

**MODELO PARA CUANTIFICAR LA VARIABILIDAD FÍSICO-QUÍMICA
DEL SUELO POR MEDIO DE ANÁLISIS GEOESPACIAL**

JORGE ALIRIO CASTAÑO VILLADA

JUAN DAVID GRAJALES DUQUE

CRISTIAN RICARDO ECHEVERRI GUZMÁN



UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES, 2016

**MODELO PARA CUANTIFICAR LA VARIABILIDAD FÍSICOQUÍMICA
DEL SUELO POR MEDIO DE ANÁLISIS GEOESPACIAL.**

JORGE ALIRIO CASTAÑO VILLADA

JUAN DAVID GRAJALES DUQUE

CRISTIAN RICARDO ECHEVERRI GUZMÁN

**PROYECTO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
TÍTULO: ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

MANIZALES, 2016

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado:

Firma de jurados:

Manizales, 2017

Dedicatorias

Jorge Alirio Castaño Villada

Quiero dedicar este logro a mi esposa, Rosa Milena, a mis hijos, Juan Sebastián y Valeria y a mis padres, Jorge Alirio y Maria Yolanda; quienes son la esencia de mi vida; seres que me llenan de fortaleza para sobrellevar las dificultades de la vida y, a la vez, me impulsan a alcanzar lo que alguna vez pensé inalcanzable.

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar este proceso académico. A mi familia, por su apoyo y comprensión. A mis compañeros de especialización, por su entereza, dedicación y transparencia (valores difíciles de encontrar y necesarios para forjar lazos duraderos).

Cristian Ricardo Echeverri Guzmán

Dedico este logro, primeramente, a Dios, por su fortaleza y paciencia en esta etapa de vida. A mi esposa, Claudia Patricia Marín, por su gran amor, apoyo y comprensión en cada momento de mi vida. A mi padres, Luz Helena y José Óscar, ya que gracias a ellos soy quien soy.

Sin el amor y apoyo de cada uno de ellos no hubiera sido posible culminar este proceso. Agradezco especialmente a mis compañeros de especialización (Jorge Alirio Castaño y Juan David Grajales) por cada momento compartido durante este proceso; espero que no sean los únicos en la vida y la amistad pueda perdurar. Por último, al profesor Carlos Marcelo Jaramillo por su incondicional y desinteresada ayuda durante nuestro proceso de aprendizaje.

Juan David Grajales Duque

A Dios, por haberme permitido llegar a esta universidad, a continuar con mis estudios de posgrado y haberme dado salud para alcanzar este objetivo; además por su infinita bondad y amor para no dejarme desfallecer en algunos momentos. A mi madre, Teresa, por ser un pilar importante en mi vida y por apoyarme en todo momento; por sus consejos, sus valores; por la

motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien. A mi padre, Jorge, porque siempre me ha inculcado el esfuerzo y perseverancia en todo momento; principalmente, en lo referente al estudio, y me ha motivado a alcanzar los objetivos propuestos en la vida. A mis amigos y compañeros de estudio (Jorge Castaño y Cristian Echeverri); porque sin su apoyo no hubiera sido posible alcanzar dicha meta propuesta. Gracias a ellos por haberme ayudado a realizar este trabajo propuesto. Finalmente, a todos y cada uno de los profesores de la Especialización en Sistemas de Información Geográfica, por los conocimientos impartidos durante el transcurso de dicha Especialización.

Contenido

	Págs.
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción	13
1. Área problemática.....	15
2. Objetivos.....	17
2.1. Objetivo general	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
3. Justificación	18
4. Marco teórico	20
4.1. El suelo como un sistema dinámico	20
4.2. La variabilidad espacial de los suelos	20
Sistemas de Información Geográfica y sus aplicaciones en la agricultura.	21
4.3 Geoestadística.....	22
4.4. Agricultura de precisión	23
4.5. Antecedentes.....	23
5. Metodología	26
5.1. Fase de campo	26
5.1.1. Delimitación del área de estudio.....	26
5.1.2. Levantamiento perimetral.	26
5.1.3. Definición de la grilla de muestreo.....	26
5.1.4. Toma de muestras.	26

5.2. Fase de oficina.....	27
5.2.1. Organización de la información tomada en campo.....	27
5.2.2. Creación de los Shape Files.	27
5.2.3. Interpolación.	27
5.2.4. Ajuste del <i>raster</i> de interpolación a la zona de estudio	27
6. Resultados.....	28
6.1. Análisis de resultados.....	28
6.1.1. Análisis estadístico.....	29
6.1.2.1. Mapas de variabilidad de pruebas físicas.....	30
6.1.2.1.1. Resistencia.....	31
6.1.2.1.2. Profundidad.	31
6.1.2.2. Mapas de distribución de pruebas químicas.	32
6.1.2. Mapas de variabilidad.....	38
Granulometría.....	38
Conclusiones.....	40
Recomendaciones	41
Referencias.....	42

Índice de tablas y figuras

Tabla 1. Niveles nutricionales de referencia del cultivo de maíz.....	28
Tabla 2. Análisis estadístico de las variables físicas.....	29
Tabla 3. Análisis estadístico de las variables físicas.....	29
Figura 1. Histograma de las pruebas físicas.....	32
Figura 2. Histograma de los elementos Nitrógeno, Fósforo y Potasio.	33

Figura 3. Histograma de los elementos Calcio, Magnesio y Sodio.	35
Figura 4. Histograma de los elementos Hierro, Manganeso y Zinc.....	37
Figura 5. Mapa de variabilidad espacial de los elementos Cobre, Azufre y Boro.....	38
Figura 6. Histograma de los elementos arena, limo y arcilla.....	39
Mapa 1. Granja experimental Montelindo	16
Mapa 2. Variación de las pruebas físicas.....	31
Mapa 3. Variabilidad espacial de los elementos Nitrógeno, Fósforo y Potasio.	33
Mapa 4. Variabilidad espacial de los elementos Calcio, Magnesio y Sodio.	35
Mapa 5. Variabilidad espacial de los elementos Hierro, Manganeso y Zinc.....	36
Mapa 6. Variabilidad espacial de los elementos Cobre, Azufre y Boro.	38
Mapa 7. Variabilidad espacial de los elementos arena, limo y arcilla.	39

Glosario

Agricultura de precisión: manejo de uno o más insumos para la producción de cultivos, fertilizantes, herbicidas, etc. con una base de aplicación de sitios específicos para reducir residuos, incrementar beneficios y mantener la calidad del ambiente. Son modernas herramientas que permiten la obtención y análisis de datos georreferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y eficiencia en el uso de los insumos.

Base de datos: colección de archivos manejados como una unidad. Una base de datos GIS incluye datos de ambas, la posición y los atributos de referencias geográficas.

Datos georreferenciados: datos espaciales que pertenecen a ubicaciones específicas en la superficie terrestre.

Georreferenciación: proceso de asociación de puntos de datos con ubicaciones específicas en la superficie terrestre.

IDW: es un método de interpolación, mediante distancia inversa ponderada, que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra.

Interpolación: procedimiento para predecir los valores desconocidos entre valores de datos vecinos conocidos.

Muestreo con grilla: método de muestreo de suelos en el que un lote es dividido en secciones cuadradas de algunos metros. Las muestras son luego tomadas de cada sector y analizadas.

Sistemas de información geográfico: sistema generalmente basado en computadoras para la entrada, almacenaje, recuperación, análisis y muestra de datos geográficos. La base de datos está usualmente compuesta de mapas como representaciones espaciales llamadas capas. Estas capas pueden contener información de un número de atributos, incluyendo la topografía del terreno, el

uso de la tierra, posición de la tierra, rendimiento de los cultivos, dosis de aplicación de insumos y niveles de nutrientes del suelo.

Sistema de posicionamiento global: más conocido por sus siglas en inglés como **GPS** (Global Position System), es un sistema que permite determinar en toda la tierra la posición de un objeto con una precisión de metros a centímetros.

Resumen

En la granja experimental Montelindo —perteneciente a la Universidad de Caldas y ubicada en el municipio de Palestina vereda Santágueda— se estudió la variabilidad espacial de las siguientes propiedades físicas: resistencia a la penetración, y profundidad; y químicas: Nitrógeno, Potasio, Fósforo, Aluminio, Calcio, Boro, Magnesio, Manganeso, Zinc, Cobre, Sodio, Hierro, limo, arena y arcilla; con el fin ser analizadas en el ámbito de una agricultura de precisión y darle un mayor rendimiento a los cultivos allí presentes.

