


	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 1

Neiva, 9 de Noviembre de 2015

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Diego Leonardo Chavarro Peña, con C.C. No. 1075268263, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado: Análisis de compactación en suelos agrícolas aplicando sistemas de información geográfica en el sena –cefa angostura, presentado y aprobado en el año 2015 como requisito para optar al título de Ingeniero agrícola, autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.





- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:



	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Análisis de compactación en suelos agrícolas aplicando sistemas de información geográfica en el sena –cefa angostura

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Chavarro Peña	Diego Leonardo

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Torrente Trujillo	Armando

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería





PROGRAMA O POSGRADO: Agrícola

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2015

NÚMERO DE PÁGINAS: 67

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4

Diagramas___ Fotografías_x__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_x__ Grabados___ Láminas___ Litografías___ Mapas_x__ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros_x_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:





PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. compactación	compaction	6. _____	_____
2. variabilidad espacial	spatial variability	7. _____	_____
3. geostadísticos	geostatistical	8. _____	_____
4. kriging	kriging	9. _____	_____
5. _____	_____	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)





El presente proyecto tiene como objetivo evaluar procesos de compactación en suelos agrícolas por medio del indicador resistencia mecánica a la penetración (RP). Se implementaron equipos y tecnologías de sistemas de información geográfica relacionadas con la variabilidad espacial de suelos y agricultura de precisión (AP). El estudio se llevó a cabo en el Centro de Formación Agroindustrial “La Angostura” del SENA ubicado en Campoalegre – Huila., se realizaron pruebas de humedad volumétrica, RP con penetrómetro digital con, GPS y barrenado in situ en un lote de 6,4 ha cultivado intensamente con cereales (arroz y maíz) con 54 puntos de muestreo. Los puntos de muestreos fueron definidos y graficados utilizando el método sistemático de distribución homogénea o puntos regulares con la extensión GME (Geospatial Modelling Environment) del software ArcGIS®. Posteriormente, los puntos fueron ubicados en el campo por medio de un navegador GPS. El análisis de los resultados y la generación de los puntos con

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4

dependencia espacial de iguales características, se realizó a partir de métodos estadísticos y geostadísticos de interpolación kriging conociendo zonas compactadas en toda el área de estudio

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This project aims to evaluate processes in agricultural soil compaction through mechanical indicator penetration resistance (RP). Equipment and technologies of geographic information systems related to the spatial variability of soil and precision agriculture (AP) were implemented. The study was conducted at the Center for Agribusiness Training "La Angostura" SENA Campoalegre- located in Huila., Volumetric moisture testing, RP were

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4

performed with digital penetrometer, GPS and drilling site in a batch of 6.4 He has grown intensively with cereals (rice and corn) with 54 sampling points. The sampling points were defined and graphed using the systematic method or regular homogeneous distribution points extension GME (Geospatial Modelling Environment) of ArcGIS® software. Subsequently, the points were located in the field using a GPS navigator. The analysis of the results and generating points with spatial dependence of the same characteristics was conducted using statistical and geostatistical methods of kriging interpolation knowing compacted in the whole area of study areas.

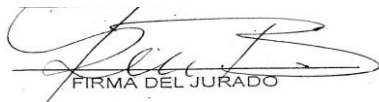
APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Rodrigo Pachón bejarano

Firma:



FIRMA DEL JURADO

Nombre Jurado: Jorge Orlando Mayorga Bautista

Firma:



FIRMA DEL JURADO

**ANÁLISIS DE COMPACTACIÓN EN SUELOS AGRICOLAS APLICANDO
SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA EN EL SENA –CEFA
ANGOSTURA**

DIEGO LEONARDO CHAVARRO PEÑA

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRICOLA
NEIVA-HUILA
2015**

**ANÁLISIS DE COMPACTACIÓN EN SUELOS AGRICOLAS APLICANDO
SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA EN EL SENA –CEFA
ANGOSTURA.**

DIEGO LEONARDO CHAVARRO PEÑA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Agrícola.**

Director

PhD. Armando Torrente Trujillo

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRICOLA
NEIVA-HUILA**

2015

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

Director

Neiva 20 de octubre, de 2015

“A Dios que Es todo sobre todo.”

