



UTMACH

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES GENERALES DE UN
SUELO CULTIVADO CON BANANO: MUESTREO RASTER A NIVEL DE
PERFIL DEL SUELO

NIEBLA TORRES RAFAEL ENRIQUE
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2019



UTMACH

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES GENERALES
DE UN SUELO CULTIVADO CON BANANO: MUESTREO
RASTER A NIVEL DE PERFIL DEL SUELO

NIEBLA TORRES RAFAEL ENRIQUE
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2019



UTMACH

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TRABAJO TITULACIÓN
ANÁLISIS DE CASOS

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES GENERALES DE UN SUELO
CULTIVADO CON BANANO: MUESTREO RASTER A NIVEL DE PERFIL DEL
SUELO

NIEBLA TORRES RAFAEL ENRIQUE
INGENIERO AGRÓNOMO

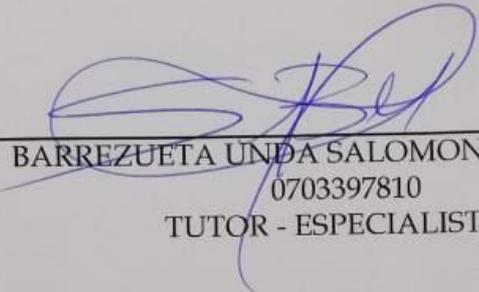
BARREZUETA UNDA SALOMON ALEJANDRO

MACHALA, 13 DE FEBRERO DE 2019

MACHALA
2019

Nota de aceptación:

Quienes suscriben, en nuestra condición de evaluadores del trabajo de titulación denominado ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES GENERALES DE UN SUELO CULTIVADO CON BANANO: MUESTREO RASTER A NIVEL DE PERFIL DEL SUELO, hacemos constar que luego de haber revisado el manuscrito del precitado trabajo, consideramos que reúne las condiciones académicas para continuar con la fase de evaluación correspondiente.



BARREZUETA UNDA SALOMON ALEJANDRO
0703397810
TUTOR - ESPECIALISTA 1



LUNA ROMERO ANGEL EDUARDO
0704361831
ESPECIALISTA 2



CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE
0700728165
ESPECIALISTA 3

Machala, 13 de febrero de 2019

Urkund Analysis Result

Analysed Document: tesis_p.docx (D47377549)
Submitted: 1/29/2019 4:46:00 PM
Submitted By: sabarrezueta@utmachala.edu.ec
Significance: 3 %

Sources included in the report:

52-933-1-CE.docx (D27698550)
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120384>
<https://doi.org/10.14350/rig.54706>

Instances where selected sources appear:

5

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, NIEBLA TORRES RAFAEL ENRIQUE, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES GENERALES DE UN SUELO CULTIVADO CON BANANO: MUESTREO RASTER A NIVEL DE PERFIL DEL SUELO, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

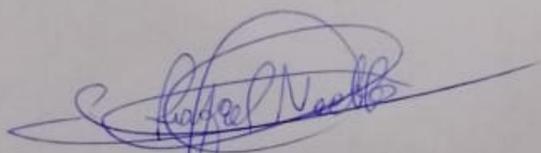
El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 13 de febrero de 2019



NIEBLA TORRES RAFAEL ENRIQUE
0707072070

DEDICATORIA

La presente Tesis se la dedico a Dios que es el forjador de mi camino el que me acompaña y siempre me levanta de mi continuo tropiezo, a mis padres Rafael Niebla Meneses y Carmen Torres Paredes, por darme las fuerzas necesarias para culminar esta etapa en mi vida, cumpliendo mis objetivos, que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económicamente para poder lograr ser un profesional de la patria. A mis amigos y docentes en general por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de mi carrera universitaria.

Rafael Enrique Niebla Torres

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi tutor de tesis el Ing. Salomón Barrezueta, PhD. por brindarme sugerencias y sus conocimientos necesarios en la formación de mi trabajo y apoyo en mi proceso de investigación al Ing. Eduardo Luna Romero, MSc. por los conocimientos impartidos al realizar mi proyecto investigativo. Al Ing. Julio Chabla, PhD. por ser parte de mi formación profesional.

A mis compañeros por los momentos vividos dentro y fuera de la unidad académica de estudio durante todos los ciclos cruzados, a los que me han demostrado su apoyo brindado sus ánimos y consejos durante todo el periodo académico. Mirko Quintanilla, Omar Ramón, Génesis Mishell Castro, Carlos Chuchuca y Alexander Dominguez con los que he compartido grandes momentos y logros, porque gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

RESUMEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES GENERALES DE UN SUELO CULTIVADO CON BANANO: MUESTREO RASTER A NIVEL DEL PERFIL DEL SUELO.

Autor:

Rafael Enrique Niebla Torres.

Tutor:

Ing. Salomón Alejandro Barrezueta Unda, PhD

El estudio se llevó acabo en la Provincia de El Oro, ubicada al sur del Ecuador, en el Cantón Machala sitio “la María”, Finca “San José”. Las practicas agronómicas utilizadas desde la década de los 50, en muchos de los casos han ocasionado la degradación de los suelos, pero este problema no ha sido estudiado a profundidad, realizándose la mayoría de los estudios a nivel de la capa superficial o en la zona radicular. En este contexto, muchos científicos están analizando al suelo de forma vertical y lateral mediante técnicas geoestadísticas, para comprender la movilidad de los nutrientes y los cambios en las propiedades físico, químicas y biológicas del suelo. Las propiedades físicas y químicas del suelo juegan un rol fundamental en el desarrollo y rendimiento de los cultivos. El objetivo general de la presente investigación fue: Realizar el estudio geoestadístico vertical de un suelo cultivado con banano en tres perfiles, mediante un muestreo raster, empleando Kriging con dos modelos (lineal y esférico) para contrastar la movilidad y dispersión espacial de varias propiedades físicas y químicas del suelo. Además los objetivos específicos que se plantearon fueron: Inferir las propiedades generales del suelo entre perfiles, Analizar la distribución espacial de tres perfiles del suelo mediante el muestreo raster y Comparar los modelos geoestadístico lineal y esférico mediante el coeficiente de determinación y el error medio cuadrado. El área de estudio se realizó con información previa proporcionado por el administrador y con la ayuda de un mapa digital, la finca San José, se dividió en terreno en tres lotes. Cada lote tiene una superficie de 2 ha en donde se procedió a realizar una calicata para la toma de muestras. En una pared de cada calicata

el suelo de 2 m x 0,6 m el perfil fue dividido en cuadrículas de 20× 20 cm. Las propiedades físicas determinadas en el estudio fueron arena, limo y arcilla por el método de Boyoucos (Monroe et al., 2016). Por otra parte, las propiedades químicas analizadas fueron carbono orgánico (%) por método de digestión húmeda con dicromato de potasio (Walkley & Black, 1934). También se realizó la medición del pH en pasta de saturación con agua relación 1:2.5 y la conductividad eléctrica (dS cm^{-1}). Determinaciones se realizaron el 5 de noviembre y se finalizó el 27 de diciembre del 2018 en el laboratorio de suelos de Universidad Técnica de Machala. También se utilizó funciones de pedotransferencia para determina el nitrógeno (N) . Donde N_{total} es nitrógeno total en el suelo, MOS es la materia orgánica del suelo obtenida de la multiplicación del factor de 1,724 por el CO (Pribyl, 2010) y la constante 0,05. En el caso de la propiedad física densidad aparente (D_a) fue calculada con las modelos matemáticos propuesta por Alexander (1980), Manrique & Jones (1991) y Bernoux, Cerri, Arrouays, Jolivet, & Volkoff, (1998), con el objetivo de determinar la mejor función para con el CO y el porcentaje de arcilla (clay). Con los resultados obtenidos se procedió a realizar el análisis geoestadístico fue realizado mediante el uso de ArcGIS para elaborar mapas temáticos de las propiedades físicas y químicas de las muestras de los 3 perfiles . Las muestras fueron ingresadas como coordenadas geográficas (valores x,y) mediante el cual se realizó el análisis de superficie, con el fin de diseñar mapas que muestren la distribución de los datos y la concentración de las propiedades generales del suelo, dentro de la unidad estudiada. Para ello, se utilizó el método de interpolación kriging, utilizando los parámetros obtenidos a partir de los análisis de los semivariogramas, los modelos de semivariograma usados fueron lineal, esférico, circular y gaussiano. Al hacer el análisis geoestadístico en los 3 perfiles de suelo el modelo de interpolación esférico fue más preciso y eficiente que el lineal excepto en el perfil 1 donde arena fue mejor el modelo lineal, aunque la diferencia entre ambos métodos no fue muy amplia o significativa. Posiblemente, la alta densidad de muestreo benefició a ambos métodos haciendo difícil determinar cuál fue mejor. Los mapas muestran que la concentración de varias propiedades físico-químicas presentaron una distribución heterogénea en el perfil del suelo, con la presencia de anisotropía en el área de estudio.

Palabras clave: Kriging, interpolación, geoestadística, suelo, raster

GEOSTATISTIC ANALYSIS OF GENERAL PROPERTIES OF A SOIL CULTIVATED WITH BANANAS: SAMPLING RASTER AT THE LEVEL OF THE SOIL PROFILE

Author:

Rafael Enrique Niebla Torres.

Advisor:

Ing. Salomón Alejandro Barrezueta Unda, PhD

The study was carried out in the Province of El Oro, located in the south of Ecuador, in the Machala Canton, site "la María", Finca "San José". The agronomic practices used since the 50s, in many cases have caused the degradation of soils, but this problem has not been studied in depth, most of the studies being carried out at the level of the surface layer or in the zone. radicular In this context, many scientists are analyzing the soil vertically and laterally using geostatistical techniques to understand the mobility of nutrients and changes in the physical, chemical and biological properties of the soil. The physical and quimas properties of the soil play a fundamental role in the development and yield of the crops. The general objective of the present investigation was: Perform the vertical geostatistical study of a soil cultivated with banana in three profiles, by means of a raster sampling, using Kriging with two models (linear and spherical) to contrast the mobility and spatial dispersion of several physical properties and chemical soil. In addition, the specific objectives were: Infer the general soil properties between profiles, Analyze the spatial distribution of three soil profiles by raster sampling and Compare the linear and spherical geostatistic models by means of the coefficient of determination and the mean square error. The study area was carried out with previous information provided by the administrator and with the help of a digital map, the San José farm was divided into three lots. Each lot has a surface area of 2 ha where a pit was taken to collect samples. In a wall of each pit the ground of 2 m x 0.6 m the profile was divided into squares of 20 × 20 cm. The physical properties determined in the study were sand, silt and clay by the Boyoucos method (Monroe et al., 2016). On the other hand, the chemical properties analyzed were organic carbon (%) by wet digestion method with potassium dichromate (Walkley & Black,

1934). The pH measurement in saturation paste with water ratio 1: 2.5 and electrical conductivity (dS cm⁻¹) was also performed. Determinations were made on November 5 and finalized on December 27, 2018 in the soil laboratory of the Technical University of Machala. It also used pedotransferencia functions to determine the nitrogen (N). Where N_{total} is total nitrogen in the soil, MOS is the organic matter of the soil obtained from the multiplication of the factor of 1.724 by the CO (Pribyl, 2010) and the constant 0.05. In the case of physical property apparent density (D_a) was calculated with the mathematical models proposed by Alexander (1980), Manrique & Jones (1991) and Bernoux, Cerri, Arrouays, Jolivet, & Volkoff, (1998), with the objective to determine the best function for the CO and the clay percentage. With the results obtained, the geostatistical analysis was carried out using ArcGIS to prepare thematic maps of the physical and chemical properties of the samples from the 3 profiles. The samples were entered as geographic coordinates (values x, y) by which the surface analysis was carried out, in order to design maps showing the distribution of the data and the concentration of the general properties of the soil, within the unit studied. For this, the kriging interpolation method was used, using the parameters obtained from the semivariogram analysis, the semivariogram models used were linear, spherical, circular and gaussian. When doing the geostatistical analysis in the 3 soil profiles, the spherical interpolation model was more accurate and efficient than the linear one except in profile 1 where sand was the best linear model, although the difference between both methods was not very broad or significant. Possibly, the high sampling density benefited both methods making it difficult to determine which was better. The maps show that the concentration of several physical-chemical properties presented a heterogeneous distribution in the soil profile, with the presence of anisotropy in the study area.