La toma de datos se realizó por medio de una grilla, la cual tenía una distancia entre puntos de 30 metros. La ubicación de estos puntos fueron tomados por medio de un GPS, marca Garmin Colorado 400T; posteriormente descargados y llevados a una base datos para su correspondiente análisis. Para la toma de datos físicos se utilizó un penetrógrafo de la empresa Eijkelkamp.

El análisis de los datos químicos se llevó a cabo respecto a un histórico de pruebas químicas realizadas por el Departamento de Agronomía de la Universidad de Caldas en la granja experimental Montelindo. El método de interpolación utilizado para dicho estudio fue el método del inverso de la distancia IDW.

Palabras claves: agricultura de precisión, GPS, grilla, IDW.

Abstract

In the Montelindo experimental farm, which belongs to the University of Caldas and is located in the municipality of Palestina in Santágueda, the spatial variability of the following physical properties was studied: the penetration resistance and depth; and the chemical properties of Nitrogen, Potassium, Phosphorus, Aluminum, Calcium, Boron, Magnesium, Zinc, Copper, Sodium, Iron, Silt, Sand and Clay; in order to be analyzed in the field of precision agriculture and give a greater yield to the crops already present in this farm.

The data was taken by means of a grid, which had a distance between points of 30 meters. The location of these points were taken by using a GPS -a Garmin Colorado 400t- This data was then downloaded and taken to a database for analysis. An Eijkelkamp penetrometer was used for the physical data collection.

The analysis of the chemical data was carried out in relation to a historical chemical tests conducted by the Department of Agronomy of the University of Caldas in the Montelindo experimental farm. The inverse distance weighted (IDW) interpolation method was used for this study.

Key words: precision agriculture, GPS, grid, IDW.

Introducción

Este trabajo constituye una base fundamental en el desarrollo proyectado para la Granja Experimental Montelindo, dentro del proceso de implementación de un modelo de agricultura de precisión como punto de partida en la optimización de recursos físicos, económicos y ambientales que sustentan la rentabilidad del proceso productivo; por ende, el conocimiento previo de la variabilidad fisicoquímica del suelo es necesario para la toma asertiva de decisiones respecto al manejo integral de las diferentes necesidades que presenten los sistemas productivos a establecer. Para lograr tal fin se procedió a procesar la información de campo (análisis de suelo, y de compactación) a través de modelos geoestadísticos que permitieron visualizar dichos cambios a nivel espacial y composicional para la toma de decisiones.

La Granja Experimental ha sido un pilar esencial en la realización de actividades de docencia, investigación y extensión para los programas académicos de Ingeniería Agronómica y programas técnicos afines. La Granja Experimental Montelindo ha sido proyectada como un gran laboratorio de investigación y apoyo a la docencia. Para llevar a cabo este importante objetivo para nuestra sociedad ha estado, a través del tiempo, ajustándose a las tendencias actuales en materia de innovación tecnológica, con el fin de ser un ícono en la región.

Debido a la importancia de estar avanzando constantemente en la adquisición de conocimientos que la sociedad demanda es necesario desarrollar estudios detallados de las propiedades físicas y químicas de la granja. Un factor de alta incidencia en la calidad y la productividad agrícola es la fertilización; práctica que se realiza tradicionalmente, haciendo aplicaciones de nutrientes en forma uniforme en todo el lote, sin tener en cuenta la variabilidad natural o adquirida de la fertilidad del suelo y/o de la productividad del sitio, haciendo que las dosis aplicadas sean excesivas en algunos lugares e insuficientes en otros (Castrignano, *et al.*,

2000; Espinosa, 2000). Martínez (2003) agrega que la aplicación uniforme de insumos a un campo agrícola no solo es ineficiente en términos de costos, sino que también genera impactos ambientales negativos.

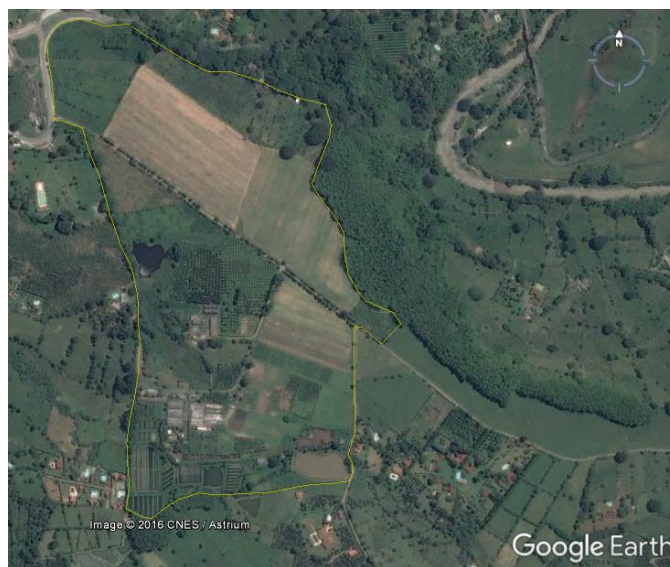
1. Área problemática

El estudio se llevó a cabo en la granja Montelindo (propiedad de la Universidad de Caldas). La propuesta investigativa planteó el establecimiento paulatino de un modelo de agricultura de precisión en la granja experimental a través de la adopción de procesos propios de este; como lo son: los monitoreos de rendimiento de cosechas —principio clave en la gestión de cultivos en un sitio específico—; análisis detallado de perfiles de compactación en zonas productivas —las cuales, por limitaciones en el proceso de infiltración del recurso hídrico, afectan los rendimientos—; aplicación de dosis precisas de agroquímicos en sitios definidos, buscando un mejor manejo ambiental; y la cartografía de plantaciones para un manejo selectivo de arvenses en campo. Como investigación inicial, se realizó la medición de la variabilidad físico-química espacial del suelo.

La granja Montelindo se encuentra ubicada a 38 kilómetros de la ciudad de Manizales, en el franco Oeste de la cordillera central de Colombia, en el municipio de Palestina (Caldas), en la vereda Santágueda; con una extensión de 64 hectáreas a 1010 msnm, temperatura promedio de 22.8° Celsius, presentando una precipitación promedio anual de 2200 m.m.

El área objeto de estudio es de 15 hectáreas, en los cuales se encuentran diferentes tipos de cultivos transitorios, dividido en cuatro lotes (Lote báscula, Lote 8, Lote 7, Lote 11) (ver mapa 1).

Mapa 1. Granja experimental Montelindo



Nota: en el mapa de localización se observan los límites de la Granja Experimental Montelindo. Imagen tomada de Google Earth.

La obtención de mapas de variabilidad físico-química del suelo en la granja experimental Montelindo sirvió como base para realizar un manejo diferenciado de los lotes en cuanto a los procesos de fertilización, en aras de aumentar estándares de productividad, disminuir, tanto costos de producción, como impacto ambiental; todo esto, enmarcado en un modelo de agricultura de precisión (AP).

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Cuantificar la variabilidad físico-química del suelo en la granja experimental Montelindo a través de un modelamiento geoespacial.

2.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo.
- Crear mapas de variabilidad por cada una de las propiedades físico-químicas estudiadas.

3. Justificación

En los últimos 30 años, se han producido grandes avances en la producción de cultivos (variedades mejoradas, fertilización, control de malezas, plagas y enfermedades, etc.) que han permitido alcanzar altos niveles de productividad. Sin embargo, esta alta productividad no ha sido necesariamente eficiente ni sustentable en todos los casos; principalmente, por la aplicación de paquetes tecnológicos rígidos sobre grandes áreas geográficas sin considerar la variabilidad espacial de los factores de producción ni del potencial de rendimiento de los cultivos.

Con la llegada de las tecnologías de información, que permiten una más rápida y económica recolección de datos, no existe justificación económica ni ambiental para utilizar paquetes tecnológicos fijos para grandes áreas de cultivo, especialmente, en lo que tiene relación a la fertilización y al control de plagas y enfermedades.

La Agricultura de Precisión (AP) es definida en su concepto más amplio como: «el uso de tecnologías de información para la toma de decisiones económicas y ambientales adecuadas para la producción de cultivos». El área de mayor desarrollo dentro de la AP es el Manejo de nutrientes Sitio-Específico, también llamado ‘tecnología de dosis variables’, que corresponde a la aplicación diferenciada de dosis de fertilizantes dentro de un lote o sitio de producción. Sin embargo, existen otras áreas dentro del Manejo Sitio-Específico (MSE), tales como: control de arvenses, manejo fitosanitario y aplicación de dosis variables de semillas de acuerdo al potencial productivo del suelo.

La cuantificación de la variabilidad espacial del suelo permite al agricultor realizar un mejor manejo y distribución de los insumos —como fertilizantes y agroquímicos—, siendo más productivo y rentable, comparado con el manejo tradicional de los lotes, los cuales se cimientan en promedios.