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

A. ARMANDO TORRENTE TRUJILLO., PhD., Profesor la Universidad Surcolombiana de Neiva y director del trabajo.

A. WILLIAM OCHOA., ING. Instructor Sena Cefa Angostura y codirector del trabajo.

A. RODRIGO PACHON BEJARANO Y ORLANDO MAYORGA Jurados y Profesores de la Universidad Surcolombiana de Neiva

A. CANDIDO HERRERA Subdirector Sena Cefa Angostura.

A.SENNOVA Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación Sena Cefa Angostura

A. mi familia, mis padres y mi hermano más que todo a quienes amo y a todas aquellas personas que de una y otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTADO DE FIGURAS.....	8
LISTADO DE TABLAS.....	9
LISTADO DE GRAFICAS.....	9
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 General.....	15
1.2 Específicos.....	15
2. ESTADO DEL ARTE.....	16
2.1 Antecedentes.....	16
2.2 Compactación de los suelos.....	18
2.2.1 Factores de variabilidad de los suelos.....	18
2.2.2 Penetrometro y Resistencia a la penetración.....	19
2.2.3 Caracterización Física y química de los suelos compactados.....	20
2.3 Estadística y Geoestadística de variables de los suelos.....	21
2.4 Agricultura de precisión.....	23
2.2.2.1 Generalidades.....	23
2.2.2.2 Componentes de la agricultura de precisión.....	25
2.2.2.3 Sistemas de información geográfica.....	26
3. MATERIALES Y METODOS.....	28
3.1 Ubicación general de la zona de estudio.....	28
3.2 Diseño experimental.....	29
3.3 Medición y toma de muestras en campo.....	31
3.4 Análisis de laboratorio.....	33
3.5 Procesamiento de datos.....	36

3.5.1	Análisis estadístico	36
3.5.2	Obtención del semivariograma y mapas Kriging	36
4.	ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	38
4.1	Resultado de análisis estadístico y geoestadístico	38
4.1.1	Estadística en la RP y algunas propiedades de estudio	38
4.1.2	Análisis geoestadístico y de variabilidad espacial	40
4.1.2.1	Variabilidad espacial de RP a diferentes profundidades.....	40
4.1.2.2	Variabilidad espacial de RP y otras propiedades	41
4.1.3	Relación de la RP como indicador de compactación con otras propiedades Físicas y químicas	42
4.1.4	Mapas Kriging	44
4.1.4.1	Análisis de mapas kriging para las variables estudiadas.....	50
5.	CONCLUSIONES	51
6.	RECOMENDACIONES.....	53
	ANEXOS.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	62

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación general de la zona de estudio	29
Figura 2. Distribución de puntos de muestreo en la zona de estudio.....	30
Figura 3. Prueba y calibración del equipo	31
Figura 4. Lote de estudio sometido a riego	31
Figura 5. Estacas en guadua para demarcación de muestreo	32
Figura 6. Lecturas de RP Penetrometro digital FieldScout SC 900	33
Figura 7. Toma de lecturas de Humedad volumétrica insitu	33
Figura 8. Extracción y almacenado de muestras de suelo.....	34
Figura 9. Recipientes contenidos de suelo, agua y agente dispersante	34
Figura 10. Cilindros de sedimentación - Lectura de hidrómetro.....	35
Figura 11. Muestras de suelo en saturación, plato poroso de 0.3 y 15 bar.....	36
Figura 12. Presión liberada, Muestras retiradas pesadas y secadas.....	36
Figura 13. Mapas raster de interpolación Kriging para la variable Rp (Mpa) a prof. de 20 y 30 cm	46
Figura 14. Mapa raster de interpolación Kriging de Humedad volumétrica (%Hv)..	47
Figura 15. Mapa raster de interpolación Kriging de textura (%Arena.....	48
Figura 16. Mapa raster de interpolación Kriging de textura (%Arcilla)	48
Figura 17. Mapa raster de interpolación Kriging de textura (%Limo)	49
Figura 18. Mapa raster de interpolación Kriging de (%Ad)	49
Figura 18. Mapa raster de interpolación Kriging conductividad eléctrica (CE)	50
Figura 18. Mapa raster de interpolación Kriging de pH	50

