

**Manual de procedimientos para elaboración de
mapas de variabilidad espacial de suelos y su
aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana,
Zamorano, Honduras**

**Pablo Roberto Duarte Hernández
Carlos Javier Montaña Avalos**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**
Noviembre, 2020

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingenieros Agrónomos en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por:

Pablo Roberto Duarte Hernández
Carlos Javier Montaña Avalos

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2020

Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras

Presentado por:

Pablo Roberto Duarte Hernández
Carlos Javier Montaña Avalos

Aprobado:



Gloria Gauggel (Nov 15, 2020 22:10 CST)

Gloria E. Arévalo, Dra.
Asesora Principal



Rogel Castillo, M.Sc
Director
Departamento de Ciencia y Producción
Agropecuaria



Alexandra Manueles (Nov 16, 2020 07:58 CST)

Alexandra M. Manueles, M.Sc
Asesora



Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Vicepresidente y Decano Académico



Gabriela M. David, M.Sc
Asesora

Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras

**Pablo Roberto Duarte Hernández
Carlos Javier Montaña Avalos**

Resumen. La agricultura en el mundo viene enfrentando el desafío de aumentar la producción agrícola en respuesta a la creciente demanda de la población y reducir su efecto ambiental. La Agricultura de Precisión se define como un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas como semillas, agroquímicos y correctivos con base en la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución correcta en cantidad de esos insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada área de manejo establecida. El objetivo fue desarrollar un manual de procedimientos y probar su aplicación en un área de la EAP que cuenta con 7.7 ha ubicada en los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo. Para el estudio se trabajó con la información de 50 muestras de suelo, colectadas para la generación de los mapas del manual. Para su elaboración se utilizó el programa de Sistemas de Información Geográfico (SIG) de uso libre y de código abierto llamado QGIS® versión 3.10.8. Se generaron mapas de variabilidad espacial de suelos de textura, densidad aparente, pH, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, cobre, hierro, y zinc. Se generó un manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Zamorano.

Palabras clave: Agricultura de Precisión, mapeo, QGIS®, Sistemas de Información Geográfica, variabilidad espacial.

Abstract. Agriculture in the world has been facing the challenge of increasing agricultural production in response to the growing demand of the population and reducing its environmental impact. Precision agriculture is defined as a set of techniques aimed at optimizing the use of agricultural inputs such as seeds, agrochemicals and corrective agents based on the quantification of the spatial and temporal variability of agricultural production. This optimization is achieved with the correct distribution in quantities of these inputs, depending on the potential and the need of each established management area. The objective was to develop a procedures manual and test its application in an area of the EAP that has 7.7 ha located in the 2 and 3 plots of La Vega, Monte Redondo. For the study we worked with the information of 50 soil samples, collected for the generation of the manual maps. For its elaboration, the free software and open source Geographic Information Systems (GIS) program called QGIS® version 3.10.8 was used. Soil spatial variability maps were generated on texture, apparent density, pH, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, copper, iron, and zinc. A manual of procedures for the preparation of maps of spatial variability of soils and their application in the 2 and 3 plots of La Vega, Monte Redondo, Zamorano was generated.

Key words: Geographic Information Systems, mapping, Precision Agriculture, QGIS®, spatial variability.

ÍNDICE GENERAL

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resume.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexo.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	6
4. CONCLUSIONES	20
5. RECOMENDACIONES.....	21
6. LITERATURA CITADA	22
7. ANEXO.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS Y ANEXO

Figuras	Página
1. Fases para desarrollar el manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.	5
2. Método de cuarteo de suelo para homogenizar muestras de suelo. A) sobre una superficie dura y limpia hacer un cono, b) homogenizar de nuevo y volver a formar el cono, c) enrasar y dividir la muestra, d) muestra dividida en cuartos y c) escoger cuartos opuestos y descargar los otros dos.....	8
3. Ubicación del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Francisco Morazán, Honduras.....	10
4. Mapa de densidad aparente del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	11
5. Mapa de % de arcilla del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con IDW.....	12
6. Mapa de ph del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	12
7. Mapa de nitrógeno (n) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	13
8. Mapa de fósforo (p) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	13
9 mapa de fósforo (p) segunda zonificación del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	14
10. Mapa de potasio (k) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	14
11. Mapa de calcio (ca) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	15
12. Mapa de magnesio (mg) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	15
13. Mapa de sodio (na) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	16
14. Mapa de cobre (cu) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con IDW.....	16

15. Mapa de hierro (fe) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	17
16. Mapa de manganeso (mn) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	17
17. Mapa de zinc (zn) del suelo del lote 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.	18
18. Portada del manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad de suelos.	18

Anexo

Página

1. Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad de suelos.	26
---	----

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en el mundo viene enfrentando a lo largo del tiempo el desafío constante de aumentar la producción agrícola en respuesta a la creciente demanda de la población. Este aumento, a su vez, se ha producido por la expansión de las nuevas áreas agrícolas, y dentro de cada área el aumento de los rendimientos, que se obtuvo mediante la generación de nuevas tecnologías por medio de semillas mejoradas, insumos modernos y agroquímicos más eficientes. Esto, junto al manejo adecuado de nuevas máquinas agrícolas para preparar, sembrar, cultivar, cosechar y procesar los productos, permitió avances significativos en el área de producción de alimentos. Sin embargo, con la modernización de las prácticas agrícolas, surgen nuevos desafíos, principalmente respecto al concepto de sustentabilidad ambiental y económica del proceso de producción. En este contexto la investigación, extensión e innovación de los segmentos relacionados al área agrícola se han realizado para enfrentar esos nuevos desafíos, llegando a la conclusión que la generación de tecnología permite desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferenciadamente la variabilidad natural del área productora (Claret 2006).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) menciona que la agricultura en Latinoamérica y el Caribe se encuentra en constante crecimiento, esto se refleja en la producción agrícola y pesquera. En la década de los años 2019 a 2028, tendrá un incremento del 15% localizándose este aumento en los países que estén en desarrollo, presentando como consecuencia un incremento en inversiones tecnológicas y la disponibilidad de recursos. Muchas veces, en las áreas dedicadas a la producción agrícola cuentan con tecnología que fácilmente es adaptable para implementar Agricultura de Precisión, ya que es uno de los caminos que se está dirigiendo la agricultura convencional (OCDE y FAO 2019).

En la década del 70, el Departamento de Defensa Americano comenzó el proyecto para el lanzamiento de satélites geoestacionarios alrededor de la Tierra, con el propósito de localizar objetivos militares de forma exacta y rápida. A este proyecto se le denominó Sistema de Posicionamiento Global o GPS, aunque su nombre correcto es NAVSTARGPS (versión mejorada del sistema TRANSIT, “Navigation Satellite Timing And Ranging”). El principal objetivo del GPS cuando se creó era guiar proyectiles desde plataformas móviles hasta objetivos de países enemigos. Sin embargo, hoy en día se aplica a múltiples actividades civiles, tales como la agricultura. Los Mapas de Rendimiento (MR) son imágenes georreferenciadas con una escala de colores que indican el rendimiento de un punto en específico. Por lo general, son desarrollados por científicos y especialistas de la agricultura, donde los interesados (agricultores, cosechadores y productores) deben pagar un precio alto para obtenerlos. Los MR son entradas para el proceso de aplicación de Dosis Variable (DV) de los distintos insumos que necesita un cultivo (fertilizantes, herbicidas, riego). La idea del Manejo Sitio Específico (MSE, área de mayor desarrollo dentro de la Agricultura de Precisión (AP)) es hacer lo correcto en el lugar adecuado y en el momento oportuno (González *et al.* 2011).