La agricultura de precisión debe ser considerada como un cambio filosófico en el manejo de las empresas agrícolas, pensada para mejorar la rentabilidad y/o minimizar el impacto ambiental en el mediano y largo plazo.

Estos son, entre otros, algunos de los elementos por los cuales la implementación de un modelo de agricultura de precisión en la Granja Experimental Montelindo se hace necesario. Además, le permitirá a la universidad, no solo ofrecer a los estudiantes de ingeniería agronómica procesos educativos acordes a las necesidades actuales del sector, sino también generar rentabilidad y autosuficiencia en el proceso mismo de producción agrícola del sistemas granjas; lo cual se verá reflejado en el apalancamiento de diferentes proyectos de investigación al interior de la misma unidad experimental.

4. Marco teórico

Los suelos en nuestro país —debido a una gran variedad de pisos térmicos— presenta una marcada diferencia en las propiedades físicas y químicas. A continuación, se dará una serie de conceptos claves para una correcta comprensión de este proyecto.

4.1. El suelo como un sistema dinámico

El suelo es un cuerpo natural y dinámico que desempeña muchos roles claves en los ecosistemas terrestres (Doran & Parkin, 1994; USDA, 2003), y se forma a partir del material parental, el relieve, la biota, el clima y el tiempo, en una serie de procesos globales: ganancias, pérdidas, traslocaciones y transformaciones que determinan sus características (Malagón, *et al.*, 1995).

La acción combinada de factores y procesos formadores conlleva al desarrollo de gran diversidad de suelos (Buol, *et al.*, 1983). Igualmente, el suelo es el intermediario entre el sistema físico-climático (física dinámica de la atmósfera) y el sistema biogeoquímico (en la biósfera), por lo que cualquier actividad sobre él influye en procesos de nivel global. De acuerdo con la teoría de sistemas, el “sistema suelo” puede entenderse como un punto relativamente estable en la superficie terrestre frente a procesos de transferencia y transformación y, desde esta perspectiva, es evidente la relación morfología-procesos.

4.2. La variabilidad espacial de los suelos

Las variaciones espaciales pueden estudiarse a través de técnicas geoestadísticas, que permiten elaborar mapas y delimitar áreas de manejo homogéneo. Se ha estudiado la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan la productividad de los cultivos, reportándose asociaciones entre éstas y el rendimiento; aunque dichas asociaciones dependen del rango de variación del parámetro y del rango en que este afecta al rendimiento (Ortega y Flores, 1999).

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las químicas que las físicas. Hay menor variabilidad en las propiedades del suelo en su condición natural que cuando es sometido a uso, y aquellas propiedades que más se afectan por el manejo serán las que presenten mayor variabilidad (Ovalles, 1992). La variabilidad en el campo se debe a varios factores naturales y antropogénicos. El factor natural más importante es el tipo de suelo, cuyas características están definidas por el material parental y la topografía (Brouder Applying Site, 1999).

Las herramientas utilizadas para el estudio de la variabilidad del suelo dependen de la escala que se trabaja, debido a que para zonas de grandes extensiones sería de ayuda la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas, etc., notándose cambios por tipos de rocas, cambios de cultivos, etc. Para el caso de pequeñas escalas, los estudios de variabilidad y en los análisis de suelos se puede notar que los cambios son mucho más visibles en pequeñas porciones de terreno.

Sistemas de Información Geográfica y sus aplicaciones en la agricultura.

La utilidad principal de un Sistema de Información Geográfica radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales. Esos modelos se los puede utilizar en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica produce sobre un determinado escenario en una época específica (Ortiz, 2012).

Para el caso de nuestro estudio el uso de los SIG fue fundamental para el análisis de nuestros datos, realización de mapas y análisis estadístico de ellos.

4.3 Geoestadística

La geoestadística es solo una de las áreas del análisis de datos espaciales. Es importante reconocer cuándo la información georreferenciada es susceptible de ser analizada por medio de dicha metodología. La geoestadística se define como el estudio de fenómenos regionalizados, es decir, que se extiende en el espacio y presenta una cierta continuidad. Por “espacio”, entenderemos en general el espacio geográfico, pero puede también tratarse de eje temporal o de espacios más abstractos (Emery, 2007, p. 2).

Diversos métodos han sido utilizados para describir los cambios del suelo, entre ellos se encuentran los considerados en los procesos rutinarios de clasificación e inventario de suelos, hasta métodos cuantitativos, considerando análisis estadístico y geoestadístico (Ovalles 1992).

Para el caso de estudios de variabilidad del suelo, la estadística convencional no sería una buena herramienta para el análisis de los datos, debido a que esta no tiene en cuenta la estructura espacial de los atributos. Para ello es necesario utilizar otros tipos de métodos que se desprenden de la estadística convencional, como la geoestadística. El uso de Software GIS es una buena herramienta de análisis geoestadísticos.

Entre los métodos más utilizados para llevar a cabo la interpolación de variables está la Ponderación del Inverso de la Distancia (IDW), método matemático que utiliza un algoritmo basado en las distancias de los puntos. Por otro lado, Kriging es un método geoestadístico que cuantifica la estructura espacial de los datos y su autocorrelación, mediante variogramas para realizar las predicciones correspondientes (Trangmar. et al., 1985; Villatoro, et al., 2008). Ambos métodos son eficientes en el proceso de interpolación; esto debido a la alta densidad de muestreo. Cuando el distanciamiento es muy grande los variogramas no son posibles de obtener; entonces el Kriging deja de ser una opción y comparativamente el IDW se perfila como el

mejor.(Villatoro, 2008). Para el caso de nuestro estudio se llevó a cabo la interpolación por el Método del Inverso de la Distancia (IDW).

4.4. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es la utilización de herramientas modernas capaces de facilitar la obtención y el análisis de datos georreferenciados. Así mismo, permite confeccionar mapas de rendimiento de cultivos, facilitando una visualización más clara de la variabilidad espacial que presentan. Sin embargo, estos mapas no indican cuáles son las probables fuentes de variación, ni la importancia relativa de cada una de ellas. Para resolver este problema se requiere estudiar el suelo, y conocer la variabilidad espacial y temporal de sus propiedades físicas y químicas, así como otras características del terreno (Ruffo, *et al.*, 2006). Con esta información se podría realizar un manejo sitio específico del recurso natural, subdividiendo los lotes en áreas homogéneas, lo que permitiría aumentar la eficiencia en el uso de insumos, mejorar la sustentabilidad de la empresa, proteger el medio ambiente y beneficiar económicamente al productor (Dinnes, *et al.*, 2002).

Una forma sencilla de definir Agricultura de Precisión es: la utilización de un grupo de herramientas informáticas como Sistemas de Información Geográficas (SIG), Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), equipos de cómputo, que permiten la optimización y distribución de insumos (como fertilizantes, plaguicidas, semillas, etc), llevando así, a una buena optimización de recursos económicos y el recurso suelo.

4.5. Antecedentes.

El aumento poblacional y la gran demanda de alimentos son cada vez mayores; por ende, se debe encontrar una solución en la parte agrícola, la cual ayude a tener un mayor rendimiento en la producción de alimentos, disminución de costos y realizar un uso más eficiente de los insumos.

Es necesaria la implementación de nuevas tecnologías para la agricultura de precisión; como se indica a continuación: «El potencial de la agricultura de precisión es el de reducir los costos en la producción de granos, aumentar la productividad y hacer un uso más eficiente de los insumos. En un sentido más amplio, la agricultura de precisión permite administrar los insumos en el tiempo y en el espacio, optimizar la logística de las operaciones a campo» (Bongiovanni, 2004, p. 85).

Los distintos sistemas de labranzas o de rotaciones pueden afectar el contenido de MO (materia orgánica) incrementándolo o deprimiéndolo (Solberg, et al., 1997; Izaurralde, et al., 2001). Los suelos cultivados que poseen un bajo tenor de MO (materia orgánica) tienen más facilidad para incrementarlo, a través de un manejo adecuado, que aquellos inicialmente más ricos (Nyborg, et al., 1995).

El establecimiento de una metodología de muestreo de suelos está dado, principalmente, por el conocimiento de su variabilidad espacial. Ese fue el objetivo de evaluar la variabilidad de los macro y microelementos en suelos cultivados con *Brachiaria brizantha*, ubicados en el sistema agrario Alto Río Tigre, con la finalidad de establecer una superficie óptima de muestreo y el número mínimo de submuestras que se deben realizar para obtener una muestra compuesta representativa de las condiciones químicas reales del área seleccionada. En consecuencia, el análisis de esta muestra resultará ser más preciso, reflejándose positivamente en las recomendaciones de fertilizantes y enmiendas (Ovalles, 1992).

