(4), 375–391.
- González-Pedraza, A. F., Rey, J. C., & Atencio, P. (2014). Variabilidad espacial de los suelos de la unidad experimental la glorieta. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 30, 2-16.

- Hatfield, J. (2000). Precision agriculture and environmental quality; challenges for research and education. Iowa: U.S. Department of Agriculture's Natural Resources Conservation Service.
- Henríquez, C., Killorn, R., Bertsch, F., & Sancho, F. (2005). La geoestadística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador Kriging. *Agronomía Costarricense*, 29(2), 73-81.
- Hülsbergen, K.-J. (2003). Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme (Development and application of an accounting model to assess the sustainability of agricultural systems). *Berichte aus der Agrarwissenschaft*. Aachen: Shaker.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (13 de Marzo de 2013). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) web site. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) web site: <https://inta.gob.ar/documentos/muestreo-de-suelos-0>
- Kerry R, Oliver MA (2004) Average variograms to guide soil sampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5:307-325. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2004.07.005>
- Lawrence PG, Roper W, Morris TF, Guillard K. Guiding soil sampling strategies using classical and spatial statistics: A review. *Agronomy Journal*. 2020;112:493–510. <https://doi.org/10.1002/agj2.20048>
- López-Lozano, R., Casterad, M. A., & Herrero, J. (2010). Site-specific management units in a commercial maize plot delineated using very high resolution remote sensing and soil properties mapping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73(2), 219–229.

-
- Malhi, G. S., Kaur, M., Singh, A., Singh, V., Saini, V. and Jatav, H. (2022). Agronomic and Economic Assessment of Site-Specific Nutrient Management in Crop Production. Ecosystem Services Editor: Hanuman Singh Jatav ISBN: 978-1-68507-614-6.
- Mazur, P.; Gozdowski, D.; Wójcik-Gront, E. Soil Electrical Conductivity and Satellite-Derived Vegetation Indices for Evaluation of Phosphorus, Potassium and Magnesium Content, pH, and Delineation of Within-Field Management Zones. *Agriculture* 2022, 12, 883. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060883>.
- Mendoza, R., & Espinoza, A. (2017). Guía Técnica para muestreo de suelos. Asa, 13–21. Retrieve <https://core.ac.uk/download/pdf/151729876.pdf> <http://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Mir Naser Navidi & Javad Seyedmohammadi (2022) Mapping and spatial analysis of soil chemical effective properties to manage precise nutrition and environment protection, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102:8, 1948-1961, DOI: 10.1080/03067319.2020.1746775
- Mittermayer, M., Gilg, A., Maidl F., Natscher, L., Hülsbergen K-J (2021) Site-specific nitrogen balances based on spatially variable soil and plant properties. *Precision Agriculture* (2021) 22:1416–1436. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09789-9>.
- M.A. Oliver and R. Webster, *Catena* 113, 56 (2014). doi:10.1016/j.catena.2013.09.006.
- M. Bodrud-Doza, A.R.M. Towfiqul Islam, F. Ahmed, S. Das, N. Saha and M. Safiur Rahman, *Water Sci.* 30, 19 (2016). doi:10.1016/j.wsj.2016.05.001.

- Nélida E. Q. Silvero, José Marques Júnior, Diego S. Siqueira. (2018). Sampling density for characterizing the physical quality of a soil under coffee cultivation in southwestern minas gerais. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.38, n.5, p.718-727, sep./oct. 2018.
Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n5p718-727/2018>.
- Ovalles, F. A. (1991). Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela para el establecimiento de lotes experimentales en el Estado Cojedes. *Agronomía Tropical*, 41(1-2) 5-21.
- Ovalles, F. A. (1992). Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. (44 pp.) Maracay, Venezuela: FONAIAP-CENIAP-IIAG.
- Pusch, M., Samuel-Rosa, A., Oliveira, A., Paulo Sergio Graziano Magalhães, Amaral, L. (2022). Improving soil property maps for precision agriculture in the presence of outliers using covariates. *Precision Agriculture* (2022) 23:1575–1603. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09898-z>.
- Quintero D, R. (1993) Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar. Cali. Centro De Investigacion De La Cana De Azúcar DE: COLOMBIA, 1993. 20 páginas
- Ramesh C, B., S. S. Yadav, A. C. Shivran, Prabhoo S., and Vinod K, K. (2020). Site-specific Nutrient Management for Enhancing Crop Productivity. *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*. 21(15): 17-25, 2020; Article no.IRJPAC.61101.
- Rosemary, F., Vitharana, U. W. A., Indraratne, S. P., Weerasooriya, R., & Mishra, U. (2017). Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *CATENA*, 150, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.017>