Keywords: Kriging, interpolation, geostatistics, soil, raster

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.....	12
2. Marco teórico epistemológico de la investigación	13
2.1. El suelo y sus propiedades físicas, químicas y biológicas	13
2.2. Problemas en la descripción del suelo.....	13
2.3. Geoestadística en la ciencia del suelo	15
2.4. Mapeo digital del suelo (MDS).....	17
2.5. Variación espacial de las propiedades del suelo	17
2.5.1. Morfometría.....	18
2.5.2. Raster maestro de perfiles de suelo	18
2.6. Características del banano (<i>Musa sapientum L.</i>).....	18
2.6.1. Superficie cultivada de banano en Ecuador.....	18
2.6.2. Requerimientos del cultivo Edáficos.....	20
3. DISEÑO METODOLÓGICO	21
3.1. Área de estudio.....	21
3.2. Diseño de la investigación	22
3.2.1. Diseño del muestreo	22
3.2.2. Análisis de laboratorio.....	23
3.3. Técnicas análisis geoestadístico.....	23
3.4. Análisis Estadísticos.....	24
4. RESULTADOS	25
4.1. Estadística descriptiva e inferencias.....	25
4.2. Análisis Geoestadístico: Distribución espacial	32
5. CONCLUSIONES	42
6. BIBLIOGRAFIA	43
7. ANEXOS	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades físicos, químicas y biológicas de los suelos en las regiones tropicales del planeta.....	15
Tabla 2.- Superficie cultivada de banano y número de productores registrados en el Ecuador. .	19
Tabla 3.- Características de los sitios en estudio	22
Tabla 4.- Análisis inferencial de las propiedades físicas: arena, limo y arcilla	28
Tabla 5.- Análisis inferencial de las propiedades químicas	29
Tabla 6.- análisis inferencial de la propiedad física D_a con intervalos de 20 cm.....	30
Tabla 7.- Análisis inferencial de las propiedades físicas a intervalo lateral de 10 cm.....	30
Tabla 8.- Análisis inferencial de las propiedades químicas del suelo a intervalos lateral de 10 cm	31
Tabla 9.- Análisis inferencial de las tres ecuaciones para determinación de D_a a distancia lateral de 10 cm.....	32
Tabla 10.- Comparación de métodos de interpolación espacial: lineal y esférico.....	33

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Descripción de un perfil del suelo.....	14
Figura 2.- Método de análisis geoestadístico, patrones de puntos y objetos poligonales.....	16
Figura 3.- Ubicación del área en estudio	21
Figura 4.- Esquema del muestreo en el perfil del suelo.....	22
Figura 5.- Diagrama de cajas y bigotes para determinar la distribución de las propiedades físicas: arena, limo y arcilla en los 3 perfiles del suelo.....	25
Figura 6.- Diagrama de cajas y bigotes para determinar la distribución de las propiedades químicas: CE , pH, CO, NT en los 3 perfiles del suelo.	26
Figura 7.- Diagrama de cajas y bigotes para determinar la distribución de D_a (densidad aparente) en las tres ecuaciones estudiadas de los 3 perfiles del suelo.....	27
Figura 8.- Distribución espacial de la arcilla, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3.....	34
Figura 9.- Distribución espacial de arena, mediante la técnica de muestreo raster (modelo de Kriging): A) perfil 1 método lineal, B) Perfil 2 método esférico, C) Perfil 3 método esférico	35
Figura 10.- Distribución espacial de limo, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 2, C) Perfil 3.....	36
Figura 11.- Distribución espacial de conductividad eléctrica, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 2, C) Perfil 3.	37
Figura 12.- Distribución espacial de pH, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3.....	38
Figura 13.- Distribución espacial de CO, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3.....	39
Figura 14.- Distribución espacial de N_t , mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3.....	40
Figura 15.- Distribución espacial de densidad aparente, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 2, C) Perfil 3.....	41

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Realización de la calicata de con una profundidad de 0,60 cm y ancho de 2 m.....	47
Anexo 2.- Toma de las 30 submuestras del perfil para la determinar las propiedades generales del suelo.	47
Anexo 3.- Preparación de las muestras, para determinar la textura Las lecturas fueron registradas a las 40 segundos y a las 7 horas.....	48
Anexo 4.- Determinación de la materia orgánica de las muestras tomadas.	48
Anexo 5.- Preparación de una solución 1:2.5, para determinar el pH y conductividad eléctrica.	49

1. INTRODUCCIÓN

Las prácticas agronómicas utilizadas desde la década de los 50, en muchos de los casos han ocasionado la degradación de los suelos, pero este problema no ha sido estudiado a profundidad en países como Ecuador. La mayoría de los estudios son a nivel de la zona insaturada del suelo o zona radical.

El manejo agrícola inadecuado del suelo pueden causar alteraciones en las propiedades físicas y químicas y en la comunidad biótica (Sánchez-Navarro et al., 2015). Entre las principales prácticas que degeneran el suelo están: el monocultivo, el uso excesivo de pesticidas, manejo inadecuado de la frecuencia de riego, falta de canales de drenaje, entre otros. Esto ocasiona problemas como la degradación de los suelos por la compactación, salinización, acides o encostramiento (Rattan Lal, 1998; Labrador, 2008; Leyva R, Baldoquín, & Reyes, 2018).

En este contexto, muchos científicos están analizando al suelo de forma vertical y lateral mediante técnicas geoestadísticas, para comprender la movilidad de los nutrientes y los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas.

La delimitación de campo de los horizontes del suelo puede ser problemática y son generalmente cualitativas o semicuantitativas. La diferenciación del horizonte requiere decisiones basadas en la experiencia pedológica, en algunos casos las capas de suelo son discontinuos o muy delgados y pueden ser pasados por alto (Grauer-Gray & Hartemink, 2016). A este problema se tiene una alternativa, el muestreo ráster que caracteriza los perfiles de suelo en dos dimensiones (vertical y horizontal) y se puede usar para cuantificar la variación lateral y mejorar la delineación del horizonte del suelo.

Recomendar, enmiendas orgánicas ayudan a reducir los efectos de la compactación del suelo, salinización o acides del suelo, estos cambios son analizados a una profundidad no representativa (< 30 cm). A profundidades entre 45-60 cm se producen cambios que muchos técnicos agrónomos no toman en cuenta como la acumulación de sales, acumulación de macronutrientes con rangos de pH que no permite su asimilación.

En este marco, los suelos cultivados con banano tienen un alto grado de intervención antrópica, producto del excesivo uso de fertilizantes sintéticos y pesticidas químicos, que coadyuvan la degradación de este recurso natural. Las altas poblaciones de plantas de banano y abundantes canales ocasionan una gran movilidad de elementos, por lo que surge la necesidad de realizar un estudio descriptivo de varios perfiles en una hacienda bananera, mediante un muestreo ráster, por lo cual se proponen los siguientes objetivos.

OBJETIVO GENERAL

- ❖ Análisis de las propiedades físicas y químicas de tres perfiles de suelo cultivado con banano, empleando técnicas geoestadística.

l. Objetivos específicos.

- Inferir las propiedades generales del suelo entre perfiles.
- Analizar la distribución espacial de tres perfiles del suelo mediante el muestreo ráster.
- Comparar los modelos geoestadístico lineal, circular, gauss y esférico mediante el coeficiente de determinación, coeficiente de determinación y el error medio cuadrado.

2. Marco teórico epistemológico de la investigación

2.1. El suelo y sus propiedades físicas, químicas y biológicas

Varios autores consideran al suelo como un recurso biofísico por medio del cual se desarrolla la vida de personas, plantas y animales (Bastida, Zsolnay, Hernández, & García, 2008; Sánchez-Navarro et al., 2015). Los geólogos lo entienden como el material superficial de la corteza terrestre, siendo el estado intermedio entre el ciclo de la erosión de la roca hasta convertirse en sedimento. Los químicos consideran el suelo como el recipiente en el cual el material mineral ha sido puesto por fuerzas y agentes naturales dentro del cual los fertilizantes se vierten para proveer nutrientes a las plantas (Loaiza, 2010). Diferentes conceptos que convergen en que el suelo es un recurso vital para el desarrollo de los seres vivos del planeta.

Por otra parte, las propiedades de los suelos son las características por la cual se puede diferenciar y se clasifican en físicas, químicas y biológicas. Se modifican en función de los fenómenos climáticos y de los factores bióticos que actúan sobre los materiales geológicos, acondicionados por el relieve y drenaje, durante un periodo de tiempo (Loaiza, 2010).

Las propiedades del suelo consideradas como generales se presenta en la Tabla 1, las cuales son muy susceptible a su cambio ocasionando un desbalance en la producción. Por otra parte, el conjunto de propiedades se la conoce como la calidad del suelo definida por Doran & Zeiss (2000), como la facultad para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa (Barrezueta-Unda, González, & Chabla-Carrillo, 2017).

2.2. Problemas en la descripción del suelo

Los suelos son heterogéneos y guarda un alto grado de complejidad al describir un perfil. Los primeros investigadores de las ciencias del suelo implementaron cavar una fosa y en una de las paredes la denominaron perfil, la cual se delimitó capas u horizontes basados en propiedades observadas en el campo. Estas propiedades generalmente incluyen color, textura y estructura (Grauer-Gray & Hartemink, 2016). Después de la delineación del horizonte, se toma una muestra

de suelo de cada horizonte para el análisis de laboratorio (Figura. 1). Como resultado, sólo se mide la variación vertical de un perfil de suelo (Grauer-Gray & Hartemink, 2018).



Figura 1.- Descripción de un perfil del suelo

Fuente: R Niebla, 2018

La variación de las propiedades del suelo a lo largo de un perfil es usualmente confusa a medida que aumenta en profundidad. Sin embargo, con el muestreo tradicional se asume que el valor del horizonte es un atributo particular que lo distingue de los demás horizontes (Malone, Mcbratney, Minasny, & Laslett, 2009).

Aunque muchos investigadores están de acuerdo con esta técnica, en la actualidad la tecnología ha permitido ser más exacto en la medición del espesor de los horizontes y ser más preciso en la transición entre horizontes, y por tango se puede establecer el movimiento vertical de los nutrientes.

Tabla 1.- Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos en las regiones tropicales del planeta.

Tipo de indicador	Indicadores del suelo	Relación Condición/Funciones del suelo	Unidades de Medida
Físicas	Textura	Retención y transporte de agua y minerales; modelización del nivel de erosión del suelo y estimación de la variabilidad.	% de arena, limo y arcilla
	Profundidad	Estimación de la productividad potencial y erosión. Normalización del paisaje y variabilidad geográfica.	cm
	Granulometría (arena, limo y arcilla)	Formación de agregados que origina las clases texturales	g kg ⁻¹ o %
	Densidad aparente del suelo	Potencial para lixiviación, productividad y erosión	Min/2.5 cm agua Y Mg/m ³
	Conductividad hidráulica ¹	Balance hídrico	Columnas de agua (cm ³ s ⁻¹) Ratios de labranza
	Rugosidad del suelo ¹	Labranza del suelo	
	Estabilidad de agregados ¹		% volumen de suelo
		Balance hídrico y crecimiento de raíces	
	Materia Orgánica	Fertilidad del suelo, estabilidad y extensión de la erosión; Uso en modelos de procesos y para normalización de sitios.	g Kg ⁻¹ C o N /ha ⁻¹
	Ph	Reacción del suelo, regulador de vida microbiana y disponibilidad de elementos	Escala 4 a 10
Biológico	Conductividad eléctrica	Umbral definido por las plantas y la actividad microbiana.	dS/m
	N-P-K extractable	Nutrientes utilizables por las plantas y pérdidas potencial de N, productividad e indicadores de calidad ambiental.	Kg/ha/30 cm
	C y N de la biomasa microbiana	Potencial catalítico microbiano y reposición de C y N; modelización; efecto de la materia orgánica y manejo de la tierra	Kg C o N/ha/30 cm o -CO ₂ producido
	N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N; Modelización de los procesos.	KgN/ha/30 cm
	Respiración del suelo, contenido de agua y temperatura	Mediciones de la actividad microbiana, Modelización de los procesos; Estimación de la actividad microbiana	Kg C/ha/día, pérdida de C versus entradas; pool de C total (Kg/m ² / 30 cm)
	Bacterias y hongos	Indicador de la actividad biológica del suelo	Unidades formadoras de colonias (UFC) por g de suelo

2.3. Geoestadística en la ciencia del suelo

La geoestadística es un subconjunto de estadísticas especializadas en el análisis e interpretación de datos de referencia geográfica, especializados en el análisis de datos espaciales. El método

busca análisis de patrones de puntos (point pattern analysis) y los objetos poligonales (lattice statistics, área objects), como se muestra en la (Figura. 2).