La contaminación por fertilizantes se produce cuando éstos se utilizan en mayor cantidad de la que pueden absorber los cultivos, o cuando se eliminan por acción del agua o del viento de la superficie del suelo antes de que puedan ser absorbidos. Los excesos de nitrógeno y fosfatos pueden infiltrarse en las aguas subterráneas o ser arrastrados a cursos de agua. Esta sobrecarga de nutrientes provoca

la eutrofización de lagos, embalses y estanques y da lugar a una explosión de algas que suprimen otras plantas y animales acuáticos (FAO 2015). Dada la necesidad de evitar el desperdicio de fertilizantes, en especial el nitrógeno, que ocasionan pérdidas económicas y ambientales, es importante aplicar técnicas de mapeo de los suelos para hacer uso de la información aplicada en Agricultura de Precisión, de tal manera que no haya excesos o déficit de fertilizantes y otros insumos aplicados. Se tienen ejemplos como el Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR) a través de su informe **Manual de Agricultura de Precisión**, realiza un estudio de nuevos avances tecnológicos en la agricultura como, por ejemplo: creación de mapas de manejo con datos espaciales, tecnología de precisión para gestión de nutrientes, entre otros (Claret 2006).

La Agricultura de Precisión se define como un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas como semillas, agroquímicos y correctivos con base en la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución correcta en cantidad de esos insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo establecidas (Claret 2006).

Es importante mencionar que la aplicación de Agricultura de Precisión conlleva la utilización de diferentes avances tecnológicos, entre los que se incluyen la navegación satelital, distintos tipos de sensores, imágenes que se captan por diversos medios y sistemas de información geográfica. La información que se obtiene por estos y otros medios permite analizar muchos factores que inciden sobre los resultados de las cosechas (Rojas *et al.* 2016).

Con la implementación de Agricultura de Precisión es posible estudiar la variabilidad espacial que posee el suelo a través de técnicas geoestadísticas, estas técnicas permiten la estimación y modelación de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo mediante métodos de interpolación precisos como es el caso de Kriging y la semivarianza, estas herramientas son necesarias en geoestadística para la creación de mapas y establecer zonas de manejo (Cueva 2020). Además, esta rama de la estadística permite obtener propiedades que varían de un punto a otro en el suelo que está relacionado con el manejo que ha tenido y las características propias de ese suelo (Ruiz 2018).

Los procedimientos geoestadísticos se basan en tres pasos esenciales para desarrollar un análisis, los cuales son: a) realizar análisis exploratorio de datos, b) análisis estructural y c) predicción o interpolación de cada una de las variables sujetas a estudio (Guachamin 2019). Otros autores como Farfán y Sánchez (2018) mencionan que los métodos más utilizados para estudiar la variabilidad que posee el suelo son diseños anidados, análisis de regresión y análisis de semivarianza. Estos métodos permiten formar la distribución espacial de las características del suelo y al mismo tiempo es posible la elaboración de mapas con los valores de las características, todo esto sumando la aplicación de las herramientas a los terrenos destinados a la producción permite realizar un uso fraccionado del recurso al suelo.

Ahora bien, para realizar la modelación de las características que posee el suelo es necesario la utilización de herramientas como GPS para la toma de puntos, georreferenciando el lugar donde fue tomada la muestra de suelo para su análisis. Los programas de computación que permiten el traspaso de datos desde y hacia un computador, se pueden mencionar a "Garmin PCX5", "Magellan Waypoint", "Waypoint+", "GPS Pathfinder Office". Con los puntos georreferenciados en GPS y

los datos de laboratorio del análisis de suelo se puede proceder a la modelación del mapa de las características del suelo utilizando programas de Sistemas de Información Geográfica tales como: “FarmWorks” que es uno de los más utilizados por los productores, pero la mayoría de investigadores usan software como ArcGIS (de la empresa ESRI) o Envi para el procesamiento de imágenes (Claret 2006).

Todos estos programas conllevan una inversión ya que es necesaria la compra de una licencia, pero también existen algunos softwares SIG gratuitos en el mercado que cuentan con todas las herramientas necesarias para la modelación de mapas, entre estos programas se encuentran: GVSIG software para consultas, diseño y geoprocésamiento, SAGA GIS software para análisis Geo científico Automatizado, GRASS GIS software para datos ráster, vectoriales, crea animaciones con los archivos mencionados, QGIS software se pueden incorporar “pluggings” que permite realizar variedad de procesos con datos vectoriales y ráster (MASTERGIS 2019).

Conocer la variabilidad espacial del suelo de áreas destinadas a la producción agrícola crea el espacio para establecer sistemas de producción más competentes que permitan el uso adecuado, fraccionado y eficiente de insumos utilizados en la producción (Cueva 2020), para realizar el modelado de mapas es necesario contar con un manual de procedimientos para su creación y utilización. Los manuales de procedimientos son herramientas efectivas, las cuales son guías prácticas de políticas, procedimientos, controles de segmentos específicos dentro de una organización (Vivianco 2017).

La producción de cultivos en la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), Zamorano, se realiza de manera tradicional, mediante aplicación de fertilizantes basado en la necesidad del cultivo. Sin embargo, en los últimos años, se ha planteado la necesidad de hacer aplicaciones de fertilizante y otros insumos tomando en cuenta la variabilidad de los suelos. Se conoce la técnica de mapeo de suelos (Arévalo y Gauggel 2019), pero es necesario aplicarla en la delineación y manejo de suelos por zonas homogéneas. En la EAP, en la clase de manejo de suelos y nutrición vegetal se aplican técnicas para elaboración de mapas, pero es necesario crear un espacio que facilite al usuario hacer la aplicación de esta información, para ser más acertados en la toma de decisiones.

Se realizó un manual de procedimientos para la aplicación de Agricultura de Precisión en Zamorano, para su implementación en las áreas destinadas a la producción de la universidad ya que se cuenta con la tecnología suficiente para la realización de los procesos y metodologías que se plantean en el manual, el cual permite realizar tratamientos especializados con base en los cambios químicos y físicos que presenta el suelo. Se utilizaron de referencia los datos recolectados en el año 2020 en los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo en Zamorano, Honduras.

El estudio se limitó a generar un manual utilizando los conceptos desarrollados en la clase de Manejo de suelos y nutrición vegetal de la Carrera de Ingeniería Agronómica y del módulo de Sistemas de Información Geográfica, impartido por el Departamento de Ambiente y Desarrollo de la EAP, para la aplicación de prácticas de Agricultura de Precisión en la modelación de mapas de variabilidad espacial del suelo, en un lote determinado para la siembra de cultivos comerciales de EAP Zamorano ya que se pretende utilizar como guía en áreas destinadas a la producción.

Los objetivos de la investigación fueron:

- Generar un manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y aplicarlos en los suelos de la Escuela Agrícola Panamericana.
- Desarrollar una metodología para el mapeo de la variabilidad espacial de los suelos que facilite al usuario la generación de mapas para tomar decisiones más precisas en el manejo de la fertilización de cultivos.
- Aplicar metodología de Agricultura de Precisión con la elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos en la Escuela Agrícola Panamericana.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

Metodología aplicada

El estudio se desarrolló en cinco fases (Figura 1).



Figura 1. Fases para desarrollar el manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Fase 1. Los autores se capacitaron durante el desarrollo del programa de Pasantía Externa en la empresa DISAGRO S.A. colaborando en el área de Agricultura de Precisión, Duarte Hernández P; realizó la Pasantía en SEPLACOSA S.A. ubicada en Guatemala y Montaña Avalos C; la realizó en PRECISAGRO S.A. ubicada en Colombia, los conocimientos se integraron y plasmaron en este manual.

Fase 2. Se investigó sobre estudios realizados en Latinoamérica referentes a la aplicación de Agricultura de Precisión por medio del modelado de mapas de variabilidad espacial de suelos. La investigación se enfocó en conocer la metodología para la recolección de muestras de suelo en campo, el método de interpolación a utilizar en el programa SIG QGIS® y la interpretación de los mapas.

Fase 3. La información utilizada para la modelación de los mapas de variabilidad espacial de suelos fue tomada para el desarrollo de la investigación de la Tesis de Maestría titulada Manejo diferencial de los suelos mediante Agricultura de Precisión y convencional para la producción de maíz y frijol¹.

Fase 4. Se generó la modelación de los mapas de variabilidad espacial de suelos en el programa QGIS® versión 3.10.8 y se interpretaron los mapas para elaborar cálculos de fertilización.