El concepto central de la agricultura de precisión es aplicar de entrada —*lo que necesita, dónde se necesita y cuándo se necesita*— y esto sólo puede hacerse si gran cantidad de datos georeferenciados están disponibles para tomar decisiones informadas de gestión; aplicaciones agrícolas tales como: control de rendimiento, de aplicación variable, la cartografía de la planta, la

gestión precisa de malezas, etc., que requieren muchos sensores para adquirir datos del campo; pero estos datos sólo pueden ser unidos entre sí a través de un mapa por medio de la información de ubicación proporcionada por el GPS o cualquier otro receptor GNSS.(Pérez-Ruiz y Shrini, 2012).

La aplicación de la tecnología a la Agricultura de Precisión permite determinar la disponibilidad óptima económica (DOE). Esta puede variar entre zonas de manejo, lo cual justifica la aplicación de recomendaciones de fertilización con dosis variable, lo que permite maximizar el beneficio económico y/o minimiza el riesgo de contaminación del ambiente por la aplicación de sobredosis de insumos (Peralta, 2015).

Las aplicaciones de GNSS en operaciones de agricultura de precisión no conocen límites. Este tipo de agricultura, donde el posicionamiento junto con datos adicionales sobre el estado del vehículo, las propiedades del suelo, la salud del cultivo, y las necesidades de fertilizantes proporcionan la base de conocimientos para la toma de decisiones y de gestión para mejorar la productividad, la seguridad y la calidad, y reducir los costos y el impacto medioambiental. (Pérez-Ruiz y Shrini, 2012).

5. Metodología

5.1. Fase de campo

5.1.1. Delimitación del área de estudio.

El trabajo se realizará en la granja Montelindo, propiedad de la Universidad de Caldas, ubicada en la zona baja del municipio de Palestina, departamento de Caldas-Colombia. Con una extensión de 64 hectáreas de las cuales 15 hectáreas son la base para este estudio.

5.1.2. Levantamiento perimetral.

El levantamiento se realizó con la ayuda de un GPS marca Garmin Colorado 400T, el cual se hizo por los límites exteriores de cada uno de los lotes, en los cuales se encuentra subdividido la Granja Experimental Montelindo.

5.1.3. Definición de la grilla de muestreo.

La definición de la grilla se realizó en el programa ArcGis, realizándolo para cada lote, con una distancia entre puntos de 30 metros para garantizar una buena densidad de datos en las pruebas físicas. Esta información se llevó al GPS y, posteriormente, se trabajó. Se tomaron un total de 231 puntos de muestro para pruebas físicas.

5.1.4. Toma de muestras.

Para medir la resistencia a la penetración y profundidad de penetración del suelo se utilizó un penetrógrafo de la empresa Eijkelkamp, con un ángulo o cono de 60°, rango de superficie de cono de 3,5 cm², fuerza máxima de 5000@1 cm² kPa y profundidad máxima de medición de 80 cm, con una precisión de lectura de 2%. Para las pruebas químicas se realizó una recopilación de información existente en el Departamento de Agronomía de análisis ya realizados en la Granja Experimental Montelindo en el año 2016.

5.2. Fase de oficina

5.2.1. Organización de la información tomada en campo.

Los datos de las pruebas físicas y químicas fueron procesados en Excel de tal manera que permitieran ser manipulados y georeferenciados en ArcGis.

5.2.2. Creación de los Shape Files.

Después de tener la información debidamente organizada en Excel, fue llevada al programa ArcGis y para posteriormente crear los debidos Shape Files por cada uno de los atributo; por ejemplo: resistencia a la penetración, profundidad, nitrógeno, potasio, fosforo, etc.

5.2.3. Interpolación.

Luego de tener creado cada uno de los Shape Files, se procedió a la realización de la interpolación en el programa ArcGis, utilizando el método del IDW.

5.2.4. Ajuste del *raster* de interpolación a la zona de estudio

Después de tener la interpolación creada para cada uno de los atributos físicos y químicos, se procedió a ajustarla a la zona de estudio por medio de la herramienta “Extract by Mask”, que se encuentra en el set de herramientas de “Spatial Analyst Tools” de ArcToolBox en ArcGis. Estos ajustes de dieron para cada uno de los lotes presentes en la Granja Experimental Montelindo.

6. Resultados

6.1. Análisis de resultados

Tabla 1. Niveles nutricionales de referencia del cultivo de maíz

Elemento	Unidad	Mínim o	Máxim o
Nitrógeno	%		
Fósforo	mg/Kg	20	40
Potasio	cmol(+)/K g	0.2	0.4
Calcio	cmol(+)/K g	3	6
Magnesio	cmol(+)/K g	1.5	2.5
Sodio	cmol(+)/K g	0.5	1.0
Hierro	mg/Kg	25	50
Manganes	mg/Kg	5.0	10
Zinc	mg/Kg	1.5	3.0
Cobre	mg/Kg	1.5	3.0
Azufre	mg/Kg	10	20
Boro	mg/Kg	0.2	0.4

Nota: Tabla 1. Requerimientos nutricionales de referencia en el cultivo de maíz. Producción propia.

6.1.1. Análisis estadístico.

En las siguientes tablas se muestran las estadísticas descriptivas de las variables analizadas para este estudio (ver tabla 2).

Tabla 2. Análisis estadístico de las variables físicas

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES FÍSICAS									
VARIABLE	UNIDAD	MIN	MAX	VAR	SD	PROM	MED	MOD	CV %
Profundidad	centímetros	1,00	42	94,96	9,74	11,48	8	2	0,85
Resistencia	MPA=10Kgf/Cm2=100 N / Cm2	0,65	2	0,02	0,12	1,34	1,34	1,35	0,09

Nota: en la tabla 2 observamos el análisis estadístico de las variables físicas (resistencia a la penetración y profundidad). Producción propia.

Tabla 3. Análisis estadístico de las variables químicas.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES QUÍMICAS								
VARIABLE/UNIDAD	MINIMO	MAXIMO	VARIANZA	SD	PROMEDI	MEDIAN	MODA	CV %
					O	A		
Nitrogeno_(%)	0,27	0,66	0,01	0,11	0,41	0,39	0,36	0,28
Fosforo_(mg/Kg)	0,00	37,00	84,45	9,19	22,22	23,00	20,00	0,41
Potasio_(cmol(+)/Kg)	0,25	0,62	0,01	0,12	0,40	0,37	0,31	0,29
Calcio_(cmol(+)/Kg)	1,55	2,50	0,07	0,27	2,01	1,92	1,79	0,14
Magnesio_(cmol(+)/Kg)	0,26	0,82	0,03	0,16	0,60	0,64	0,55	0,27
Sodio_(cmol(+)/Kg)	0,14	0,24	0,00	0,03	0,17	0,16	0,14	0,16
Hierro_mg/Kg	110,00	243,00	1605,06	40,06	156,17	143,00	200,00	0,26

Manganeso_mg/Kg	7,43	29,55	50,38	7,10	12,94	9,29	29,55	0,55
Zinc_mg/Kg	5,57	9,65	1,15	1,07	8,39	8,65	9,43	0,13
Cobre_mg/Kg	3,76	6,87	0,80	0,89	4,97	4,87	4,87	0,18
Azufre_mg/Kg	7,56	55,57	234,46	15,31	23,39	18,52	55,57	0,65
Boro_mg/Kg	0,10	2,60	0,43	0,65	1,03	0,90	0,50	0,63
Arena_%	50,00	65,00	18,17	4,26	56,48	56,00	56,00	0,08
Limo_%	20,00	37,00	21,26	4,61	27,43	28,00	28,00	0,17
Arcilla_%	7,00	28,00	40,45	6,36	16,09	17,00	7,00	0,40

Nota: en la tabla 3 observamos el analisis estadistico de las variables químicas (nitrogeno, fosforo, potasio, etc).

Los coeficientes de variación para las variables físicas no permiten observar un cambio significativo de las mismas en el área de estudio. Puesto que los valores se encontraron por debajo de 1, no fue posible detectar los puntos de compactación que presento el análisis geoespacial, con lo cual se puede observar que la estadística descriptiva no es un indicador confiable para la toma de decisiones.

Para el caso de las variables químicas, tampoco se observan cambios significativos de los coeficientes de variación de cada una de estas; puesto que ninguna da por encima de 1. De las variables químicas de elementos analizadas para este caso, la que tiene mayor coeficiente de variación es el azufre con un 0.65%, y la que menor coeficiente de variación presenta es el Zinc, con un 0.13%. Las variables arena, limo, arcilla no se tuvo en cuenta en este momento, debido a que solo se analizaron los elementos químicos.