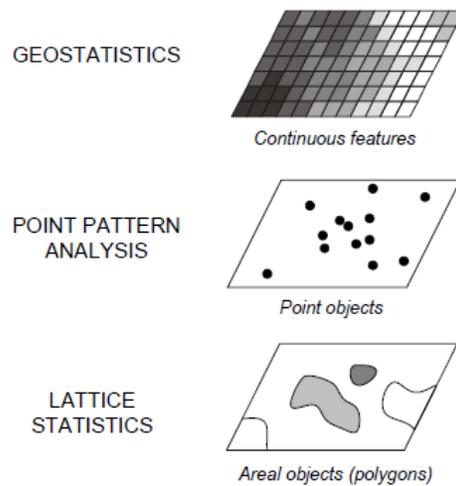


Figura 2.- Método de análisis geoestadístico, patrones de puntos y objetos poligonales.

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80 años como una alternativa a la clasificación para representar la variación espacial (Garbanzo-León, Alemán-Montes, Alvarado-Hernández, & Henríquez-Henríquez, 2017). Burgess y Webster en 1980 fueron los primeros en utilizar Kriging, su aplicación práctica, en estudios de suelo, y muchos otros pedólogos y científicos del ambiente como Mcbratney, Field, & Koch (2014) y Hartemink (2015) los han seguido utilizando (Heuvelink & Webster, 2001).

La geoestadística analiza información espacial mediante modelos estadístico y se relaciona con variables medidas en una zona con continuidad espacial, se fundamenta en el estudio de la autocorrelación espacial, es decir, asume que las observaciones de ambos sitios serán más similares en la medida en que estos sean más cercanos (Cressie, 1993)

El fundamento estadístico es que la variable $Z(x)$ (ecuación 1), es al azar y espacialmente autocorrelacionados. En su forma más simple, el modelo es:

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (1)$$

Dadas las capacidades predictivas de la geoestadística y la alta variabilidad de las propiedades del suelo a medida que se profundiza, hace que el mapeo digital de los suelos en áreas con datos limitados pueden predecir cuantitativamente las variaciones verticales y laterales de las

propiedades del suelo en un área definida (Malone et al., 2009), siendo necesario la utilización de esta técnica en el análisis espacial del perfil del suelo.

2.4. Mapeo digital del suelo (MDS)

Cualquier medida que tomemos en la Tierra, aunque a menudo se ignora, tiene una referencia espacio-temporal que está determinada por (al menos) cuatro parámetros: ubicación geográfica (longitud y latitud o coordenadas X, Y proyectadas), altura sobre la superficie del suelo (elevación), hora de medición (año, mes, día, hora, minuto, etc.) y soporte espacio-temporal (intervalo de tiempo de mediciones).

Para elaborar los mapas digitales del suelo utilizan métodos estadísticos y matemáticos para predecir y mapear sus propiedades o las clases a las que pertenecen, a partir de variables de fácil obtención (McBratney & Minasny, 2003).

El mapeo digital de suelos (MDS), se ha utilizado ampliamente para mapear y delimitar los órdenes, clases y propiedades del suelo de manera eficiente en todo el mundo (Padarian, Minasny, & Mcbratney, 2018).

Los factores para el adecuado diseño del MDS corresponden: a) a las propiedades del suelo en un punto; b) a las propiedades climáticas en un punto; c) a los organismos, vegetación o fauna o actividad humana; d) la topografía y atributos del paisaje; e) al material parental y litología; f) al factor tiempo; y g) a la posición espacial de los puntos de muestreo (Mcbratney et al., 2014; Padarian et al., 2018)

2.5. Variación espacial de las propiedades del suelo

Se pueden distinguir dos enfoques principales para representar la variación espacial en el suelo. El primer enfoque se relaciona con la taxonomía biológica del siglo XIX y la práctica del estudio geológico que divide el suelo en clases más o menos discretas. El segundo enfoque ve el suelo como un conjunto de variables continuas y busca describir la forma en que se modifican, dejando

de ser cualitativo a ser necesariamente cuantitativo e incorporo la teoría estadística (Heuvelink & Webster, 2001).

Cada característica del suelo son diferentes y contiene su propio patrón de distribución vertical que se puede decir como una función de profundidad. Las funciones de profundidad son de gran importancia al momento del estudio de la morfometría digital de suelos (Gray & Hartemink, 2017)

2.5.1. Morfometría

La Morfometría digital del suelo tiene como finalidad el uso de aplicaciones de materiales y técnicas para calcular y cuantificar los atributos del perfil del suelo. Los atributos que se utilizan considerablemente en la clasificación de suelo e indicativos de muchas funciones del suelo son 11 atributos semejantes: horizontes, textura, color, estructura, humedad, moteados, consistencia, carbonatos, fragmentos de roca, poros y raíces (Hartemink & Minasny, 2014). Para lograr una caracterización del lugar, mapeo del suelo y clasificación del suelo se requiere una información detallada sobre los perfiles del suelo (Zhang & Hartemink, 2018)

2.5.2. Ráster muestro de perfiles de suelo

La técnica ráster identifica los perfiles de suelo en dos dimensiones (vertical y horizontal), permite cuantificar la diferenciación lateral y perfeccionar la delimitación de los horizontes. Un ráster contiene puntos de datos espaciados por igual y se usa comúnmente en el MDS (Grauer-Gray & Hartemink, 2018).

Existen pocas investigaciones realizadas con el método ráster. Es usado para estudiar la diferenciación espacial de las propiedades generales en los perfiles del suelo.

2.6. Características del banano (*Musa sapientum L.*)

2.6.1. Superficie cultivada de banano en Ecuador

En el Ecuador la producción de banano es una actividad que tiene más de 60 años de desarrollo y se constituye una de las principales fuentes de su Economía, aunque su cultivo en nuestras tierras data desde inicios del siglo pasado (Castro, Calvas, & Knoke, 2015). El gran desarrollo bananero

se produjo a partir del año 1944 y fue estimulado por el alza en el precio de la fruta en los mercados internacionales. Gracias al rápido ascenso de la producción de banano para el año de 1959 se convirtió en el principal rubro de exportación del Ecuador. Este auge bananero fue un período de gran crecimiento de las exportaciones que dio lugar a un prolongado crecimiento sostenido en el Ecuador, de este modo el PIB valorado a precios constantes entre 1948 y 1954 ascendió en 5.6%, entre 1954 y 1965 en 4.8%, y entre 1965 y 1970 en 5.2% (Fernández-Torres, Sandoya-Villafuerte, Crespo-Torres, & Marin-Castillo, 2017).

La estadística de la FAO coloca a Ecuador como el primer exportador de banano a nivel mundial con el 30% del mercado y el cuarto productor en el mundo de esta fruta (Castro et al., 2015). El banano es el primer producto de exportación no petrolero desde el año 2003, al cierre del año 2014 las exportaciones se ubicaron en \$ USD. 2.522,7 millones en valor FOB (Bancon Central del Ecuador [BCE] , 2015).

Datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP) hasta el año 2017 se registró 162.236 hectáreas sembradas de banano pertenecientes a 4.473 productores de la fruta (Ministerio del Comercio Exterior [MCE], 2017), de los cuales el 95,6% son pequeños y medianos productores (Tabla 2). En este sentido, la producción del banano en el país gira principalmente en el ámbito de la economía familiar y la Economía Popular y Solidaria (EPS), lo que le convierte en un sector que coadyuva a la generación de empleo y la reducción de la pobreza rural (Elbehri, Calberto, Stave, Hospido, & Skully, 2015).

Tabla 2.- Superficie cultivada de banano y número de productores registrados en el Ecuador.

Distribución superficie (ha)	Superficie sembrada (ha)	Número productores	Distribución relativa (%)
0-30 ¹	35 685	3 480	78%
30-100 ²	57 486	800	17,6 %
>100 ³	69 063	193	4,4%
Total	162.236	4 473	100

¹ pequeños productores, ² medianos productores, ³ grandes productores.

Fuente: (MCE, 2017)

En el caso de la provincia de El Oro es el sistema agrario más significativo en generación de empleo y de dinámica comercial. Esto es debido a las 50 883 hectáreas cultivadas, de las cuales el 42% corresponde a pequeños productores (<30 ha). Adicional a lo detallado, la provincia de El Oro ha sido favorecido por condiciones climáticas y ecológicas propicias para el cultivo de banano. En este contexto, el proceso de la producción del banano requiere del uso de tecnología para optimizar recursos que le permitan reducir costos para generar sostenibilidad económica y ambiental.

2.6.2. Requerimientos del cultivo Edáficos

El banano para obtener un buen desarrollo necesita de una gran cantidad de agua debido a que el sistema radicular y la parte del pseudotallo son muy exigentes. La planta requiere generalmente de suelos ricos en potasio, arcillo-silíceos y calizos. Chinchilla & Rojas (2004) citado por Seraquive, (2017).

El banano se desarrolla óptimamente en suelos llanos, con buen drenaje y una buena disponibilidad de nutrientes. Se cultiva el banano adecuadamente en suelos que tengan una textura arenosa y finas e incluso se puede sembrar en suelos franco arcillosa que no supere más del 40% el contenido de arcilla, debido a la disponibilidad de raíces que van desde 1.5 metros. El pH que requiere el banano debe estar en un rango entre 6 – 6.5. (Custodio, 2009).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Provincia de El Oro, ubicada al sur del Ecuador, en el Cantón Machala sitio “la María”, Finca “San José” (Figura 3). El clima es tropical húmedo de acuerdo a la clasificación de to Köppen (Staller, 2001; Spracklen & Righelato, 2016). La media anual de temperatura es de 24,1 °C y la precipitación acumulada de 550 ml (Cañadas Cruz, 1983; Luna-Romero et al., 2018).

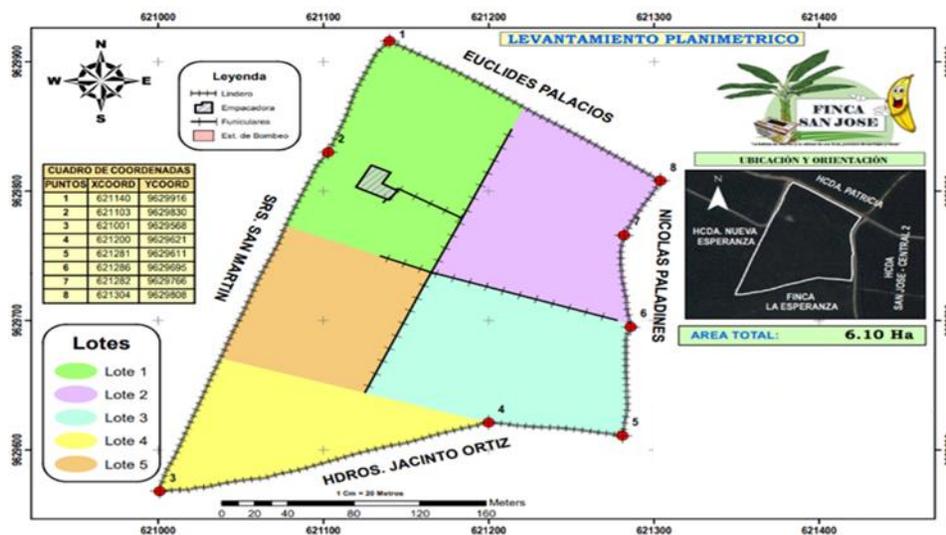


Figura 3.- Ubicación del área en estudio

En cuanto a las condiciones geológicas, el suelo es de origen aluvial, con planicies en la zona costera donde predominan los órdenes Alfisol y Entisol (Baldock, 1982; Villaseñor, Chabla, & Luna, 2015), el tipo de textura franco-arcillosa y franco arenoso (Espinoza & Moreno, 2016).

La superficie de la finca es de 6.1 ha cultivada en su totalidad con banano del clon Cavendish. El promedio de producción es de 350 cajas/semana. Más detalles de las principales características de la finca San José, ver Tabla 3.