Fase 5. Basado en el trabajo de la fase 4, se redactó el manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos utilizando el programa QGIS®.

¹ Rosas D. Estudiante del Programa Maestría de Agricultura Tropical Sostenible en Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, clase 2021. Comunicación personal. Diego.rosas@est.zamorano.edu

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos compila la metodología para la implementación de Agricultura de Precisión enfocada en la modelación de mapas de variabilidad espacial de suelos. La generación del manual se dividió en cinco fases:

Fase 1. Capacitación en Agricultura de Precisión

La capacitación de Duarte Hernández P; consistió en desarrollar habilidades para la generación de información geográfica elaborando mapas agronómicos generados a partir de vuelos con drones, aplicación de tecnología para fertilización variable con uso de drones aplicadores en el cultivo de caña de azúcar, manejo y uso de software de última generación para procesos de información geográfica, como ArcGIS y QGIS. Se desempeñó en la posición de Técnico GIS procesando información agronómica y de imágenes provenientes de vuelos con drones, descarga y post proceso de imágenes satelitales para cálculo de índices de vegetación NDVI y GNDVI, operación de Dron en el área de desempeño de la empresa SEPLACOSA en Guatemala que tomaba imágenes con sensores y luego post procesamiento de las imágenes calculando diferentes índices de vegetación entre ellos el NDVI, validación de protocolos para operación de Dron aplicador de fertilizantes.

La capacitación de Montaña Avalos C; consistió en realizar actividades de recolección de información de campo como la toma de muestras georreferenciadas, elaboración de programas nutricionales mediante herramientas de seguimiento nutricional como análisis foliar y análisis de suelo, tabulación de la información recolectada y capacitación en modelación de mapas en el programa ArcGIS® para la elaboración de programas de fertilización, aplicando metodología de Agricultura de Precisión. También adquirió conocimiento sobre estadística e interpretación de imágenes Satelitales y “Planet”, todo ello lo realizó en PRECISAGRO ubicado en Colombia en los cultivos de banano, palma y papaya principalmente.

Fase 2. Revisión de literatura

La investigación se realizó acerca de la metodología de Agricultura de Precisión para su implementación en campo, enfocada en la modelación de mapas que expresen la variabilidad espacial de los suelos. La Agricultura de Precisión se define como un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas como semillas, agroquímicos y correctivos con base en la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola (Claret 2006). Para la modelación de mapas de variabilidad espacial de suelos hay dos puntos clave que son: realizar un correcto muestreo de suelo georreferenciado y utilizar el método de interpolación que mejor se aplique en función de la dependencia espacial de los puntos y los resultados del análisis de laboratorio.

Una de las técnica de muestreo de suelo comúnmente utilizada en la Agricultura de Precisión para modelación de mapas de variabilidad espacial es el Muestreo Sistemático Georreferenciado, es una de las técnicas para la recolección de datos en campo y que consiste en utilizar una grilla de muestreo para establecer la ubicación y distancia de los puntos para la toma de muestra (Ortega 2019; Reynolds 2017).

Para realizar un correcto muestreo de suelo utilizando Agricultura de Precisión es necesario utilizar una grilla de muestreo para distribuir heterogéneamente los puntos de muestreo de suelo y sus coordenadas, esto permite asignar valores del resultado del análisis de laboratorio a cada muestra y con la modelación de mapas conocer la distribución en el terreno de la propiedad físicas y/o químicas evaluadas. El propósito de generar grilla de muestreo es establecer el número y ubicación de muestras en función de la distribución esperada que tendrán en el terreno para obtener información confiable y realista del suelo y crear mapas que permitan tomar decisiones o acciones agronómicas ajustadas al cultivo.

La densidad de cuadrícula o grilla de muestreo recomendada al momento de realizar un primer mapeo de fertilidad corresponde a una muestra por hectárea o dimensiones de 100 m × 100 m. Para la densidad de los puntos muestreo de suelo se recomienda tomar entre 40 a 50 muestras compuestas, con esta densidad es posible obtener mapas más representativos y un proceso geoestadístico satisfactorio. Para el número de puntos de muestreo se recomienda realizar entre 5 a 10 por cuadrícula, todos estos parámetros establecidos permite que exista dependencia espacial entre punto y punto (Resende y Coello 2014). Ortega (2018) en su investigación utilizó una densidad de muestreo parecida en dos campos experimentales, uno de 8.4 hectáreas y el otro de 6.4 hectáreas, realizó 20 muestras por campo resultando en un promedio de 2.7 muestras por hectárea. Otros autores recomiendan muestrear de 30 puntos en adelante ya que con esta densidad de muestras la información es más representativa y detallada (Castro *et al.* 2016).

La aplicación de Agricultura de Precisión busca un mayor grado de detalle en la información sobre las condiciones del suelo para fomentar decisiones de manejo acertadas. Para este tipo de muestreo es importante conocer el punto exacto de la muestra para mapear las variaciones de fertilidad dentro de las áreas cultivadas y definir intervenciones de manejo localizado (o sitio-especifico), que procura optimizar el uso de correctivos y fertilizantes por medio de aplicaciones a dosis variable de acuerdo con la demanda local del cultivo (Resende y Coello 2014). La metodología empleada en Agricultura Tradicional respecto al muestreo de suelo es que se basa en la toma de muestras compuestas, donde cada muestra puede representar uno o más lotes, sin importar la distancia entre muestras y por ende se desprecia u omite la variabilidad del suelo, por tal razón no es posible realizar mapas que expresen la variabilidad espacial del suelo de interés.

Los materiales básicos para realizar un muestreo sistemático georreferenciado son: grilla de muestreo, GPS, barreno o pala, balde plástico, bolsas plásticas (50 unidades) de 1 kg de capacidad, limpias, sin sellos y marcador permanente. La grilla de muestreo debe contar con la distribución establecida de los puntos de muestreo para el área a evaluar.

Luego de preparar los materiales a utilizar para el muestreo de suelo dirigirse al campo y con el GPS y la grilla de muestreo ubicar cada punto de muestreo, luego proceder a barrenar o palear para extraer la muestra de suelo, depositarla en una bolsa de plástico e identificar la bolsa, este proceso es el mismo para la toma de cada uno de los puntos de muestreo de suelo. Para la extracción de las muestras tomar entre cinco a diez submuestras por sitio de muestreo, cada submuestra depositarla en el balde plástico y mezclar para homogenizar la muestra, luego realizar el método del cuarteo de suelo y depositar el total en una bolsa plástica de 1 kg.

La toma de muestra puede realizarse con pala o con barreno, la profundidad recomendada para la toma de cada muestra es de 0 a 20 o hasta 30 cm, dependiendo del cultivo (Resende y Coello 2014;

Reynolds 2017). En cultivos anuales profundidad de 0-20 cm; para forrajes profundidad de 0-15 cm y en caso de frutales o forestales proponen dos profundidades de muestreo, por la longitud de sus raíces: de 0-20 cm y de 20-40 cm (Lassaga 2011).

Preparación muestra compuesta por el método del cuarteo

De las submuestras tomadas se mezcla para homogenizarla; se hace una reducción de esta mediante el sistema de cuarteo, que consiste dividir en cuatro partes iguales y se separa dos cuartos opuestos hasta llegar a una muestra final de 1 kilogramo (Figura 2).