6.1.2.1. Mapas de variabilidad de pruebas físicas

Para este estudio se realizaron mapas de distribución para cada una de las propiedades físicas del suelo resistencia a la penetración y profundidad de penetración (ver figura 2).

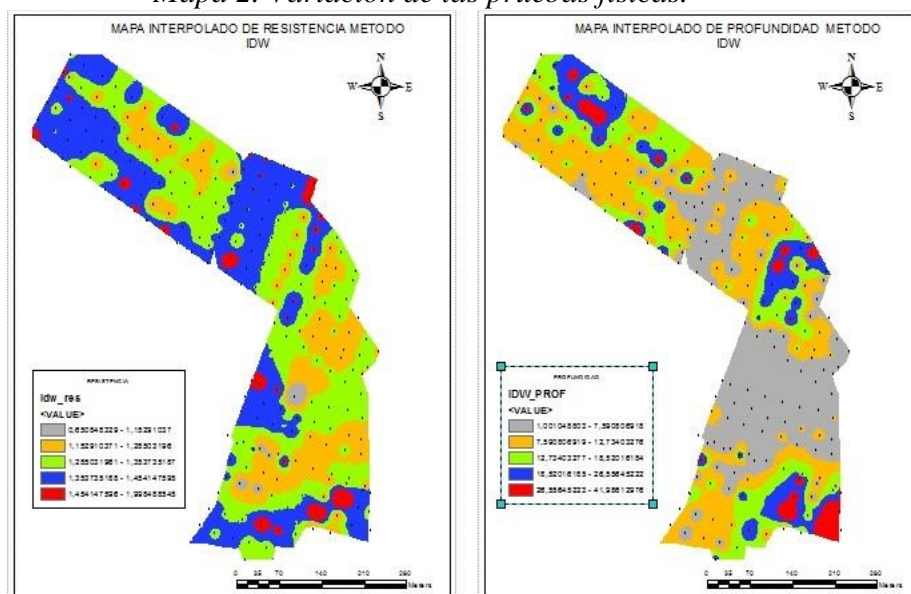
6.1.2.1.1. Resistencia.

Para el caso de la resistencia a la penetración del terreno, se observa un mínimo de 0.65 y un máximo de 2 Mpa. Realmente, no siendo mucha la diferencia en la zona de estudio, el promedio observado para esta variable fue de 1.34 Mpa.

6.1.2.1.2. Profundidad.

En la zona de estudio se logró observar profundidades entre 1 y 42 cms. en el momento de realizar la penetración. El promedio en toda la zona encontrado fue de 11.5 cm.

Mapa 2. Variación de las pruebas físicas.

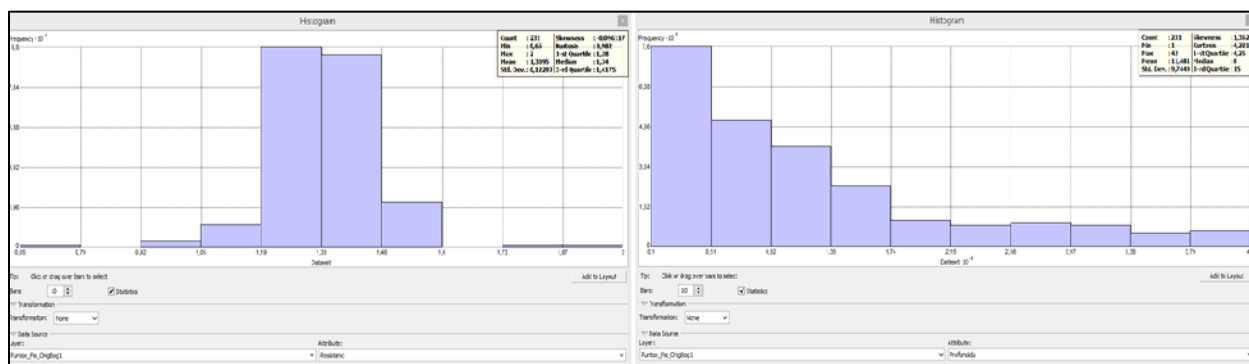


Nota: a la izquierda, el mapa de interpolación de resistencia; y a la derecha, el mapa de interpolación de profundidad.

Según los análisis estadísticos, los mapas de variabilidad entre la profundidad de penetración y resistencia, se observó que presentan una relación inversa, indicando que existen zonas que presentan una labranza desuniforme del lote, lo que permite generar planes de preparación y manejo diferencial del suelo, tanto en manejo agronómico, como en la preparación del mismo a través de una mejor graduación y calibración del respectivo parque de maquinaria agrícola, para así romper las capas endurecidas en estas zonas y garantizar una uniformidad de

preparación del suelo, lo cual se traduce en un mejor desarrollo radicular de los cultivos transitorios allí presentes.

Figura 1. Histograma de las pruebas físicas.



Según el análisis geoestadístico, para las variables de profundidad y resistencia a la penetración, y tomando como punto de partida el cálculo del histograma, podemos concluir que dichas variables presenta anisotropía; es decir, dependen directamente de la distancia, pues los valores obtenidos de kurtosis y skewness se acercan a los valores adecuados para tal fin (3 y 0).

6.1.2.2. Mapas de distribución de pruebas químicas.

— Nitrógeno (N).

Respecto a los niveles de Nitrógeno, se pueden observar valores entre 0.27 y 0.66 % con un promedio de 0.41%, lo que permite separar zonas de mayor y menor contenido de este nutriente. En el mapa de variabilidad se observa muy bien definidas las zonas con menor a mayor contenido de Nitrógeno.

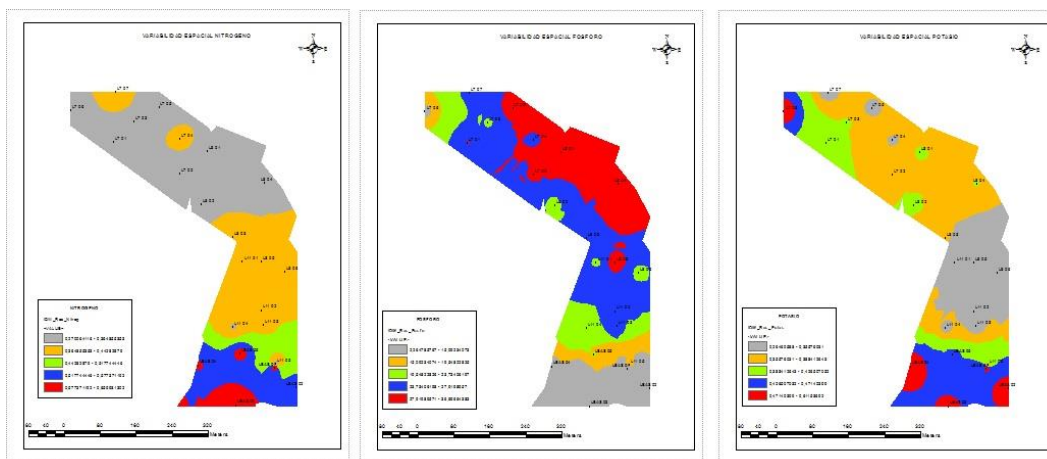
— Fósforo (P).

Respecto al contenido de Fósforo, se tienen valores que van desde 0 a 37 mg/kg y un promedio de 22.2 mg/kg. Presentando zonas con déficit en el contenido de este elemento; pero ninguna zona con exceso, según la tabla de niveles nutricionales para el cultivo de maíz que deben estar entre 20–40 mg/Kg.

— Potasio (K).

Para este elemento se encontró variabilidad espacial, obteniendo valores que van desde 0.25 a 0.62 $\text{cmol}(+)/\text{Kg}$, no se encontraron zonas con deficiencia de este elemento; pero sí se encontraron zonas con aumento en la presencia de Potasio, según los niveles nutricionales para el cultivo de maíz, los valores para este elemento deben estar entre 0.2–0.4 $\text{cmol}(+)/\text{Kg}$.

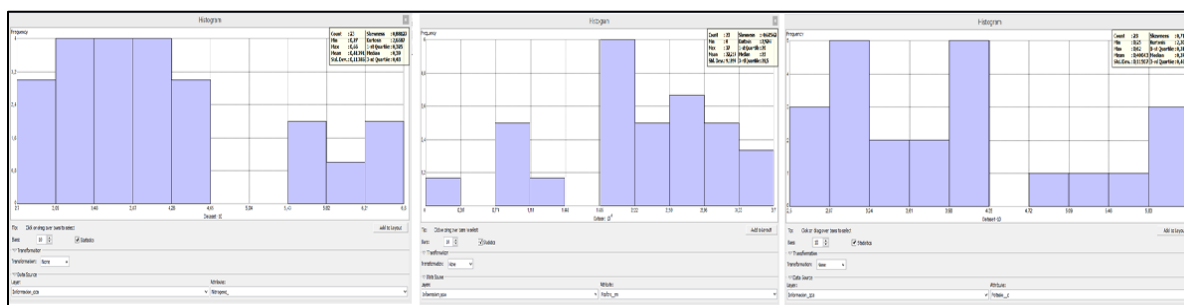
Mapa 3. Variabilidad espacial de los elementos Nitrógeno, Fósforo y Potasio.