Tabla 3.- Características de los sitios en estudio

Características	Detalle
Altitud (m msnm)	4 msnm
Pendiente (%)	Plano
Uso actual	Banano (30 años)
Profundidad horizonte orgánico (Ap)	0-25 cm
Color en seco (Ap)	6/2 10 yr
Subgrupo de suelo ¹	Aquic dystrostepts
pH	7.4
Textura	Franco limoso; (<20 % de arcilla)
Distancia de siembra y densidad de plantas	1450 ha – 1.75m *2 m

¹ Clasificación (USDA, 2010) tomado de Villaseñor et al., (2015)

3.2. Diseño de la investigación

3.2.1. Diseño del muestreo

Con información previa proporcionado por el administrador y con la ayuda de un mapa digital, la finca San José (Figura. 3), se dividió en terreno en tres lotes. Cada lote tiene una superficie de 2 ha en donde se procedió a realizar una calicata para la toma de muestras. En una pared de cada calicata el suelo de 2 m x 0,6 m el perfil fue dividido en cuadrículas de 20× 20 cm (Figura. 4).



Figura 4.- Esquema del muestreo en el perfil del suelo

A continuación, se recolectaron 500 g de suelo del centro en cada cuadrado. El total de muestra fueron 30 por cada perfil, los cuales fueron secadas al aire por 72 horas, luego trituradas y tamizadas a 2 mm, para su posterior análisis de laboratorio.

3.2.2. Análisis de laboratorio

Las propiedades físicas determinadas en el estudio fueron arena, limo y arcilla por el método de Boyoucos. Por otra parte, las propiedades químicas analizadas fueron carbono orgánico (%) por método de digestión húmeda con dicromato de potasio (Walkley & Black, 1934). También se realizó la medición del pH en pasta de saturación con agua relación 1:2.5 y la conductividad eléctrica (dS cm^{-1}). Determinaciones se realizaron el 5 de noviembre y se finalizó el 27 de diciembre del 2018 en el laboratorio de suelos de Universidad Técnica de Machala.

También se utilizó funciones de pedotransferencia para determina el nitrógeno (N) con la ecuación (2).

$$N_{total} = MOS * 0,05 \quad (2)$$

Donde N_{total} es nitrógeno total en el suelo, MOS es la materia orgánica del suelo obtenida de la multiplicación del factor de 1,724 por el CO (Pribyl, 2010) y la constante 0,05.

En el caso de la propiedad física densidad aparente (D_a) fue calculada con las modelos matemáticos propuesta por Alexander (1980) ecuación (3), Manrique & Jones (1991) ecuación (4) y Bernoux, Cerri, Arrouays, Jolivet, & Volkoff, (1998) ecuación (5), con el objetivo de determinar la mejor función para con el CO y el porcentaje de arcilla (clay).

$$D_a = 1,72 - 0,294 * CO^{0,5} \quad (3)$$

$$D_a = 1,660 - 0,318 * CO^{0,5} \quad (4)$$

$$D_a = 1,398 - 0,0047 * clay - 0,042 * CO \quad (5)$$

3.3. Técnicas análisis geoestadístico

El análisis geoestadístico fue realizado mediante el uso de ArcGIS que es un software de sistema de información geográfica. Las muestras fueron ingresadas como coordenadas geográficas (valores x, y) mediante el cual se realizó el análisis de superficie, con el fin de diseñar mapas que muestren la distribución de los datos y la concentración de las propiedades generales del suelo, dentro de la unidad estudiada. Para ello, se utilizó el método de interpolación Kriging, utilizando

los parámetros obtenidos a partir de los análisis de los semivariogramas mediante el cual los valores del error cuadrado medio, coeficiente de determinación y coeficiente de determinación se compara los modelos de los semivariogramas. Los modelos usados fueron: lineal, esférico, circular y gaussiano

3.4. Análisis Estadísticos

Todas las pruebas estadísticas se realizaron mediante el programa SPSS, versión 23.0 (SPSS, 2013). Las propiedades físico-químicas del suelo en estudio y fueron tratados con la media estadística y error estándar de la media (EE), y los rangos máximos y mínimos. Se asume de los tres perfiles son diferentes por lo que se utilizó el estadístico de Levene para determinar la homogeneidad de varianza al ($P < 0,05$), también se realizó una prueba de comparación múltiple de medios (HDS Tukey con significancia al 5 % y regresiones lineales simples entre las variables en estudio.

4. RESULTADOS

4.1. Estadística descriptiva e inferencias

Las distribuciones de los valores por perfil de las propiedades físicas, se representan en la Figura 5, donde los diagramas de caja y bigote indican un mayor rango de valores para arcilla y limo en P1 (serie 1), seguido de P3 (serie 3), con medias sobre el 40% en arcilla y 35% en limo. El rango de arena fue superior en P2 (serie 2) con valores entre 50% y 70%. Estos resultados permitieron establecer dos clases texturales: franco arcillo limoso para P1 y P2 y franco arenoso para P3.

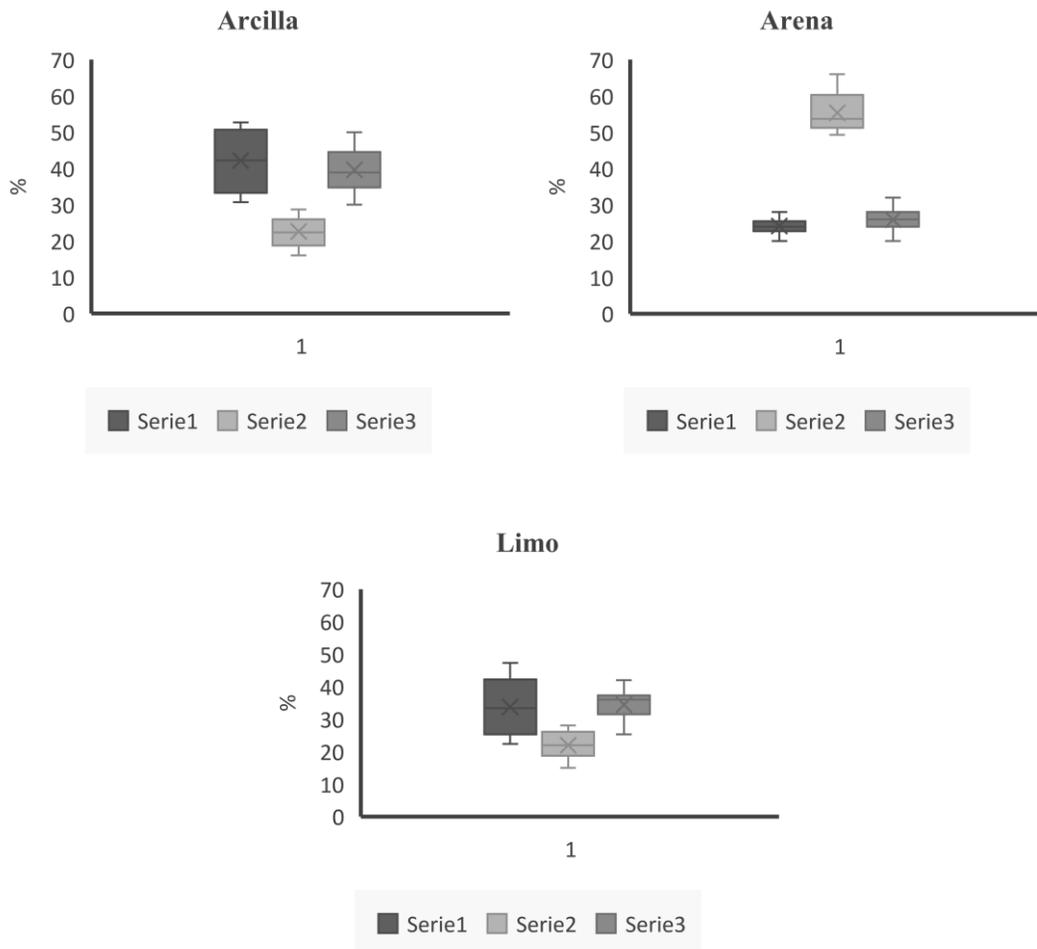


Figura 5.- Diagrama de cajas y bigotes para determinar la distribución de las propiedades físicas: arena, limo y arcilla en los 3 perfiles del suelo.

Las distribuciones de los valores por perfil de las propiedades químicas, se representan en la Fig. 6, donde los diagramas de caja y bigote indican una mayor dispersión de datos CE y pH en P3 (serie 3). El CO muestra mayor media en P1 (serie 1) y Nt en P2 (serie 2) y P3 (serie 3).

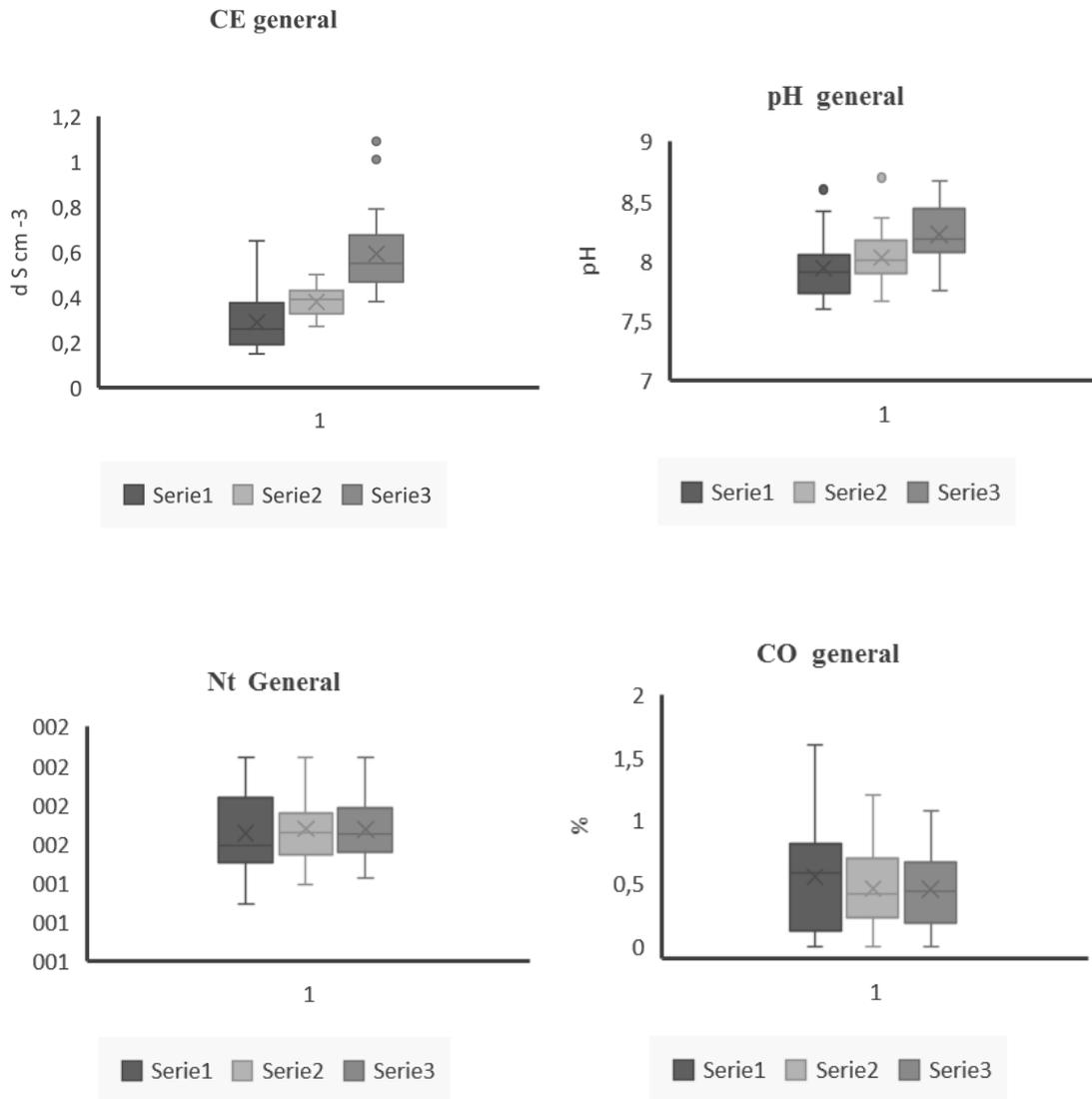


Figura 6.- Diagrama de cajas y bigotes para determinar la distribución de las propiedades químicas: CE , pH, CO, NT en los 3 perfiles del suelo.