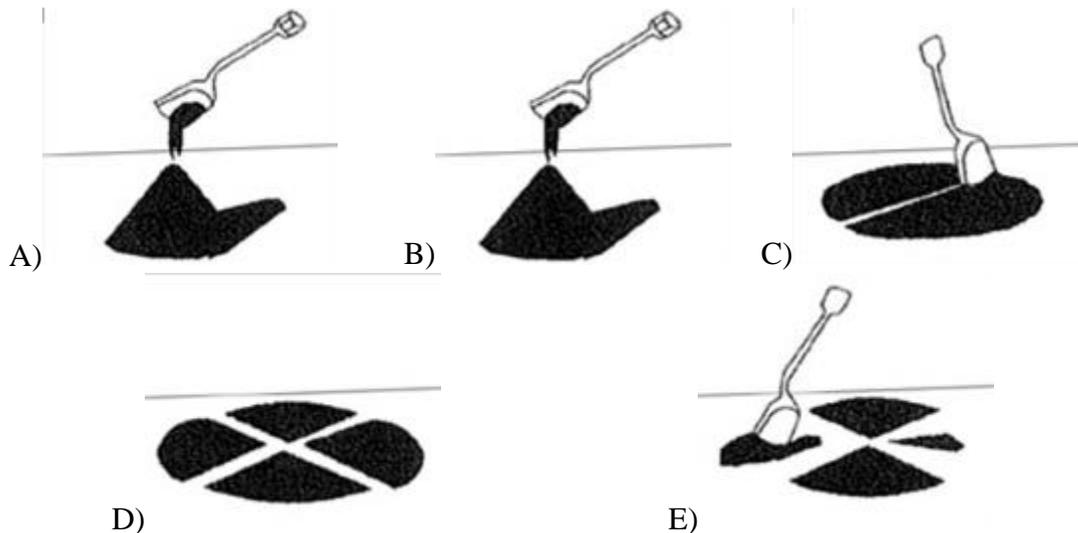


Figura 2. Método de Cuarteo de suelo para homogenizar muestras de suelo. A) Sobre una superficie dura y limpia hacer un cono, B) Homogenizar de nuevo y volver a formar el cono, C) enrasar y dividir la muestra, D) Muestra dividida en cuartos y C) Escoger cuartos opuestos y descargar los otros dos.

Fuente: Osorio 2012.

Luego de recolectar la información en campo, se procesa para generar el mapa de variabilidad espacial. La interpolación es el proceso de utilizar puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos (QGIS.org 2020). La autocorrelación espacial cuantifica la cantidad de objetos cercanos en comparación con otros objetos cercanos, Gabri (2018) menciona que una de las principales razones por las que la autocorrelación espacial es importante es porque la estadística se basa en observaciones independientes entre sí, es decir, si existe autocorrelación en un mapa, entonces las observaciones son independientes unas de otras.

Para evaluar la autocorrelación espacial existen herramientas de análisis exploratorio para datos espaciales por medio de interpoladores espaciales tales como: Ponderación de la distancia inversa (IDW), Vecino más cercano (Nearest-neighbor interpolation) o Kriging con sus variantes (Co-Kriging, universal, simple y ordinario). Los más utilizados en estudios de variabilidad espacial de suelos son Kriging e IDW. Kriging e IDW son los interpoladores que mejor se aplican ya que establecen un peso para cada punto (Frolla *et al.* 2015; Fuenzalida 2015).

El interpolador Kriging utiliza la técnica estadística del semivariograma, ya que este representa la varianza entre valores de puntos observados a distancias predeterminadas y permite estimar la distancia máxima dentro de la cual los puntos presentan dependencia espacial. Esta interpolación es considerada como el Mejor Estimador Lineal Insesgado o Estimador Lineal Insesgado Óptimo: es lineal porque sus estimaciones son combinaciones lineales ponderadas de los datos existentes y es insesgado porque procura que la media de los errores sea nula, esto es mejor porque los errores de estimación tienen una variancia mínima (Frolla *et al.* 2015; Fuenzalida 2015; Córdoba *et al.* 2017; Bramley 2018; QGIS.org 2020).

El interpolador Ponderación de la Distancia Inversa (IDW, por sus siglas en inglés) consiste en que las diferencias entre los datos espaciales dependen solo de las distancias entre dos localizaciones. Así, los valores de la variable que estén más cerca de la ubicación sujeta a predicción tendrán mayor ponderación o influencia en el valor de predicción que aquéllos que están más lejos. El IDW requiere solo la estimación de la superficie a interpolar lo cual influye en la sencillez de cálculo, la simplicidad del proceso, la velocidad de la ejecución y los resultados obtenidos (Bramley 2018; Navarrete y López 2019).

También se investigó y plasmó en el manual, el respaldo bibliográfico acerca del manejo de una herramienta de SIG, en este caso programa QGIS[®], para gestionar la información recolectada por medio de la Interpolación Kriging e IDW, y para la interpretación de los mapas.

Fase 3. Recopilación de información tomada en campo

La información de campo fue recolectada por el Ing. Rosas² para la modelación de los mapas de variabilidad espacial de suelos. La toma de muestras se basó en la metodología del muestreo sistemático georreferenciado aplicado en Agricultura de Precisión.

Las actividades que se realizaron fueron: toma de coordenadas del perímetro del área de estudio con un GPS Gramin[®] eTrex 10 para su delimitación, posteriormente con el programa “Google Earth[®]” construyó un polígono referente al perímetro del terreno con un área de 7.4 hectáreas, luego elaboró una cuadrícula o grilla de muestreo de 100 m × 100 m de área por cuadrante sobrepuesta en el polígono del perímetro, con estos parámetros permitieron realizar el muestreo en 10 cuadrantes con cinco muestras por cuadrante, siendo un total de 50 muestras, después estableció la distribución de los puntos de muestreo con sus coordenadas, posteriormente en campo realizó el muestreo de suelo ubicando cada punto con sus coordenadas, cada muestra la identificó con un código de su autoría para enviar las muestras al Laboratorio de Suelos de Zamorano (LSZ) y procesar las muestras. Los análisis que realizó para la modelación de los mapas de suelos fueron: densidad aparente, textura, pH, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, cobre, hierro, manganeso y zinc. Luego de recibir los resultados del análisis de suelo el Ing. Rosas³ proporcionó los recursos para la modelación de mapas de variabilidad de suelos, los recursos utilizados fueron: perímetro del terreno, coordenadas de los 50 puntos de muestreo y los resultados del análisis de suelo.

^{2,4} Rosas D. Estudiante del Programa Maestría de Agricultura Tropical Sostenible en Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, clase 2021. Comunicación personal. Diego.rosas@est.zamorano.edu

Ubicación del área de estudio para recolección de muestras de suelo

La aplicación de la metodología se realizó en los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano (Figura 3). Los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo se ubican en el km 30 en la carretera de Tegucigalpa a Danli, Valle de Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras. El lugar se encuentra a una altura de 753 msnm. con precipitación promedio anual de 1,110 mm y una temperatura promedio anual de 24.5 °C. El área para la recolección de las muestras de suelo cuenta con 7.44 hectáreas, dimensiones del área de estudio 380 × 230 m, que durante la recolección de muestras el terreno se encontraba cultivado con las variedades de frijol Tolupán Rojo y Chortí Rojo.

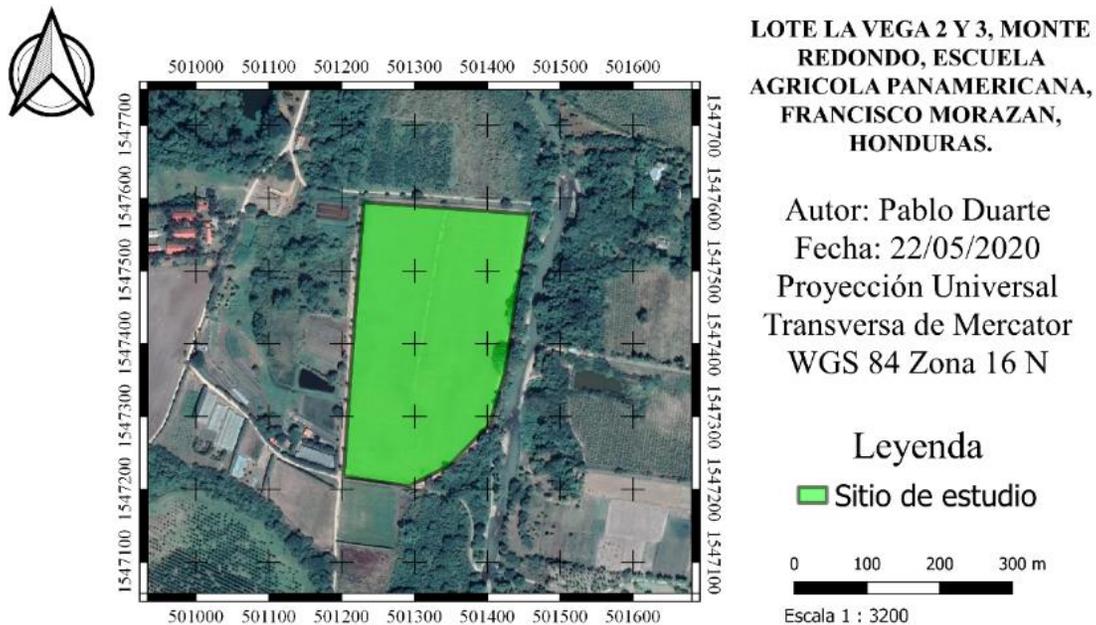


Figura 3. Ubicación de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana, Francisco Morazán, Honduras.