Nota: en la figura observamos la distribución espacial de los elementos de Nitrógeno, Fosforo y Potasio presente en la zona de estudio

Según los mapas de variabilidad espacial de Nitrógeno, Fósforo y Potasio, se puede observar que las zonas con contenido de Nitrógeno y Potasio bajos son las zonas con mayor presencia de Fósforo, indicando que los usos de estos elementos son inversamente proporcionales.

Figura 2. Histograma de los elementos Nitrógeno, Fósforo y Potasio.



— Calcio (Ca).

El elemento Calcio presenta una poca variabilidad espacial con valores entre 1.55–2.5 cmol(+)/Kg, presentando un déficit de este elemento en la zona de estudio, según los niveles nutricionales para el cultivo de maíz, deben estar entre 3.0–6.0 cmol(+)/Kg.

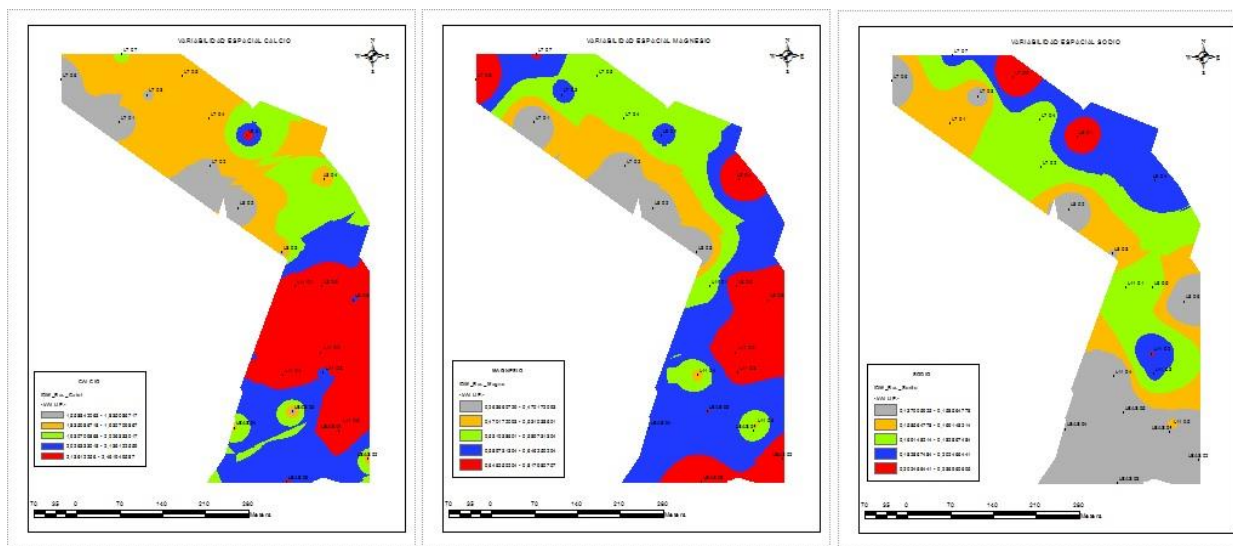
— Magnesio (Mg).

Este elemento, al igual que el Calcio, presenta muy poca variabilidad espacial en la zona de estudio, obteniendo valores entre 0.26 – 0.82 cmol(+)/Kg. Para el caso de este elemento, la zona de estudio también presenta un déficit de este elemento, pues, según los niveles nutricionales, deben estar entre 1.5 – 2.5 cmol(+)/Kg.

— Sodio (Na).

El elemento Sodio presenta muy poca variabilidad espacial con valores que van desde 0.13 hasta 0.23 cmol(+)/Kg, lo cual indica que la zona de estudio presenta una insuficiencia en su contenido. Según la tabla de valores nutricionales deben estar entre 0.5–1.0 cmol(+)/Kg.

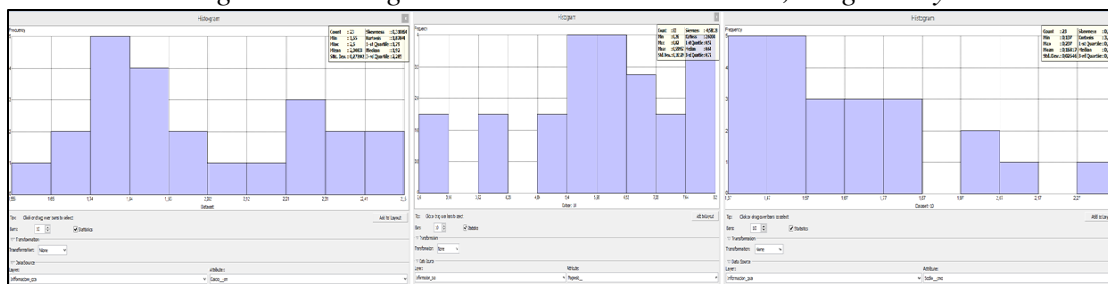
Mapa 4. Variabilidad espacial de los elementos Calcio, Magnesio y Sodio.



Nota: en los mapas observamos la distribución espacial de los elementos de Calcio, Magnesio y Sodio presente en la zona de estudio

Para el caso de los elementos Calcio, Magnesio y Sodio la Granja Experimental Montelindo, presenta un alto déficit de estos, según los valores nutricionales necesarios para un cultivo de Maíz. Según los mapas de variabilidad espacial que se obtuvieron, se puede observar que los valores de sodio son inversamente proporcionales a los valores de Calcio y Magnesio, en la mayor parte de la zona de estudio.

Figura 3. Histograma de los elementos Calcio, Magnesio y Sodio.



— Hierro (Fe).

La presencia de este elemento obtuvo valores que van desde los 110–243 mg/Kg., presentando variabilidad espacial en la zona. Según los valores nutricionales presenta un alto

contenido de hierro, debido a que la tabla de contenido nutricional para este tipo de cultivo debe estar entre valores entre 25–50 mg/Kg.

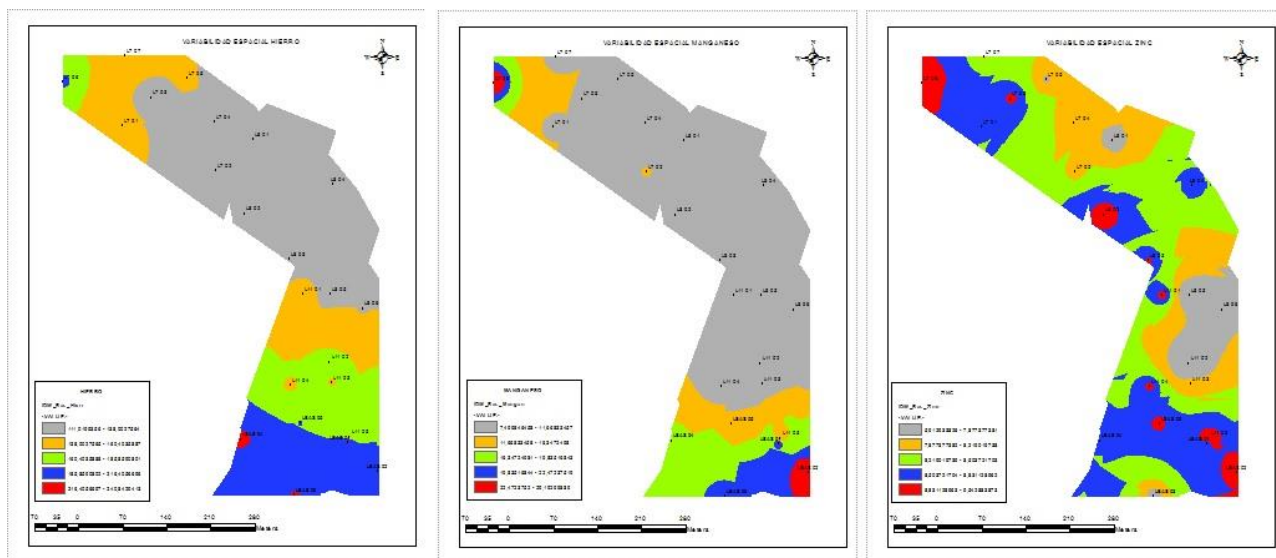
— Manganeseo (Mn).