-
- Rurinda, J., Zingore, S., Jibrin, J.M., Balemi, T., Masuki, K., Andersson, J.A., Pampolino, M.F., Mohammed, I., Mutegi, J., Kamara, A.Y., Vanlauwe, B., Craufurd, P.Q., 2020. Science-based decision support for formulating crop fertilizer recommendations in sub-Saharan Africa. *Agr. Syst.* 180, 102790.
- Sainz Rozas, H. R., Angelini, H. P., Larrea, G. E., Avila Manotoa, O. O., Eyherabide, M., Pérez Marino, T., Reussi Calvo, N. I., Carciochi, W., Crespo, C., Barbieri, P., & Wyngaard, N. (30 de marzo-01 de abril de 2022). Manejo variable de fósforo en trigo: ajuste de la dosis mediante el muestreo de suelo en grilla. [Infografía]. 2º Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión, Córdoba, Argentina. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/11708>.
- Servadio, P., Bergonzoli, S., & Verotti, M. (2017). Delineation of management zones based on soil mechanical–chemical properties to apply variable rates of inputs throughout a field (VRA). *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 10(1), 20–30.
- Schnitzer, M. (1991). Soil organic matter - the next 75 years. *Soil Sci.* 151: 41-58.
- Shehu, B.M., Merckx, R., Jibrin, J.M., Kamara, A.Y., Rurinda, J., 2018. Quantifyin variability in maize yield response to nutrient applications in the northern Nigerian savanna. *Agronomy* 8 (2), 1-.
- Söderström M, Soglenius G, Rodhe L, Piikki K (2016) Adaptation of regional digital soil mapping for precision agriculture. *Precision Agriculture* 17(5):588-607. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11119-016-9439-8>
- Subhasree, N., Sajeena, S., Prasanthi, K., and Abdul Hakkim. V. (2022). Spatial Variability Mapping of Soil Chemical Properties Using GIS & GPS. *International Journal of Environment and Climate Change*. Volume 12, Issue 12, Page 512-520, 2022; Article no.IJECC.78489. ISSN: 2581-8627.

- Trangmar, BB; RS Yost & G Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv Agron* 38: 45-94.
- Valle, S., Carrasco, J., Pinochet, D., & MacDonald, R. (2014). Variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de nutrientes y la condición de acidez de suelos volcánicos. *AGROSUR*, 42(3). Recuperado el 6 de Octubre de 2018.
<http://www.agrarias.uach.cl/wp-content/uploads/2016/04/art02-Valle.pdf>
- Viloria, J., Núñez, Y., Machado, G., Elizalde, G., & Pineda, M. (2009). Variación espacial del suelo y el paisaje en la cuenca alta del río Güey, estado Aragua, Venezuela. *Revista Facultad Agronomía (UCV)*, 35(2), 67-78.
- W. E. Larsen, G. A. Nielsen, D. A. Tyler, Precision navigation with GPS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 11(1), 1994, pp. 85-95. DOI:
[https://doi.org/10.1016/0168-1699\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0168-1699(94)90054-X).
- Zhang, Q. (Ed.). (2016). *Precision Technology Agriculture For Crop Farming*. Taylor & Francis Group.