Fase 4. Generación de mapas de variabilidad de suelo e interpretación de mapas

Se instaló el programa SIG, QGIS® versión 3.10.8 que es un software libre y código abierto, se descargó esa versión debido a ser la más estable recomendada por la página oficial del programa al momento de su descarga. Luego de recopilar la información existente se unificó la información en un documento de Excel con las coordenadas de los puntos de muestreo con los resultados del análisis de suelo y se cargaron al programa en el proyecto a utilizar para realizar la interpolación.

El método de interpolación utilizado fue Kriging e IDW, hubo dificultad para la lectura de algunas propiedades interpoladas con Kriging, pero con la interpolación IDW fue posible su lectura, esto es debido a que la interpolación Kriging es más exigente y requiere una buena densidad y distribución de puntos de muestreo y dependencia espacial ente los pares de muestras, debido a que

Mapa de porcentaje de arcilla. Este mapa indica el porcentaje variable de arcilla que se encuentra en el suelo (Figura 5), ya que mientras más cerca se encuentre del río habrá menos arcilla. Esto es causado por la fuerza variable de sedimentación diferencial por tamaño de partículas propiciada por el comportamiento del río⁵. Este mapa es muy importante para realizar investigación ya que se puede observar tres rangos de contenido de arcilla.

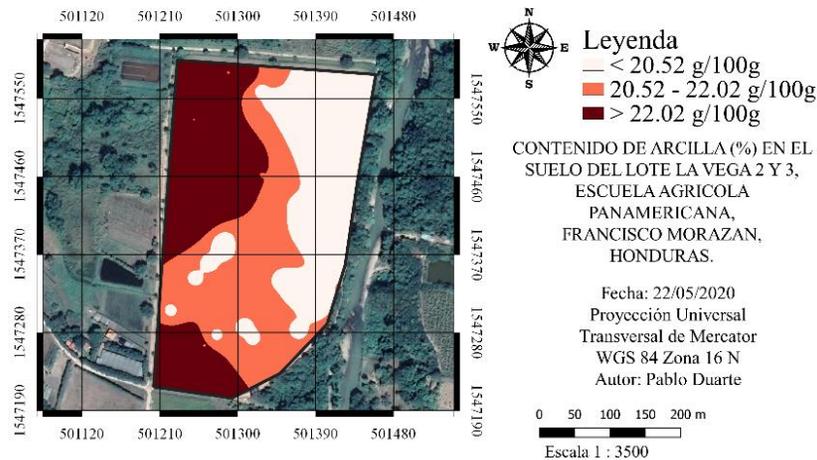


Figura 5. Mapa de porcentaje de arcilla del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con IDW.

Mapa de pH. En el mapa de pH se puede observar claramente con estratos diferentes de pH en donde la zona amarilla muestra pH fuertemente ácido (< 5.6) y la zona verde moderadamente ácido (5.6 – 6.0). El pH del suelo influye de forma decisiva en la asimilación de los diferentes nutrientes vegetales y un pH ácido proporciona mejores condiciones de asimilación al suelo correspondiendo a un pH entre 6 y 7 (Figura 6) (Ginés y Sancho 2002).

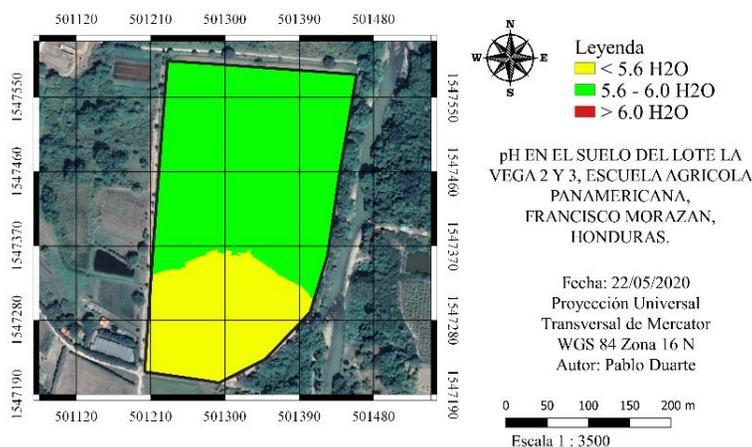


Figura 6. Mapa de pH del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

⁵ Arévalo G. Profesora asociada del curso manejo de suelo y nutrición vegetal en la EAP Zamorano, comunicación personal ggauggel@zamorano.edu

Mapa de nitrógeno (N). Este mapa muestra que, en el área de estudio, el nitrógeno es homogéneo, encontrándose deficiente para el cultivo de estudio (≤ 0.2) con un requerimiento de 68 kg/ha para una producción de 1 t/ha de frijol (Bertsch 2009) (Figura 7).

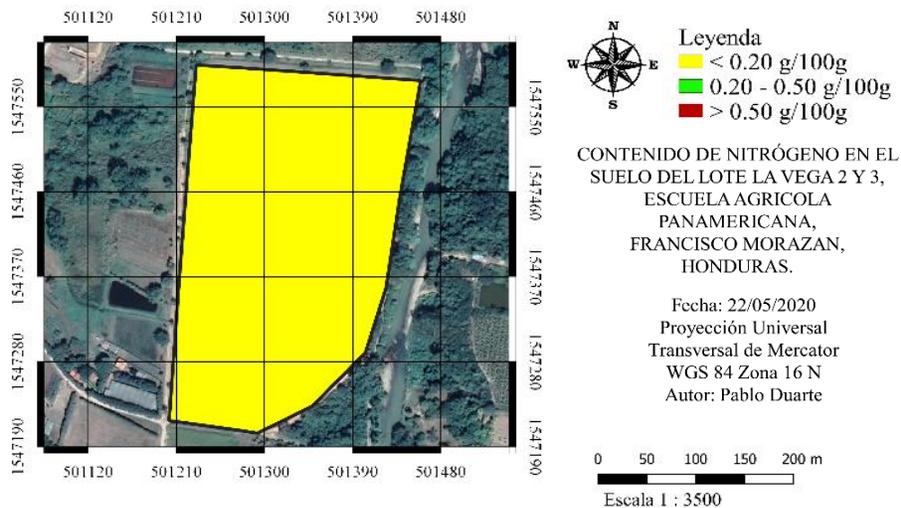


Figura 7. Mapa de nitrógeno (N) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

Mapa de fósforo (P). Este mapa presenta dos comportamientos diferentes de este nutriente, en la zona roja se observa valores mayores a 30 mg/kg que significa que hay exceso de este nutriente, por tanto, no hay necesidad de realizar aplicaciones de este elemento, por otro lado, la zona verde indica que el fósforo está en rangos óptimo para el cultivo y la estrategia de fertilización debe ser diferente a la de zona roja (Figura 8).