El elemento Manganeseo se encontró en cantidades que van desde los 7.43–29.55 mg/Kg., obteniendo así una buena variabilidad espacial en la zona. Según la tabla de valores nutricionales, se debe tener cantidades que van desde 5.0–10.0 mg/Kg, lo cual indica la presencia de zonas con una alta presencia de este elemento.

— Zinc (Zn).

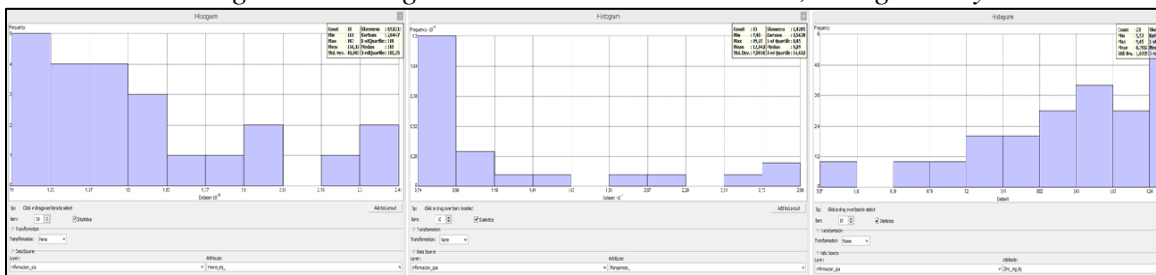
El elemento Zinc presenta una poca variabilidad espacial en la zona, observando valores que van desde los 5.57–9.65 mg/Kg, para el caso de este estudio muestra que se tiene un alto contenido de este elemento en la zona. Según los valores nutricionales necesarios para el cultivo de maíz deben ir entre 1.5–3.0 mg/Kg.

Mapa 5. Variabilidad espacial de los elementos Hierro, Manganeseo y Zinc.



Nota: Según los mapas de variabilidad, podemos observar que la presencia de Zinc es inversamente proporcional a la presencia de Hierro y Manganeseo.

Figura 4. Histograma de los elementos Hierro, Manganeso y Zinc.



— Cobre (Cu).

El elemento Cobre, presenta una variabilidad espacial con valores que van desde 3.76–6.87 mg/Kg. Según la tabla de valores nutricionales requeridos para el cultivo de maíz, deben estar entre 1.5–3.0 mg/Kg, lo cual muestra que tenemos una alta presencia de Cobre en la zona de estudio.

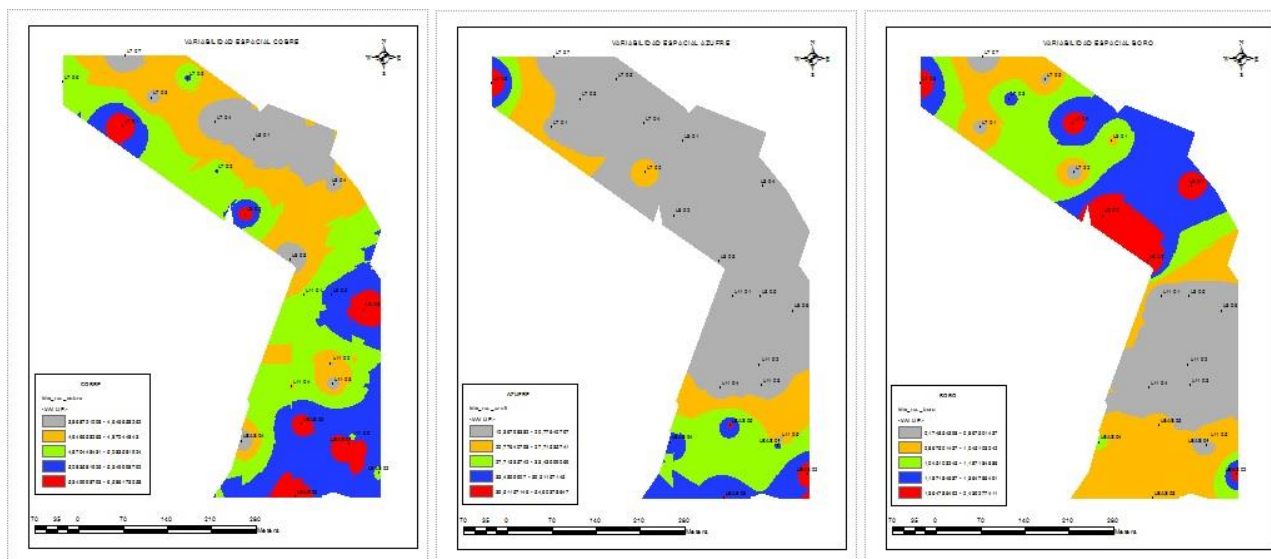
— Azufre (S).

Este elemento muestra una muy buena variabilidad espacial, con valores entre 7.56–55.57 mg/Kg; lo cual indica zonas con déficit de azufre, según los valores nutricionales necesarios para el cultivo de maíz; sin embargo, muestra también zonas con un alto contenido de este. Según la tabla de variabilidad, los valores requeridos deben estar entre 10.0–20.0 mg/Kg.

— Boro (B).

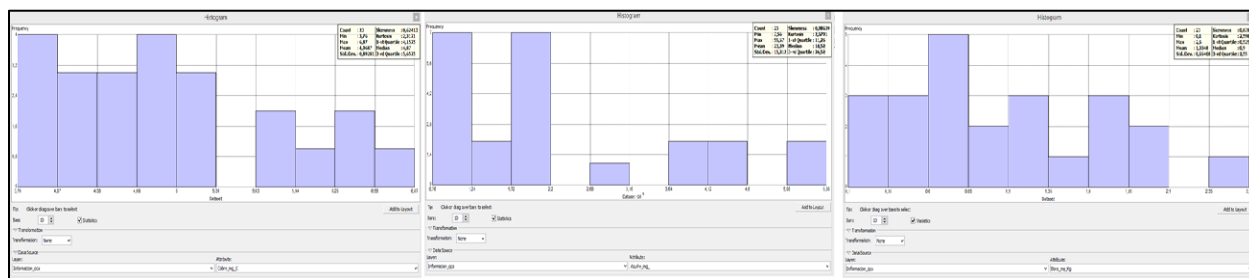
El elemento Boro se puede encontrar con valores entre 0.1–2.6 mg/Kg., mostrando relativamente poca variabilidad espacial; empero, en nuestra zona de estudio se tienen zonas con un déficit de este elemento y otras zonas con exceso. Según, los valores nutricionales para el cultivo de maíz, se deben obtener valores entre 0.2–0.4 mg/Kg.

Mapa 6. Variabilidad espacial de los elementos Cobre, Azufre y Boro.



Nota: según los mapas de variabilidad observamos que, para el caso de la presencia de Cobre, Azufre y Boro en la zona de estudio, las cantidades de Azufre son menores en relación a las cantidades Cobre y Boro en la mayoría del territorio estudiado.

Figura 5. Mapa de variabilidad espacial de los elementos Cobre, Azufre y Boro.



6.1.2. Mapas de variabilidad

Granulometría

— Arena.

Según los análisis de granulometría realizados a las muestras tomadas en la Granja Experimental Montelindo, se obtienen valores que van desde 50–65%, con un promedio de 56.4%.

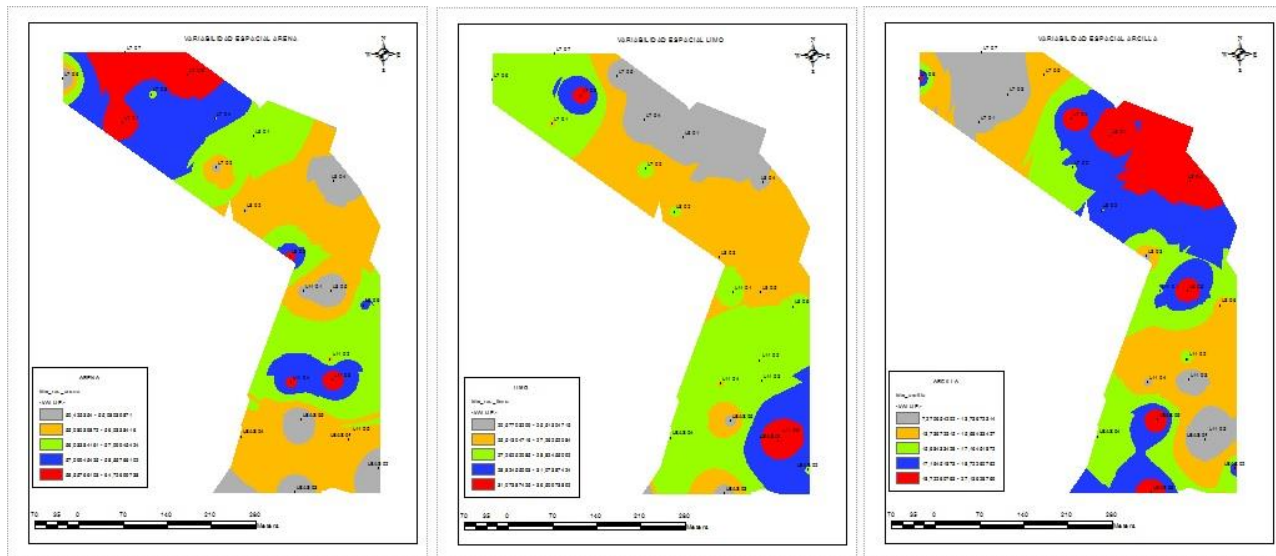
— Limo.