Las distribuciones de los valores de las 3 ecuaciones estudiadas para determinación de D_a (g cm^{-3}), se representan en la Figura.7. Los diagramas de caja y bigote indican que la ecuación de Bernoux muestra valores superiores en comparación con las ecuaciones de Alexander y Manrique y Jones, más homogénea en dispersión de valores.

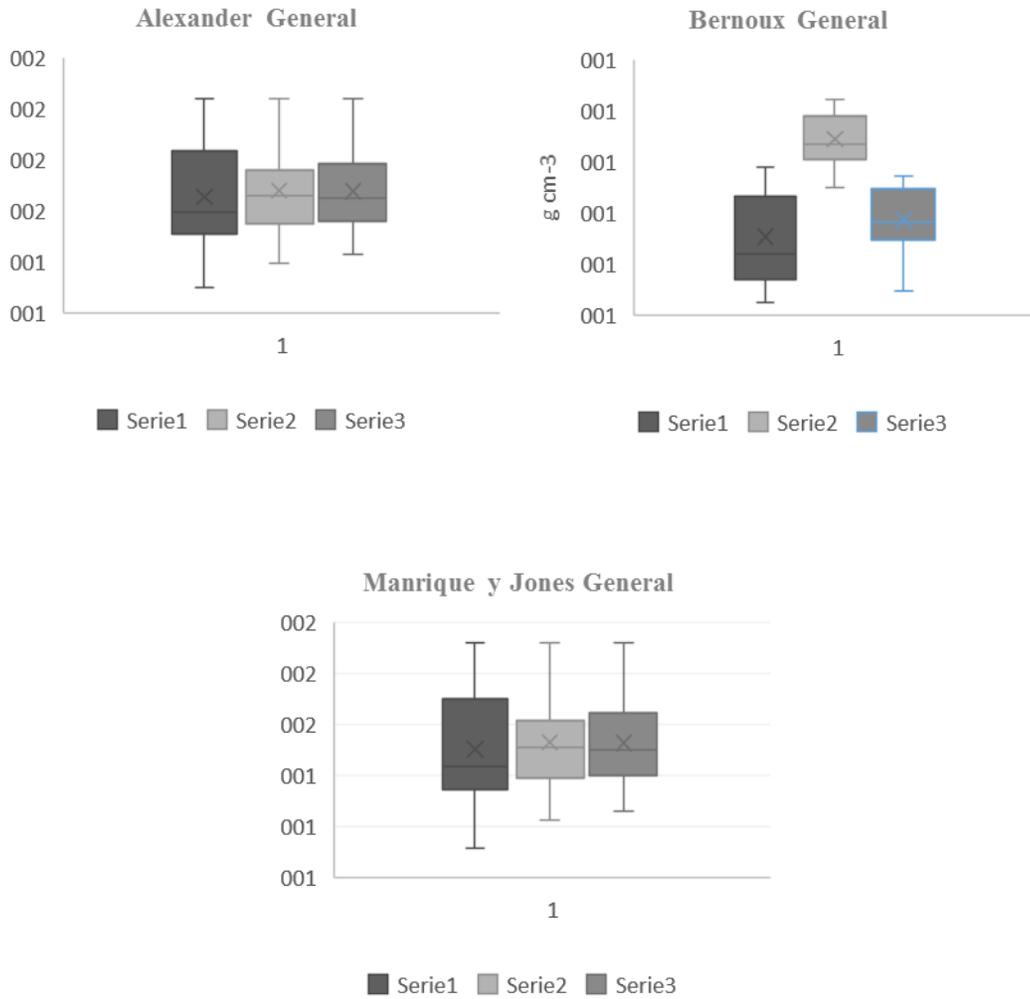


Figura 7.- Diagrama de cajas y bigotes para determinar la distribución de D_a (densidad aparente) en las tres ecuaciones estudiadas de los 3 perfiles del suelo.

En la tabla 4, se presenta el análisis inferencial de las propiedades físicas por perfil. Se observa diferencias significativas ($P < 0,00$) tanto para arena, limo y arcilla, el estadístico de Levene indico que las varianzas de los valores estimados son diferentes ($P < 0,05$). El perfil con mayor media de arena fue P2 con 55,40 % (rango 49,30-66,00 %), mientras que el valor más alto en limo se presentó en P3 con 34,44 %, aunque el rango máximo fue de 47,30% en P1. La mayor media de arcilla fue 42,19% en P1. La prueba de Tukey indico que P2 es diferentes al resto de perfiles.

Tabla 4.- Análisis inferencial de las propiedades físicas: arena, limo y arcilla

	Media	EE	Mínimo	Máximo	Sig.Levene $P < 0,05$	Sig. $P < 0,05$	Tukey ($P < 0,05$)
Arena							
P1	24,11	,36	20,00	28,00	0,000	0,000	B
P2	55,40	1,00	49,30	66,00			A
P3	25,92	,54	20,00	32,00			B
Limo							
P1	33,70	1,46	22,30	47,30	0,000	0,000	B
P2	21,10	,70	15,00	28,00			A
P3	34,44	,83	25,30	42,00			B
Arcilla							
P1	42,19	1,43	30,70	52,70	0,000	0,000	B
P2	22,62	,72	16,00	28,70			A
P3	39,64	1,05	30,00	50,00			B

Los valores de las propiedades químicas CE y pH, presentaron significancia estadística ($P < 0,00$). Las medias de CE fueron menores a 0,60 d S cm⁻³ con el mayor rango en P3 donde se obtuvo 1,09 dS cm⁻³, valores que indica baja presencia de sales. En el caso del pH los valores más altos fueron en P3 con una media de pH 8,23. Los rangos máximos se ubicaron entre pH fueron 8,60 a 8,70 y los valores mínimos entre pH 7,60 a 7,76, suelos que se categorizan como ligeramente alcalino y alcalinos (Tabla 5).

Tabla 5.- Análisis inferencial de las propiedades químicas

	Media	EE	Mínimo	Máximo	Sig. Levene P<0,05	Sig. P<0,05	Tukey (P<0,05)
CE							
P1	0.29	0.02	0.15	0.65	0.00	0.00	A
P2	0.38	0.01	0.27	0.50			B
P3	0.59	0.03	0.38	1.09			C
pH							
P1	7.94	0.04	7.60	8.60	0.98	0.00	A
P2	8.03	0.04	7.67	8.70			A
P3	8.23	0.04	7.76	8.67			B
CO							
P1	0,55	0,08	0,00	1,60	0,129	0,48	A
P2	0,46	0,06	0,00	1,20			A
P3	0,45	0,05	0,00	1,08			A
N							
P1	0,05	0,007	0,00	0,14	0,092	0,467	A
P2	0,04	0,005	0,00	0,10			A
P3	0,04	0,005	0,00	0,09			A

De las tres ecuaciones utilizadas en el estudio (Tabla 6), solo la propuesta por Bernoux mostro significancia estadística ($P<0,00$), a pesar que el estadístico de Levene no indico ($P=0,38$) igualdad de varianzas, encontrando en P3 diferencias con el resto de perfiles, donde el rango se ubica en $1,23 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,31 \text{ g cm}^{-3}$. En el caso de las D_a obtenido con las ecuaciones de Alexander y la de Manriques y Jones, los valores fueron entre $1,40-1,72 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,31-1,66 \text{ g cm}^{-3}$, resultados que no se ajustan a tipo de textura determinada (franco arcillo limoso y franca arenosa).

Tabla 6.- análisis inferencial de la propiedad física Da con intervalos de 20 cm

Da (g cm ⁻³)	Media	E E	Mínimo	Máximo	Sig. Levene P<0,05	Sig. P<0,05	Tukey (P<0,05)
Alexander							
P1	1,54	0,02	1,4	1,72			A
P2	1,54	0,02	1,4	1,72	0,99	0,99	A
P3	1,54	0,01	1,41	1,72			A
Bernoux							
P1	1,27	0,00	1,23	1,31			B
P2	1,27	0,00	1,23	1,31	0,38	0,00	B
P3	1,20	0,01	1,12	1,24			A
Manriques y Jones							
P1	1,47	0,017	1,31	1,66			A
P2	1,47	0,017	1,31	1,66	0,99	0,99	A
P3	1,46	0,016	1,33	1,66			A

Se presenta el análisis de las propiedades físicas por distancia en la Tabla 7. Se observa diferencias significativas ($P<0,00$) limo y arcilla, el estadístico de Levene indico que las varianzas de los valores estimados son diferentes ($P<0,05$). La distancia con mayor media de arena fue entre la muestra 21 a 30 con 36,46 % (rango 20,00-66,00 %), mientras que la mayor media de limo se presentó en la distancia de 1 a 10 con 31,82 %, aunque el rango máximo fue de 47,30% en la distancia 21 a 30. En arcilla la distancia 11 a 20 la media más alta fue de 39,54% con el mayor rango máximo (52,70 %). Esto indica que la distribución lateral de las partículas más liviana son diferentes tendiendo a disminuir en limo y aumentar en arcilla, aunque los porcentajes de arena indican un incremento este no es representativo.

Tabla 7.- Análisis inferencial de las propiedades físicas a intervalo lateral de 20 cm

Distancia (cm)	Arena (%)			Limo (%)			Arcilla (%)		
	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30
Media	35,03	33,94	36,46	31,82	26,52	31,79	33,15	39,54	31,76
EE	2,13	2,52	3,42	0,81	1,26	1,94	1,55	1,89	2,07
Mínimo	22,7	22	20	24	18	15	20	26	16
Máximo	54	55,3	66	40	41,3	47,3	46,7	52,7	50
Levene P<0,05		0			0			0,3	
Sig. P<0,05		0,81			0,01			0,01	

Los valores de las propiedades químicas CE, CO y Nt (Tabla 8), presentaron significancia estadística ($P < 0,00$). El rango mínimo de CE fue de $0,15 \text{ d S cm}^{-3}$ en la distancia 21 a 30, y el valor máximo se ubicó en $1,09 \text{ d S cm}^{-3}$ entre 11 a 20. el CO y el Nt, muestran una tendencia de disminuir sus porcentajes desde la distancia 11 en adelante, valores que se reflejan en sus rangos máximo (1,60% de CO y 0,14% de Nt entre 1 a 10). Esto indica que al estar más cerca de la planta existe mayor disponibilidad de materia orgánica y baja salinidad.

En el caso del pH los valores más altos fueron entre 1 a 10 y 11 a 20 con una media de pH 8,07 y 8,05 respectivamente. El rango máximo se ubicó en entre 11 a 20 con pH 8,70 y los valores mínimos tuvieron poca variabilidad, sin mostrar diferencias significativas ($P = 0,90$) (Tabla 8).

Tabla 8.- Análisis inferencial de las propiedades químicas del suelo a intervalos lateral de 20 cm

	Ph			CE			CO			N		
	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30
Media	8,07	8,07	8,05	0,47	0,44	0,35	0,65	0,48	0,34	0,05	0,04	0,03
EE	0,04	0,05	0,05	0,02	0,04	0,03	0,07	0,07	0,04	0,01	0,01	0,00
Mínimo	7,69	7,60	7,67	0,31	0,24	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	8,67	8,70	8,54	0,75	1,09	0,79	1,60	1,20	0,68	0,14	0,10	0,06
Sig. Levene $P < 0,05$	0,24			0,02			0,008			0,00		
Sig. $P < 0,05$	0,90			0,02			0,003			0,01		

De las tres ecuaciones utilizadas en el estudio (Tabla 9), el estadístico de Levene indico que las varianzas de los valores estimados son diferentes ($P < 0,05$). Se encontró la mayor media en la distancia 21 a 30 en las tres ecuaciones, cuyos valores fueron: $1,56-1,26-1,49 \text{ g cm}^{-3}$ para las ecuaciones de Alexander, Bernoux y Manrique y Jones, respetivamente. La menor Da fue en la distancia 11 a 20 obtenida por con la ecuación de Bernoux ($1,23 \text{ g cm}^{-3}$). Valores que indican a medida que se distancia el muestreo de la planta las Da tiene aumentar.