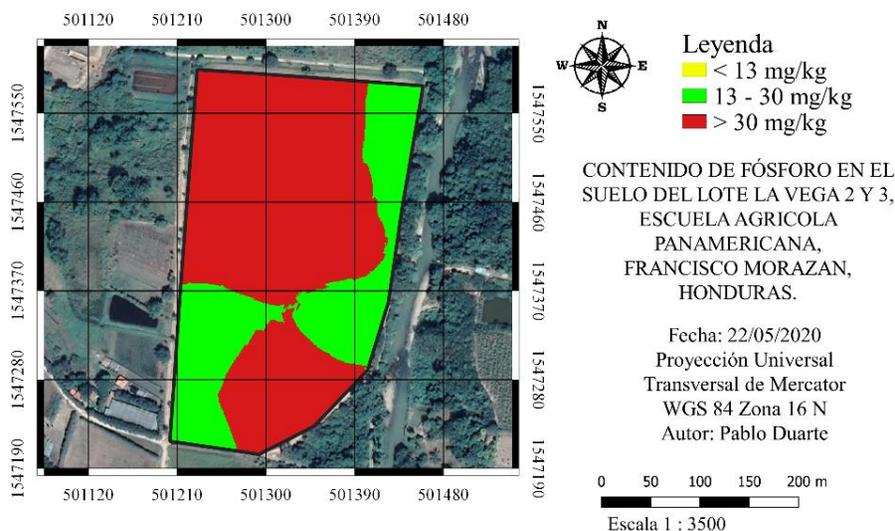


Figura 8. Mapa de fósforo (P) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

Mapa de calcio (Ca). El mapa presenta dos zonas entre bajas y medias, por tanto, podría manejarse una misma dosis para toda el área ya que no representan una diferencia significativa para una aplicación variable (Figura 11).

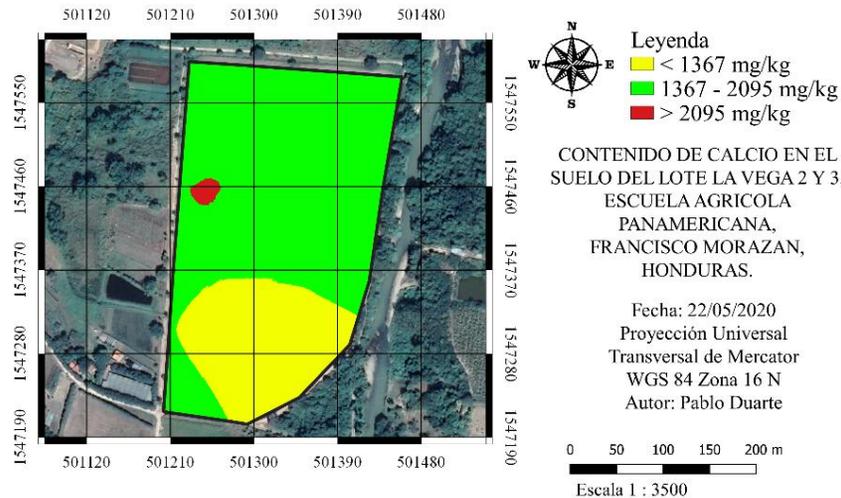


Figura 11. Mapa de calcio (Ca) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

Mapa de magnesio (Mg). El mapa presenta tres zonas a las cuales se recomienda aplicar solo el fertilizante necesario para mantener las cantidades de magnesio en el suelo (Figura 12). El magnesio (Mg) interviene en varias funciones vitales para la planta tales como fotofosforilación (formación de ATP en los cloroplastos), fijación fotosintética del dióxido de carbono, síntesis de proteínas, formación de clorofila, recarga del floema, partición y asimilación de los productos de la fotosíntesis, generación de las formas reactivas de oxígeno y foto oxidación de los tejidos de las hojas (Cakmak y Yazici 2010).

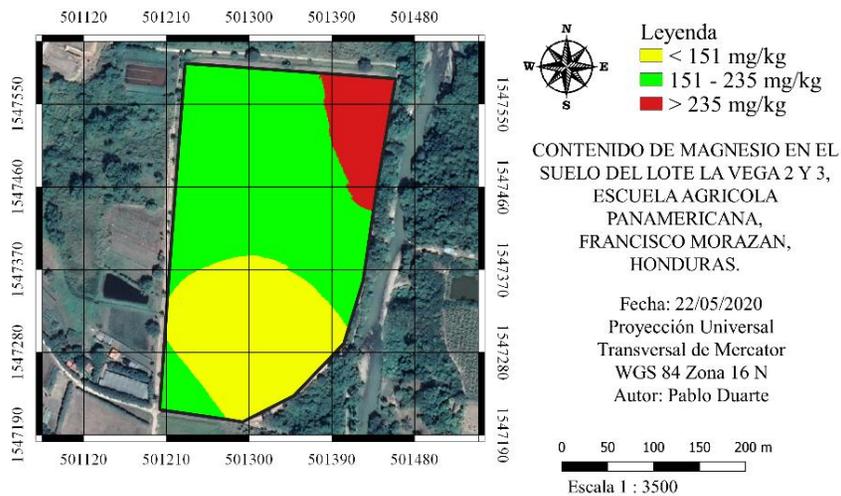


Figura 12. Mapa de magnesio (Mg) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

Mapa de sodio (Na). El mapa presenta cantidades de sodio homogéneas y dentro del rango esperado para este cultivo, lo cual no causa problemas algunos, por tal razón este nutriente no es necesario considerarlo en el programa de fertilización (Figura 13).

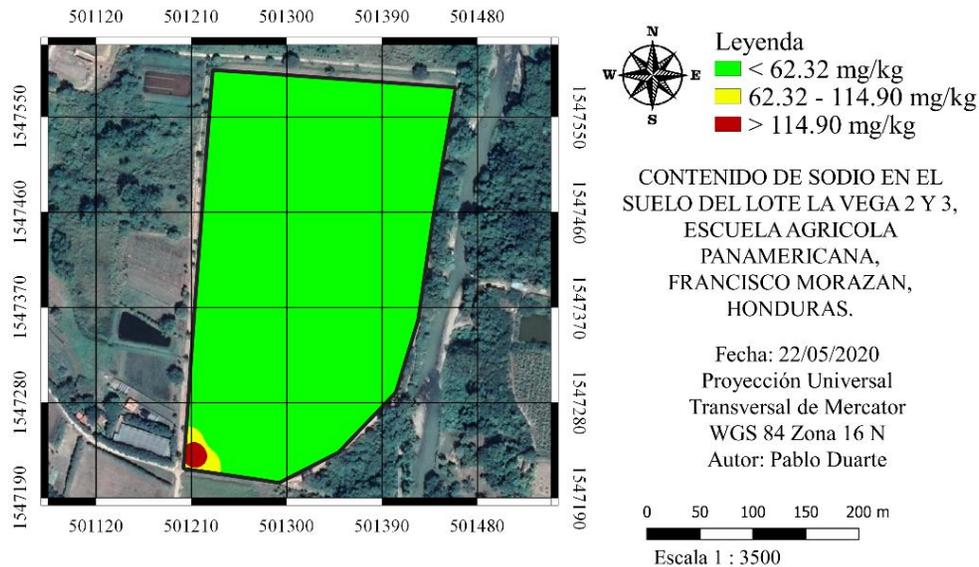


Figura 13. Mapa de sodio (Na) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

Mapa de cobre (Cu). El mapa indica deficiencia generalizada de cobre en el lote, se recomienda complementar la fertilización con aplicaciones de este elemento en la medida que el cultivo lo requiera (Figura 14).