Según los valores obtenidos de granulometría, la presencia de limo van desde el 20–37%, con un promedio de 27.4%.

— Arcilla.

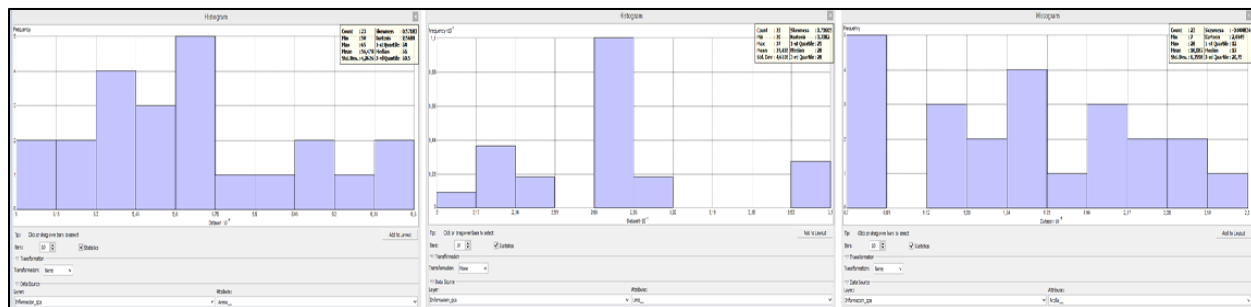
La presencia de arcilla en las muestras tomadas para los análisis de granulometría se obtuvieron valores que van desde el 7 – 28%, con un promedio de 16.2%.

Mapa 7. Variabilidad espacial de los elementos arena, limo y arcilla.



Nota: según los mapas de variabilidad, podemos observar que la zona de estudio es un suelo predominantemente areno, limoso y con zonas netamente arcillosas.

Figura 6. Histograma de los elementos arena, limo y arcilla.



Conclusiones

- Los coeficientes de variación presentes en los análisis estadísticos para las pruebas físicas y químicas no son un factor confiable para toma de decisiones en este estudio, debido a que no muestran cambios significativos entre ellos.
- Según el análisis geoestadístico para las variables analizadas y tomando como punto de partida el cálculo de los diferentes histogramas, se concluye que las mismas presentan anisotropía; es decir, dependen directamente de la distancia, lo que se traduce en un manejo diferencial de los elementos en la zona de estudio.
- La obtención de diferentes valores de profundidad nos indica que no se ha tenido un tratamiento uniforme en el arado correcto en la preparación de los lotes para el cultivo de maíz.
- La región presenta zonas con déficit de elementos como Fósforo, Calcio, Magnesio, Sodio y Boro.
- La región presenta zonas con exceso de elementos como Potasio, Hierro, Manganeso, Zinc, Cobre y Azufre.
- A pesar de tener zonas con déficit o exceso, tenemos zonas con elementos en los límites normales, según los valores nutricionales requeridos para el cultivo de maíz.
- Los mapas de interpolación obtenidos por el método de IDW son de gran importancia para el manejo de estrategias de sitio específico, ya que nos indican zonas con menor o mayor concentración de ciertas variables, siendo una herramienta importante para la toma de decisiones.

Recomendaciones

- Se recomienda generar planes de manejo diferencial del suelo al momento de su arado.
- Se recomienda realizar planes en el uso de fertilizantes, con el fin de obtener un incremento de elementos en zonas que presentan déficit de estos.
- Se recomienda realizar análisis químicos del suelo periódicamente con la finalidad de llevar un buen registro de los puntos o zonas con déficit o exceso de elementos, para así llevar un mejor control diferencial de la zona.
- Se recomienda realizar un manejo periódico respecto a la generación de mapas de fertilidad, productividad, recomendaciones agrícolas e interpolaciones que involucren datos agroquímicos y otros datos recopilados o almacenados.

Referencias

- Bongiovanni, R. (2004). La agricultura de precisión en la cosecha. IDIA. *XXI Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario*, 6 (1), pp. 85-90.
- Brouder Applying Site. (1999). "Specific management in Soil Fertility Research and Developing Management Information for Variable Rate Technologies". In: *Proceedings of Information Agriculture Conference*. Purdue University.
- Buol, S. W., Hole, F. D., y McCracken R. J. (1983). *Génesis y Clasificación de Suelos*. México: Trillas.
- Castrignanò, A., *et al.* (2000). Study of spatial relationship among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. *Geoderma*, 97 (1), pp. 39-60.
- Dinnes, D. L., Karlen, D. L., Jaynes, D. B.; Kaspar, T. C, Hatfield J. L.; Colvin, T. S. & Cambarella C. A. (2002). Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agron*, 94, pp. 153-171.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). "Defining and assessing soil quality" (pp. 3-21). In: Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., & Stewart, B. A. (Eds.) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, WI., U.S.A.: Soil Sci. Soc. Am. Special publication.
- Emery, X. (2007). *Apunte de Geoestadística*. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- Espinosa, J. (2000). Manejo de nutrientes en agricultura por sitio específico en cultivos tropicales. *Informaciones Agronómicas*. 39 (1), pp. 9-13.

- Izaurrealde, R. C., Rosemberg, N. J., & Lal, R. (2000). Mitigation of climate change by soil carbon sequestration: Issues of science, monitoring, and degraded lands. *Adv. Agron.* 70: pp. 1-75.
- Malagón, C. D., Pulido, C., Llinás, R. R.; Chamorro, B. C., y Fernández, L. J. (1995). *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. Santa Fe de Bogotá: IGAC.
- Martínez, L. 2003. «Bases para evaluar la fertilidad del suelo en Agricultura de Precisión» (pp. 139-152). En: Triana M.; R. Silva; M. Gómez y G. Peñalosa (Eds.). *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo-Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá.
- Nyborg, M., Solberg, E. D., Malhi, S. S., & Izaurrealde R. C. (1995). “Fertilizer N, crop residue, and tillage alter soil C and N contents after a decade” (pp. 93-100). In: Lal R., Kimble, J., Levine, E., & Stewart, B. A. (Eds.) *Advances in Soil Science: Soil Management and Greenhouse Effect*. Florida, USA: Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton.
- Ortega, R., y Flores, L. (1999). «Introducción al manejo sitio–específico» (pp. 13-46). Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (Ed.). *Agricultura de precisión*. CRI Quilamapu, Chile.
- Ortiz, G. (8 de diciembre de 2012). *Qué son los Sistemas de Información Geográfica. Tipos de SIG y modelos de datos. Un artículo introductorio para entender las bases de los SIG* [publicación en un Blog]. Recuperado de:
<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>.
- Ovalles, F. (1992). *Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad*. Maracay: Fonaiap-Ceniap-IIAG.

- Peralta, N. R., Barbieri, P., Gowland, T., Aparicio, V., y Costa, J. L. (2015). Agricultura de precisión: dosis variable de nitrógeno en cebada. *Ciencia Del Suelo*, 33 (1), pp. 131-137.
- Pérez-Ruiz, M., & Shrini, K. U. (2012). *GNSS in Precision Agricultural Operations, New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems*. En: Elbahhar, F. (Ed.), *InTech*. DOI: 10.5772/50448..
- Ruffo, M., Bollero, G., Bullock, D. S. & Bullock, D. G. (2006). Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agric* 7 (1), pp. 327-342.
- Solberg, E. D., *et al.* (1997). "Carbon storage in soils under continuous cereal grain cropping: N fertilizer and straw" (pp. 235-254). In: Lal, R., Kimble J. M., Follett R. F., & Stewart, B. A. (Eds.). *Management of Carbon Sequestration in Soil. Advances in Soil Science*. Florida, USA: CRC Press, Boca Raton.
- Trangmar, B. B., Post, R. S., & Uehara, G. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 38 (1), pp. 45-94.
- Villatoro, M., Henríquez, C., y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32 (1), pp. 95-105.