Tabla 9.- Análisis inferencial de las tres ecuaciones para determinación de Da a distancia lateral de 20 cm

	ALEXANDER			BERNOUX			MANRIQUE Y JONES		
	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30	1_10	11_20	21_30
Media	1,51	1,54	1,56	1,25	1,23	1,26	1,4	1,47	1,49
DS	0,08	0,10	0,06	0,03	0,037	0,06	,90	0,11	0,06
EE	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Mínimo	1,40	1,40	1,48	1,18	1,12	1,14	1,31	1,31	1,41
Máximo	1,72	1,72	1,72	1,30	1,27	1,31	1,66	1,66	1,66
Sig. Levene P<0,05		0,013			0,00			0,008	
Sig. P<0,05		0,136			0,059			0,116	

4.2. Análisis Geoestadístico: Distribución espacial

La Tabla 10, muestra la comparación de cuatro métodos de interpolación, utilizados para la técnica de Kriging, para las propiedades de suelo en estudio, utilizando cuadrado medio (RMSE) y R2 para determinar cuál método geoespacial es que mejor predice a partir de los valores obtenidos. El método k esférico muestra un RMSE cercano a cero para CE, pH, Nt y Da y el valor de R2 en el método lineal cercano a 1 fue para CO, Nt y Da en P1. Para P2 k esférico también fue cerca de cero en CE, Nt y en las propiedades físicas arena, limo y Da igual resultado se muestra para R2 en el método k lineal. Similar tendencia se observa en P3. Con lo que se descarta k Gauss y K circular como método de interpolación espacial.

Tabla 10.- Comparación de métodos de interpolación espacial: lineal , esférico, circular y gauss

Perfil 1	K Esférico			K Gauss			K circular			K Lineal		
	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2
CE	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Ph	0,197	0,683	0,467	0,208	0,528	0,278	0,197	0,672	0,452	0,208	0,528	0,278
CO	0,287	0,881	0,777	0,329	0,779	0,607	0,292	0,869	0,755	0,329	0,779	0,607
Nt	0,025	0,881	0,777	0,028	0,765	0,585	0,025	0,869	0,755	0,028	0,779	0,607
Arena	1,279	0,827	0,685	1,465	0,707	0,499	1,317	0,811	0,658	1,127	0,879	0,773
Limo	7,649	0,976	0,953	7,978	0,000	0,000	7,978	0,000	0,000	7,978	0,000	0,000
Arcilla	7,320	0,962	0,925	7,822	0,000	0,000	7,822	0,000	0,000	7,822	0,000	0,000
Da	0,038	0,799	0,638	0,041	0,610	0,372	0,038	0,784	0,615	0,038	0,784	0,615
perfil 2	K Esférico			K Gauss			K circular			K Lineal		
	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2
CE	0,000	1,000	1,000	0,009	0,989	0,977	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000
Ph	0,223	0,000	0,000	0,223	0,000	0,000	0,223	0,000	0,000	0,223	0,000	0,000
CO	0,330	0,000	0,000	0,330	0,000	0,000	0,330	0,000	0,000	0,330	0,000	0,000
Nt	0,028	0,000	0,000	0,028	0,000	0,000	0,028	0,000	0,000	0,028	0,000	0,000
Arena	0,000	1,000	1,000	0,012	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,012	1,000	1,000
Limo	0,000	1,000	1,000	0,433	0,996	0,991	0,179	1,000	0,999	0,433	0,996	0,991
Arcilla	3,950	0,000	0,000	3,950	0,000	0,000	3,950	0,000	0,000	3,950	0,000	0,000
Da	0,012	0,984	0,969	0,017	0,932	0,868	0,017	0,932	0,868	0,017	0,932	0,868
Perfil 3	K Esférico			K Gauss			K circular			K Lineal		
	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE	R	R2
CE	0,055	0,967	0,936	0,099	0,846	0,715	0,061	0,958	0,918	0,099	0,846	0,715
Ph	0,147	0,793	0,628	0,163	0,677	0,458	0,151	0,766	0,586	0,163	0,677	0,458
CO	0,290	0,456	0,208	0,301	0,166	0,028	0,291	0,421	0,177	0,301	0,166	0,028
Nt	0,025	0,456	0,208	0,026	0,166	0,028	0,025	0,421	0,177	0,026	0,166	0,028
Arena	0,000	1,000	1,000	0,228	0,998	0,996	0,000	1,000	1,000	0,228	0,998	0,996
Limo	4,063	0,531	0,282	4,257	0,363	0,132	4,075	0,514	0,264	4,257	0,363	0,132
Arcilla	0,012	1,000	1,000	1,699	0,968	0,938	0,906	0,993	0,987	1,699	0,968	0,938
Da	0,012	0,972	0,945	0,018	0,919	0,845	0,016	0,941	0,885	0,018	0,919	0,845

La distribución espacial de los valores de arcilla entre los perfiles 1 y 2 se muestra en la Figura 8. En los primeros 40 cm del P1 los rangos fueron mayores a 39,59 %, mientras en el Perfil 2, lado izquierdo (cerca de la planta), indico valores cercanos al 30% de arcilla y luego continuó aumentando hacia la derecha y descendiendo en el perfil. Esto indica un cambio en las condiciones de textura.

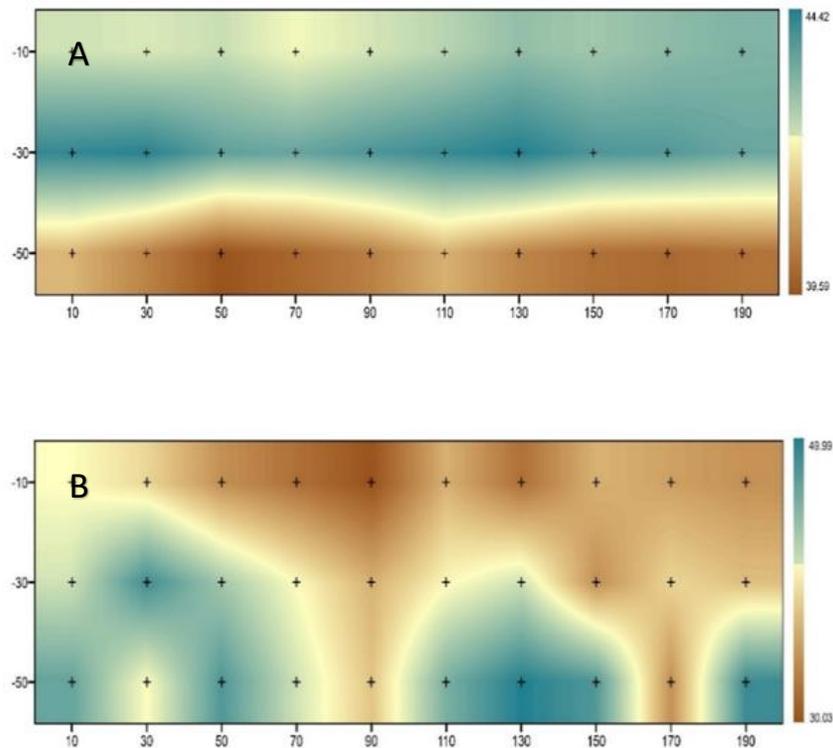


Figura 8.- Distribución espacial de la arcilla, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3.

En la Fig. 9 A-B de los perfiles 1 y 3 se puede observar zonas con mayor porcentaje de arena en los primeros 40 cm, mientras en el P2 tuvo mayor disminución en la parte inferior del perfil del suelo.

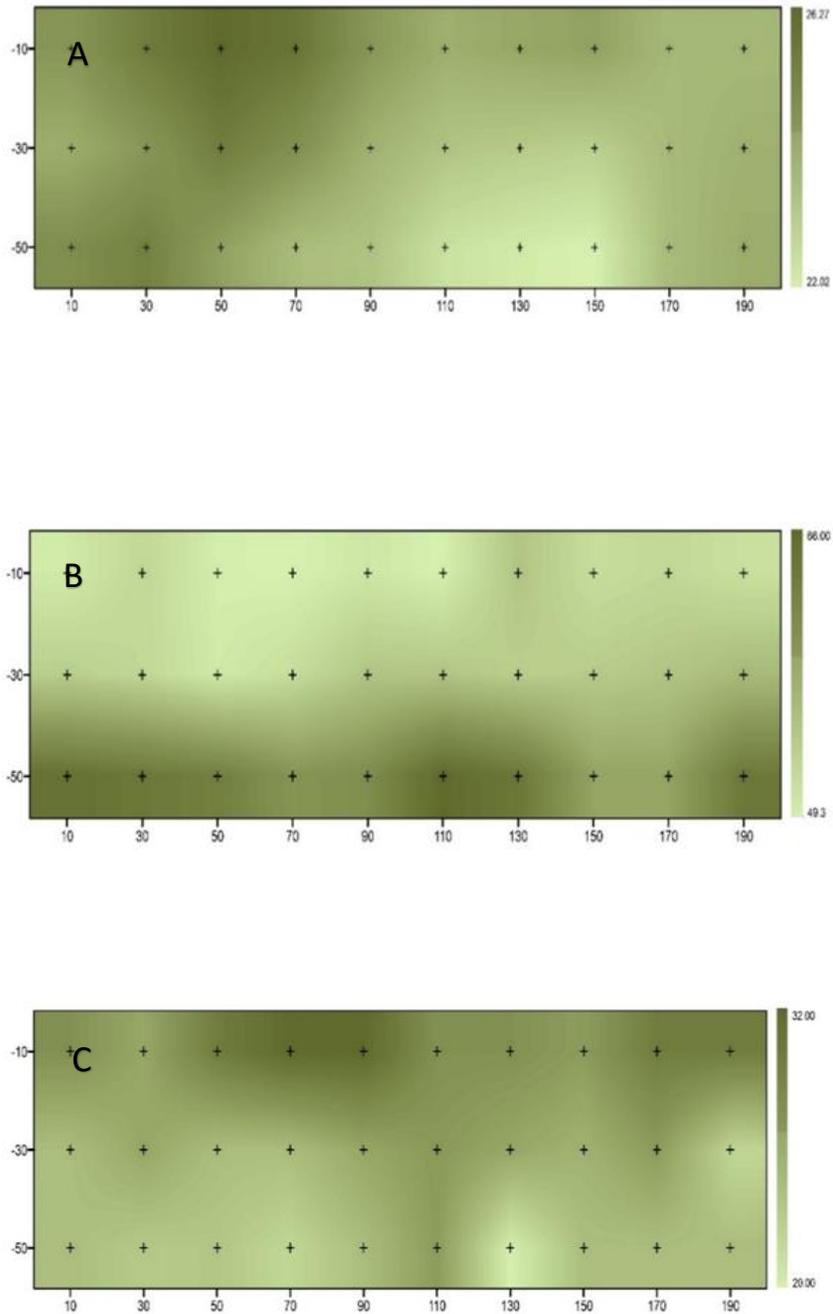


Figura 9.- Distribución espacial de arena, mediante la técnica de muestreo raster (modelo de Kriging): A) perfil 1 método lineal, B) Perfil 2 método esférico, C) Perfil 3 método esférico

La distribución espacial de los valores de limo (Fig. 10), en el P1 fue el porcentaje en la parte superior del perfil del suelo con rangos (<31.13 %) mientras que el P2 tuvo mayor porcentaje en los primeros 40 cm y en el P3 hubo mayor distribución de limo a lado derecho del perfil. Esto indica la tendencia a tener un balance heterogéneo de los valores arena, limo y arcilla cuando el muestreo está cerca de la planta.