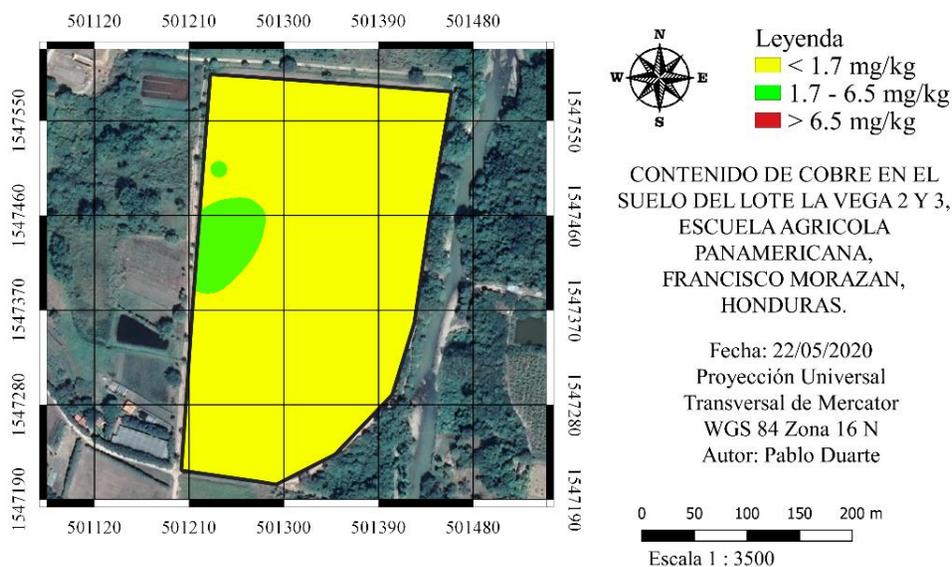


Figura 14. Mapa de cobre (Cu) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con IDW.

Mapa de zinc (Zn). El mapa presenta deficiencias de zinc en el lote, observar la acumulación de zinc en el área del medio que puede ser causado por las válvulas de riego, se recomienda revisar el sistema de riego para encontrar la causa de la acumulación en esas zonas (Figura 17).

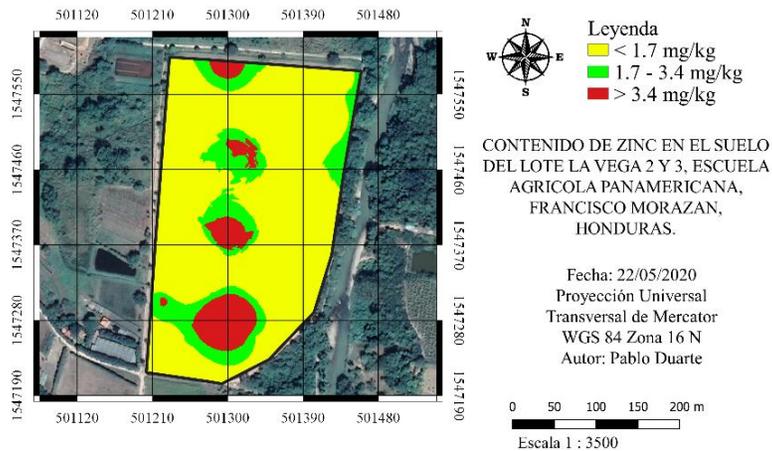


Figura 17. Mapa de zinc (Zn) del suelo de los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras interpolado con Kriging.

Fase 5. Redacción del manual

Se generó el manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos (Figura 18), el manual contiene metodología utilizada para implementar Agricultura de Precisión enfocada en la modelación de mapas de variabilidad espacial.

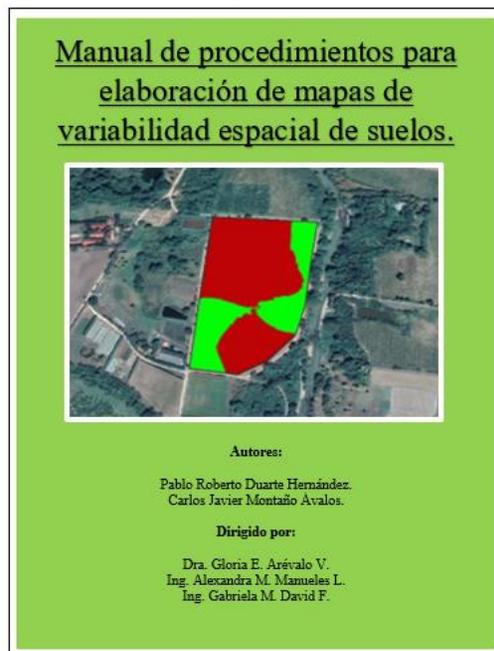


Figura 18. Portada del Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad de suelos.

El manual está dividido en siete capítulos:

Capítulo 1

Descarga, instalación y configuración del programa QGIS[®], contiene el procedimiento a seguir para la instalación del programa.

Capítulo 2

Delimitación del perímetro, contiene la configuración del GPS marca Garmin[®] eTrex10, toma de coordenadas, construcción de perímetro con el programa QGIS[®].

Capítulo 3

Muestreo Sistemático Georreferenciado de suelo para la creación de mapas de variabilidad espacial, contiene la metodología aplicada en un muestreo sistemático georreferenciado, como crear una cuadrícula o grilla de muestreo, como establecer la distribución de puntos de muestreo con el programa, como realizar el muestreo en campo e identificar las muestras.

Capítulo 4

Preparar documento de Excel con coordenadas y resultados del análisis de suelo, contiene los parámetros a seguir para la estructuración del documento que se utilizará para la interpolación y que este no sea motivo de error al realizar este proceso.

Capítulo 5

Creación de mapas de variabilidad espacial de suelos, contiene los pasos a seguir para realizar una interpolación de tipo Kriging o IDW y como crear la simbología que represente cada clase para apreciar la variabilidad del suelo.

Capítulo 6

Diseño de mapa para presentación de resultados, explica los elementos utilizados para la presentación de un mapa en formato JPG o PDF, como insertar y configurar cada elemento para la presentación formal de resultados.

Capítulo 7

Interpretación de la información y toma de decisiones (aplicadas en Agricultura de Precisión), contiene una interpretación de los mapas de variabilidad de suelos y toma de decisiones con cálculos de fertilización básicos.

4. CONCLUSIONES

- Se generó un manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en los lotes 2 y 3 de La Vega de Monte Redondo de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- El manual de procedimientos para la modelación mapas de variabilidad espacial de suelos permite al usuario aplicar una técnica de mapeo digital en la producción vegetal, para optimizar los recursos de aplicación de fertilizantes.
- Se aplicó una metodología para la modelación de variabilidad espacial de los suelos al implementar herramientas de Agricultura de Precisión en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Los mapas de variabilidad espacial de suelos expresaron variación espacial de algunas propiedades del suelo que permiten proponer programas de fertilización diferencial.

5. RECOMENDACIONES

- Implementar metodologías para el levantamiento de datos con el uso de Agricultura de Precisión con muestreo sistemático de suelos en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, se sugiere sea mediante un curso.
- Robustecer la carrera de Ingeniera Agronómica con cursos y aplicaciones de principios de Agricultura de Precisión, para que los estudiantes aprendan a coleccionar y procesar datos, usar algoritmos y generar información que contribuya en la toma de decisiones basadas en información confiable y precisa. Además, enfatizar y ampliar los conocimientos generados sobre fertilización y edafología, para la mejor interpretación de los mapas de variabilidad espacial de los suelos, que permitan tomar mejores decisiones en el manejo de la fertilización diferencial.
- Realizar muestreos de suelo con coordenadas y aplicar el método de interpolación adecuado para generar mapas de variabilidad espacial representativos. Compararlos con otros métodos de muestreo tradicionales.
- Comparar la fertilización con aplicaciones diferenciales basada en mapas de zonas de manejo homogéneo, con la agricultura tradicional en un cultivo, y evaluar el efecto sobre el suelo, sobre el ambiente y la producción.
- Validar la metodología plasmada en el manual para la creación y aplicación de los mapas, mediante evaluaciones de los usuarios.

6. LITERATURA CITADA

Arévalo G, Gauggel C. 2019. Manual de prácticas de laboratorio del curso de Manejo de Suelos y Nutrición Vegetal. 2ª ed. Tegucigalpa: LITOCOM. p. 100.

Bramley R. 1 de may. de 2018. Agricultura de precisión: cómo obtener y qué hacer con los mapas de colores. Periódico virtual New AG International; [consultado el 6 de sep. de 2020]. <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/65425/027131.pdf?sequence=1>.

Cakmak I, Yazici AM. 2010. Magnesium: a forgotten element in crop production. Better Crops. [consultado el 14 de sep. de 2020*]; 94(2): 23-25. https://www.researchgate.net/publication/291869977_Magnesium_A_forgotten_element_in_crop_production.

Castro M, Hernán J, Quiroz L, Ciccore P, Costa J. 2017. Predicción de contenido de arcilla superficial utilizando conductividad eléctrica aparente y esquemas de muestreo basados en modelos. CIENC SUELO. [consultado el 6 de sep. de 2020]; 35(1): 135-146. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/2323/INTA_CRBsAsSur_EEABalcarce_CastroFranco_M_Predicci%c3%b3n%20de%20contenido%20de%20arcilla%20superficial.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Claret M, Best S, León L. 2006. 2.1. Sistema de posicionamiento global (GPS). En: Bongiovanni R, Chartuni Mantovani E, Best S, Roel A, editores. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Uruguay: [PROCISUR] Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. p. 25-37. ISBN: 92-9039-741-1.

Córdoba M, Paccioretti P, Bruno C, Aguate F, Balzarini M. 2017. FastMapping: software para mapeo de variabilidad en dominios espaciales continuos. 46 JAIIO Jornadas Argentinas de Informática. CAI 2017 – Congreso Argentino de AgroInformática, 4-8 de sep. de 2017. Córdoba, Argentina. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/62829/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Cueva Rivera EI. 2020. Análisis geoestadístico y multivariado de atributos físicos de un suelo en cultivo de banano Finca Márquez La Peaña cantón Pasaje. [Tesis]. Universidad Técnica de Machala-Ecuador. 68 p; [consultado el 19 de ago. de 2020*]. <http://186.3.32.121/bitstream/48000/15537/1/TTUACA-2020-IA-DE00006.pdf>.

[FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2002. Perspectivas para el medio ambiente [Internet]. Roma: FAO Publishing. [actualizado el 9 de ene. de 2007; consultado el 29 de jun. de 2020]. ISBN 92-5-304761-5. <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s11.htm#r>.

Farfán V, Sánchez A. 2018. Distribución de nutrientes en el suelo y producción de café en sistemas agroforestales. CENICAFE. [consultado el 28 de jun. de 2020]. 69(2):17–27. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc069%2802%29017-027.pdf>.

Flores Nava A. 2012. Buenas prácticas pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar. 1a Ed. Buenos Aires, Argentina: FAO; [consultado el 29 de jun. De 2020]. ISBN: 978-92-5-306794-7. <http://www.fao.org/3/a-i2094s.pdf>.

Frolla F, Zilio J, Kruger H. 2015. Variabilidad espacial de la profundidad del suelo. Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense. RIA. [consultado el 5 de jul. De 2020*]; 41(3):309–319. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86443147014.pdf>.

Fuenzalida Díaz M. 2015. Interpolación espacial con sistemas de información geográfica. En: Fuenzalida Díaz M, Buzai GD, Moreno Jiménez A, García de León A, editores. Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. 1a Ed. Chile: Editorial Triángulo. p. 86-98.

Gabri. 28 de mar. de 2018. ¿Qué es la autocorrelación espacial? ArcGeek; [consultado el 7 de sep. de 2020]. <https://acolita.com/que-es-la-autocorrelacion-espacial/>.

Gabri. 17 de jul. de 2019. Las 13 opciones de software libre SIG. ArcGeek; [consultado el 2 de sep. de 2020]. <https://acolita.com/las-13-opciones-de-software-libre-sig/>.

Ginés I, Sancho IM. 2002. Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo [intenet]. [consultado el 13 de sep. de 2020]. <https://agroinforma.ibercaja.es/documentos/incidencia-de-los-fertilizantes-sobre-el-ph-del-suelo>.

González C, Sepúlveda J, Barroso R, Fernández F, Maciá F, Lorenzo J. 2011. Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la Agricultura de Precisión. IDESIA. [consultado el 29 de jun. de 2020]; 29(1):59–69. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v29n1/art09.pdf>.

Guachamin Yar JW. 2019. Estudio de variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo mediante procedimientos geoestadísticos en la comunidad "Larcapamba". [Tesis]. Universidad Central del Ecuador-Quito. 169 p; [consultado el 19 de ago. de 2020]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/20182/1/T-UCE-0004-CAG-173.pdf>.

MASTERGIS. 2019. 7 Softwares GIS Libres que debes conocer - MasterGIS. MASTERGIS; [actualizado el 8 de jul. de 2019, consultado el 29 de jun. de 2020]. <https://www.mastergis.com/softwares-libres-gis/>.

Navarrete Álvarez M, López AM. 2019. Importancia de los espacios comunes: una adaptación de la técnica de interpolación espacial Inverse Distance Weighted (IDW) en la predicción de datos socioeconómicos ausentes. En: Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores. Abordajes teóricos, impactos externos, políticas públicas y dinámica económica en el desarrollo regional. 1ª Ed. Ciudad de México: p. 49-64. ISBN: 978-607-30-2640-6.

[OCDE] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2019. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028. Roma: OECD Publishing. ISBN: 978-92-5-131385-5. <http://www.fao.org/3/ca4076es/CA4076ES.pdf>.

Ortega Blu R. 2019. Innovación y tecnología para mejorar la sustentabilidad agrícola en el sector pecuario. RCCP. [consultado el 7 de sep. de 2020]; 32:22-33. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/rccp/article/view/340328>.

Ortega Blu R. 2018. Using precision agriculture tools and improved data analysis for evaluating effects of integrated nutrient management programs. Proceedings of the 14th international conference on precision agriculture, jun. 24-27 de 2018. Montreal, Canada.

QGIS.org. 2020. 11. Análisis Espacial (Interpolación) — documentación de QGIS Documentation -. Manual del usuario.: QGIS.org; [actualizado el 28 de ago. de 2020; consultado el 6 de sep. de 2020]. https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html.

[RAE] Real Academia Española. 2019. pestaña | Diccionario de la lengua española. [internet]; [actualizado el 2019; consultado el 2 de sep. de 2020]. https://dle.rae.es/pesta%C3%B1a?m=30_2.

Resende ÁV, Coelho AM. 2014. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo. En: Chartuni Mantovani E, Magdalena C, editores. Manual de agricultura de precisión. Uruguay: [PROCISUR] Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. p. 47-57. ISBN: 978-92-9248-545-0.

Reynolds Cavallieri C. 2017. Optimización de muestreo goerreferenciado con fines de mapeo. [Tesis]. Universidad Técnica Federico Santa María-Chile. 86 p; [consultado el 7 de sep. de 2020]. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/22525/3560902048836UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Rojas Rojas F, Lezcano Brito M, Medina Rojas F. 2016. Agricultura de precisión con sensores inalámbricos. 3er Congreso Internacional AmITIC 2016, Inteligencia Ambiental y Tecnologías de Información y Comunicación. 27-30 de sep. de 2016. Santa cruz, Bolivia: Universidad Tecnológica de Panamá. ISBN: 978-9962-698-42-5.

Ruiz E. 2018. Estimación de parámetros de infiltración mediante funciones de pedotransferencia y análisis geoestadístico. [Tesis]. Universidad Autónoma de Querétaro-México. 118 p; [consultado el 19 de ago. de 2020]. <http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/1063/1/IG-0018-Edgar%20Omar%20Ru%c3%adz%20Del%20c%81ngel.pdf>.

Vivanco Vergara ME. 2017. Los manuales de procedimientos como herramientas de control interno de una organización. Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos. [consultado el 29 de jun. De 2020]; 9(2): 247-252. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v9n3/rus38317.pdf>.

Osorio NW. 2012. Toma de muestras de suelos para evaluar la fertilidad del suelo. Manejo integral del suelo y Nutrición Vegetal. [consultado el 25 de jun. De 2020*]; 1(1): 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/Toma-de-muestras-de-suelos-evaluacion-de-fertilidad-del-suelo-Walter-Osorio.pdf>.

7. ANEXO

Anexo 1. Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad de suelos.

Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos



Autores:

Pablo Roberto Duarte Hernández
Carlos Javier Montaña Avalos

Dirigido por:

Dra. Gloria E. Arévalo V.
M.Sc. Alexandra M. Manueles L.
M.Sc. Gabriela M. David F.