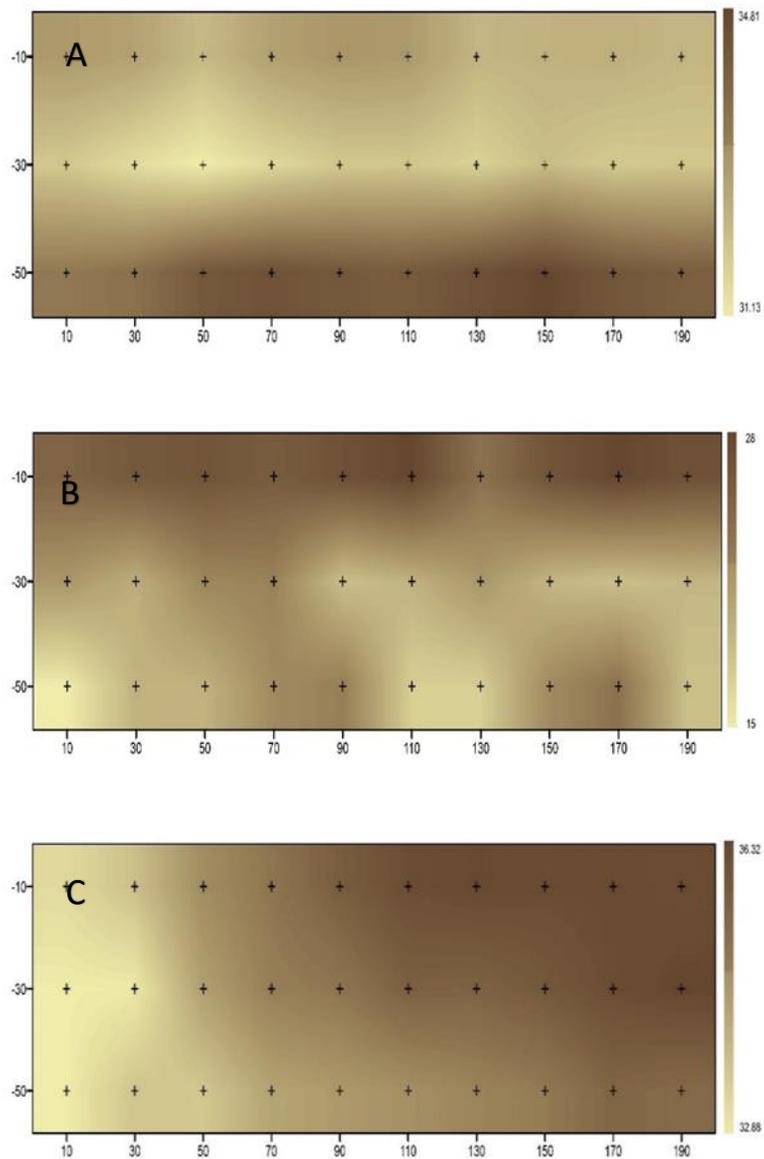


Figura 10.- Distribución espacial de limo, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 2, C) Perfil 3

La distribución espacial de los valores de CE, entre los 3 perfiles fue diferentes como se muestra en la Fig. 11. En los primeros 30 cm del P1 los rangos fueron de mayores en la parte izquierda y bajaron levemente hacia el centro. En P2, se encontró mayor concentración en la parte superior a los 40 cm de suelo con un valor 0.50 ds cm^{-3} y en el P3 se obtuvo mayor CE en el lado derecho recorriendo de los 20 – 60 cm.

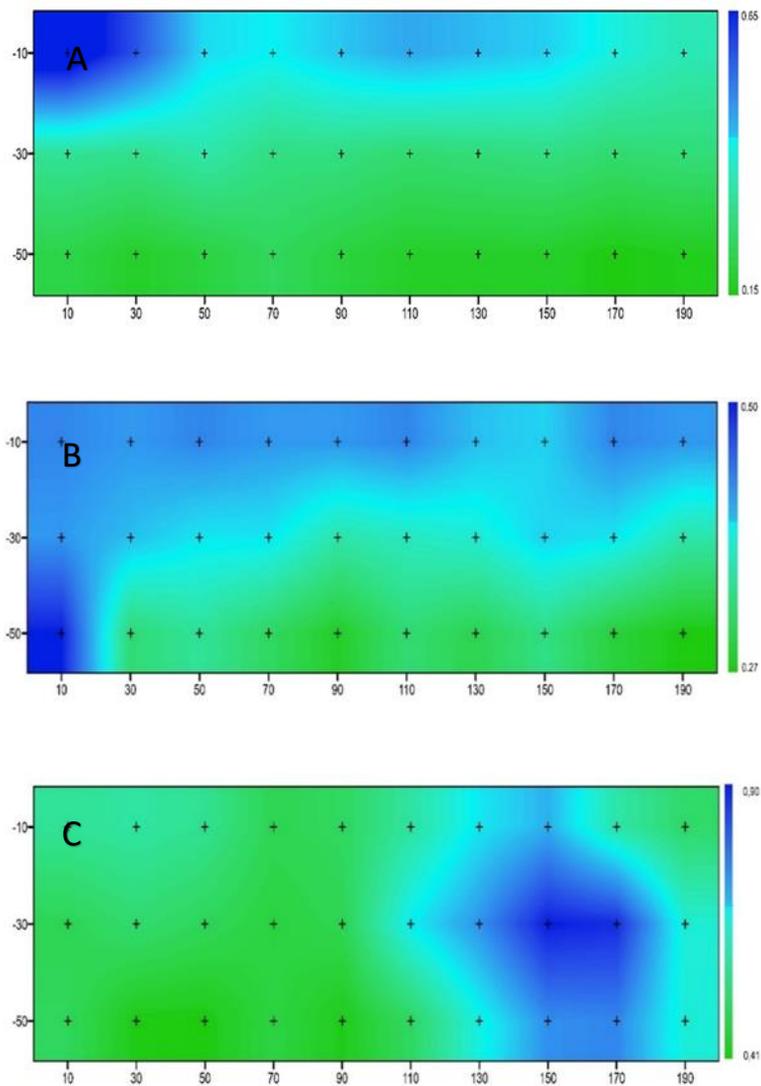


Figura 11.- Distribución espacial de conductividad eléctrica, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 2, C) Perfil 3.

La distribución espacial de los valores de pH se mostró similares (Fig. 12), con disminución de pH en el lado derecho un pH 7.83 mientras que el centro hacia lado izquierda tuvo el mayor rango (pH 8.02) que es moderadamente alcalino. Repitiendo la tendencia de las otras propiedades que a mayor distancia de la zona radicular de la planta el valor tiende a aumentar.

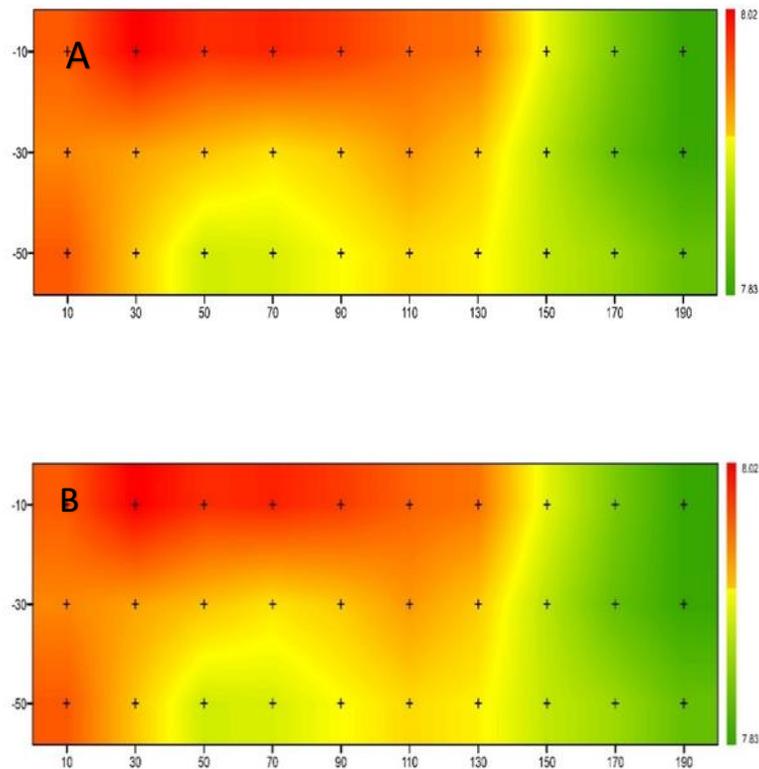


Figura 12.- Distribución espacial de pH, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3.

La distribución espacial de los valores de CO entre los perfiles 1 y 2 fue diferentes (Fig.13). En los primeros 40 cm de la parte derecha del Perfil 1 los rangos fueron mayores a 0.84%, mientras en el Perfil 2, cercanos a la planta (lado izquierdo), indico valores cercanos al 0.53% de CO y luego descendiendo en el perfil, bajando su porcentaje.

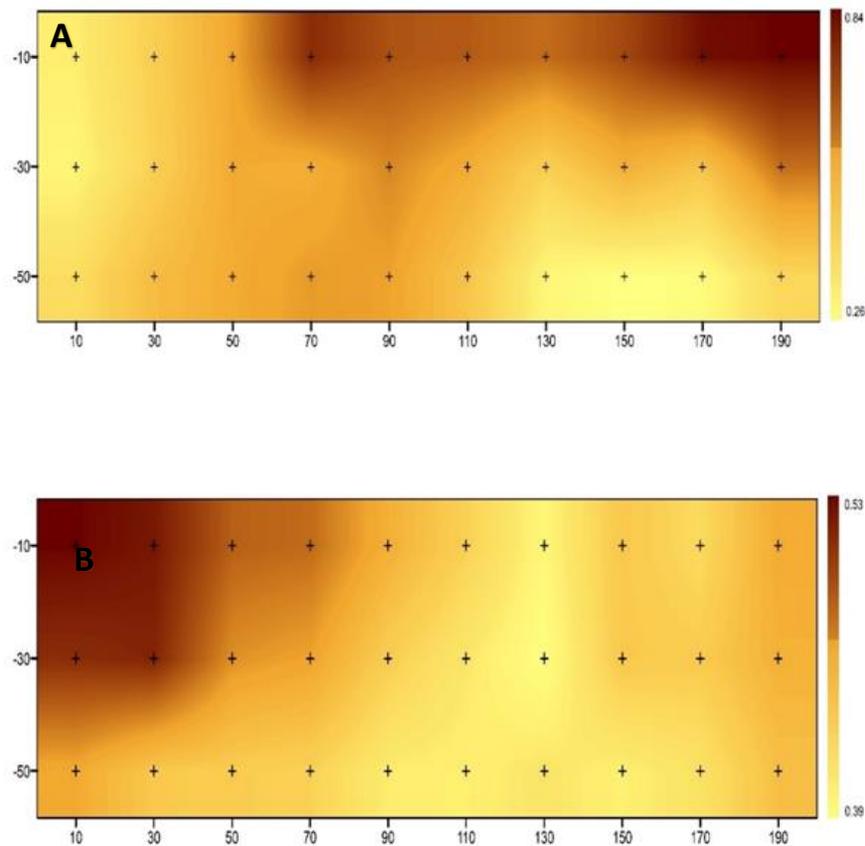


Figura 13.- Distribución espacial de CO, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3

Los valores de N_t mostraron una distribución homogénea en P1 y P3, con ligero aumento en el lado derecho en P1, mientras que en P2 el incremento fue en el lado izquierdo.

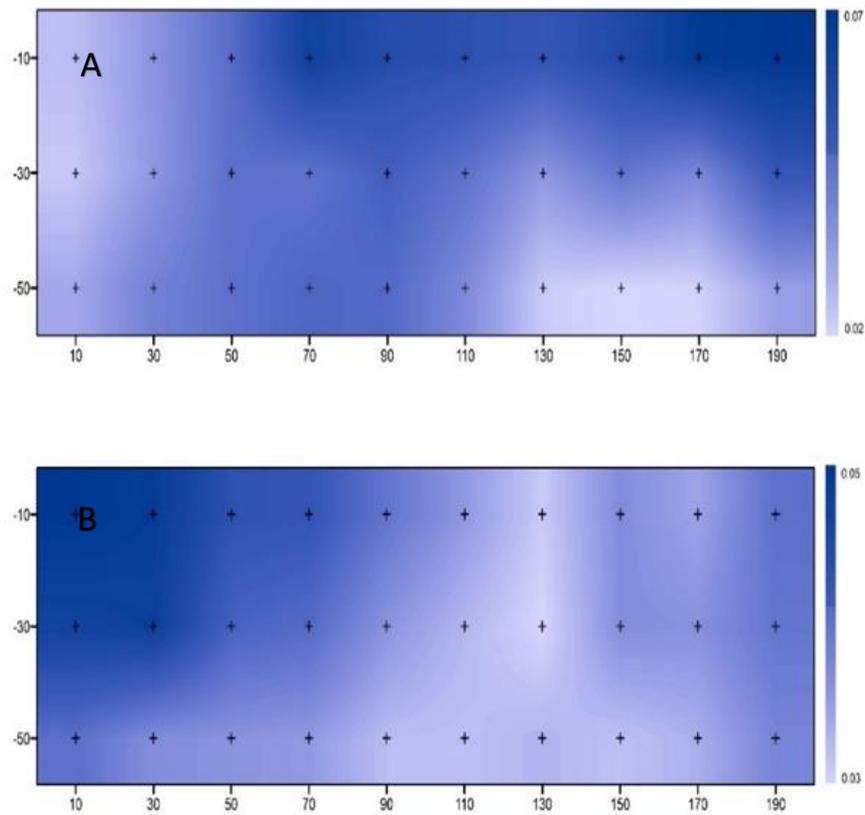


Figura 14.- Distribución espacial de N_t , mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 3

La distribución espacial de los valores de D_a entre los 3 perfiles fueron diferentes (Figura 15). En los primeros 30 cm del P1 los rangos fueron menores y en la parte izquierda fue mayor 20 – 60 cm (1.18 g cm^3). En el Perfil 2, se encontró baja concentración en la mayor parte superior a los 40 cm de suelo con (1.25 g cm^3) y en el P3 se obtuvo mayor rango en el lado derecho recorriendo de los 20 – 60 cm.

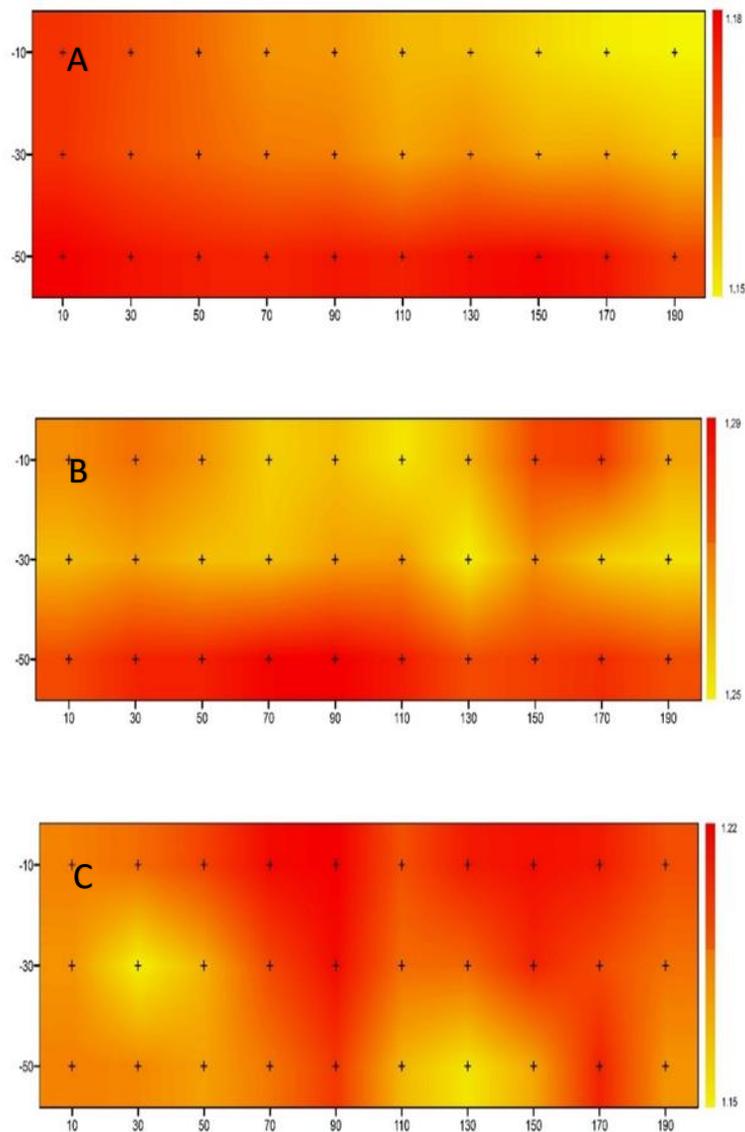


Figura 15.- Distribución espacial de densidad aparente, mediante la técnica de muestreo raster por método interpolación esférico, modelo de Kriging: A) perfil 1, B) Perfil 2, C) Perfil 3.

5. CONCLUSIONES

Este estudio se usó del método ráster como herramienta de investigación para los perfiles de suelo. El método ráster sirve para caracterizar los perfiles de suelo y se puede usar para cuantificar la variación lateral y mejorar la delineación del horizonte del suelo mediante la verificación o revisión de la delineación de campo de los horizontes del suelo.

Con los mapas generados por el método de Kriging fue posible identificar áreas parciales con diferente variabilidad, así como la dirección de mayor variabilidad de la propiedad en función de la distancia. Esto es importante para ubicar y orientar los perfiles de suelo experimentales, como en los estudios de balance que se obtuvo de nitrógeno y carbono.

En los 3 perfiles de suelo el modelo de interpolación esférico fue más preciso y eficiente ante los modelos lineales, circular y gaussiano, aunque la diferencia en el método esférico y lineal no fue muy amplia o significativa. Posiblemente, la alta densidad de muestreo benefició a ambos métodos haciendo difícil determinar cuál fue mejor.

Los mapas muestran que la concentración de varias propiedades físico-químicas presentó una distribución heterogénea en el perfil del suelo, con la presencia de anisotropía en el área de estudio.

6. BIBLIOGRAFIA.

- Alexander, E. B. (1980). Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 689–692.
- Baldock, J. (1982). *Geología del Ecuador: Boletín de Explicación del Mapa geológico de la República del Ecuador*. (IGM, Ed.). Quito: Dirección General de Geología y Minas.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147(3–4), 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Barrezueta-Unda, S., Antonio, ;, González, P., & Chabla-Carrillo, J. (n.d.). *Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia Determination of indicators for quality of soils cultivated with cocoa in the province El Oro-Ecuador*.
- BCE. (2015). *Reporte de coyuntura sector agropecuario*. Quito. Retrieved from http://www.planeacion.cundinamarca.gov.co/BancoMedios/Imagenes/estadisticas_de_cundinamarca_2010_final.pdf%5Cnfile:///C:/Users/MARIA T/AppData/Local/Mendeley Ltd./Mendeley Desktop/Downloaded/Cundinamarca - 2010 - Sector Agropecuario.pdf
- Bernoux, M., Cerri, C., Arrouays, D., Jolivet, C., & Volkoff, B. (1998). Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 743–749.
- Cañadas Cruz, L. (1983). *El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador*. (B. C. del Ecuador, Ed.). Quito: Editores Asociados.
- Castro, L. M., Calvas, B., & Knoke, T. (2015). Ecuadorian Banana Farms Should Consider Organic Banana with Low Price Risks in Their Land-Use Portfolios. *PLOS ONE*, 10(3), e0120384. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120384>
- Chinchilla, E., & Rojas, D. (2004). Estudio del proceso de trabajo y operaciones. perfiles de riesgos y exigencias laborales en el cultivo y empaque del banano. http://www.cso.go.cr/documentos/documentos_tecnicos/serie_tecnica/05_Serie%20tecnica%20No.%205.pdf.
- Custodio, J. (2009). Producción de banano en Guatemala. *Guatemala: COBIGUA Costa Sur*.
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)

- Elbehri, A., Calberto, G., Stave, C., Hospido, A., & Skully, D. (2015). *Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política*. (A. Elbehri, Ed.). Roma, Italy: FAO.
- Espinosa, J., & Moreno, J. (2016). Soils from the Highlands. In G. Bernal (Ed.), *The Soils of Ecuador* (pp. 1–195). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20541-0>
- Fernández-Torres, A., Sandoya-Villafuerte, J., Crespo-Torres, N., & Marin-Castillo, Y. (2017). Internet of things as a solution for production and disaster activities in the province of Los Rios. *Journal of Science and Research*, 3, 32–36. Retrieved from <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/5/660>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., & Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geograficas*, 2017(93), 20–41. <https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- Grauer-Gray, J., & Hartemink, A. (2016). Variation of Soil Properties in a Mollisol Profile Wall. In A. Hartemink & A. Mcbratney (Eds.), *Digital Soil Morphometrics*. Springer International Publishing.
- Grauer-Gray, J., & Hartemink, A. (2018). Geoderma Raster sampling of soil profiles. *Geoderma*, 318, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.029>
- Gray, J. G., & Hartemink, A. E. (2017). Variation of soil property depth functions. *ResearchGate*.
- Hartemink, A. E. (2015). New Tools for Pedologists: Digital Soil Morphometrics. *Soil Horizons*, 56(2), 0. <https://doi.org/10.2136/sh2015-56-2-gc>
- Hartemink, A. E., & Minasny, B. (2014). Towards digital soil morphometrics. *Geoderma* 230, 305–317.
- Heuvelink, G. B. M., & Webster, R. (2001). Modelling soil variation : past , present , and future. *Geoderma*, 100, 269–301.
- Labrador, J. (2008). Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. *Sociedad Española de Agricultura Ecológica*, 1–47. Retrieved from http://five.dsm.usb.ve/bibliografia/manejo_de_suelos.pdf
- Lal, R. (1998). Agronomic impact of soil degradation. In R. Lal, W. . Blum, C. Valetine, & B. Stewart (Eds.), *Methods for Assessment of Soil Degradation*. Boca Raton, Florida, EE.UU.: CRC.

- Leyva R, S. L., Baldoquín P, A., & Reyes O, M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios , Las Tunas , Cuba Properties of soils in different agricultural uses , Las Tunas , Cuba. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 36–47. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.81>
- Loaiza, J. C. (2010). El recurso suelo. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 6–18.
- Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., & Villaseñor, D. (2018). Spatio-temporal distribution of precipitation in the Jubones river basin, Ecuador: 1975-2013. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 63–70. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.07>
- Malone, B. P., Mcbratney, A. B., Minasny, B., & Laslett, G. M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154, 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.007>
- Manrique, L. A., & Jones, C. A. (1991). Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 476–481.
- Mcbratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213.
- McBratney, A. B., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma* 117 (1–2), , 3-52
- MCE. (2017). *Informe sector bananero ecuatoriano*. Quito.
- Padarian, J., Minasny, B., & Mcbratney, A. B. (2018). Using deep learning for Digital Soil Mapping. *SOIL*, (September), 1–17.
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3–4), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Sánchez-Navarro, A., Gil-Vázquez, J. M., Delgado-Iniesta, M. J., Marín-Sanleandro, P., Blanco-Bernardeau, A., & Ortiz-Silla, R. (2015). Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *CATENA*, 131, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.023>
- Seraquive, C. M. (2017). CARACTERIZACIÓN DEL MANEJO POSCOSECHA Y CUANTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE BANANO (*Musa acuminata*) ORGANICO EN LOS RÍOS. *Los Ríos - Ecuador: FICA., Universidad de las Américas*, 83.
- Spracklen, D. V., & Righelato, R. (2016). Carbon storage and sequestration of re-growing montane forests in southern Ecuador. *Forest Ecology and Management*, 364, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.001>
- SPSS, I. (2013). *SPSS Statistics for Windows*. Chicago, IL, USA: IBM Corp. Retrieved from

<https://www.ibm.com/us-en/marketplace/spss-predictive-analytics-enterprise>

Staller, J. (2001). Reassessing the Development and Chronological Relationships of the Formative of Coastal Ecuador. *Journal of World Prehistory*, 15(2), 193–246.

USDA. (2010). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (Decima). USDA-NRCS. Retrieved from http://www.mdp.edu.ar/agrarias/grado/723_Genesis/archivos/Taxonomia_Suelos_2010.pdf

Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la provincia del El Oro. *Cumbres*, 1(2), 28–34.

Walkley, A., & Black, A. (1934). An examination of the determination method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.

Zhang, Y., & Hartemink, A. E. (2018). Digital mapping of a soil profile. *ResearchGate*

7. ANEXOS



Anexo 1.- Realización de la calicata de con una profundidad de 0,60 cm y ancho de 2 m.



Anexo 2.- Toma de las 30 submuestras del perfil para la determinar las propiedades generales del suelo.



Anexo 3.- Preparación de las muestras, para determinar la textura Las lecturas fueron registradas a las 40 segundos y a las 7 horas



Anexo 4.- Determinación de la materia orgánica de las muestras tomadas.



Anexo 5.- Preparación de una solución 1:2.5, para determinar el pH y conductividad eléctrica.