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen estadístico para valores de RP (Mpa) a diferentes profundidades	39
Tabla 2. Estadística descriptiva de algunas propiedades físicas y químicas en la zona de estudio	40
Tabla 3. Resultados semivariograma isotrópico para valores de RP (Mpa) a diferentes profundidades	41
Tabla 4. Resultados semivariograma isotrópico propiedades a 30 cm de profundidad.....	42
Tabla 5. Resultados correlación de Pearson a 20 cm de profundidad.....	43
Tabla 6. Resultados correlación de Pearson a 30 cm de profundidad.....	44

LISTADO DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Grafica parámetros del semivariograma.....	22
Gráfica 2. Semivariograma para las variables estudiadas	59

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar procesos de compactación en suelos agrícolas por medio del indicador resistencia mecánica a la penetración (RP). Se implementaron equipos y tecnologías de sistemas de información geográfica relacionadas con la variabilidad espacial de suelos y agricultura de precisión (AP). El estudio se llevó a cabo en el Centro de Formación Agroindustrial “La Angostura” del SENA ubicado en Campoalegre– Huila., se realizaron pruebas de humedad volumétrica, RP con penetrómetro digital con GPS y barrenado in situ en un lote de 6,4 ha cultivado intensamente con cereales (arroz y maíz) con 54 puntos de muestreo. Los puntos de muestreos fueron definidos y graficados utilizando el método sistemático de distribución homogénea o puntos regulares con la extensión GME (Geospatial Modelling Environment) del software ArcGIS®. Posteriormente, los puntos fueron ubicados en el campo por medio de un navegador GPS. El análisis de los resultados y la generación de los puntos con dependencia espacial de iguales características, se realizó a partir de métodos estadísticos y geostatísticos de interpolación kriging conociendo zonas compactadas en toda el área de estudio.

Palabras Claves: *Compactación; Variabilidad espacial.; Geostatísticos; Kriging.*

ABSTRACT

This project aims to evaluate processes in agricultural soil compaction through, mechanical indicator penetration resistance (RP). Equipment and technologies of geographic information systems related to the spatial variability of soil and precision agriculture (AP) were implemented. The study was conducted at the Center for Agribusiness Training "La Angostura" SENA Campoalegre- located in Huila., Volumetric moisture testing, RP were performed with digital penetrometer, GPS and drilling site in a batch of 6.4 He has grown intensively with cereals (rice and corn) with 54 sampling points. The sampling points were defined and graphed using the systematic method or regular homogeneous distribution points extension GME (Geospatial Modelling Environment) of ArcGIS® software. Subsequently, the points were located in the field using a GPS navigator. The analysis of the results and generating points with spatial dependence of the same characteristics, was conducted using statistical and geostatistical methods of kriging interpolation knowing compacted in the whole area of study areas.

Keywords: *Compaction; Spatial variability; Geostatistical ; kriging*

INTRODUCCIÓN

El problema de la degradación de tierras agrícolas a nivel mundial, clama por el desarrollo de nuevas tecnologías y sistemas de cultivo que conduzcan a una agricultura sostenible asentada en suelos sostenibles (Amezquita, 1998).

La agricultura tradicional no ha sido objeto de grandes transformaciones, normalmente el agricultor empieza a deducir a ciencia cierta del terreno partiendo de muestreos representativos en diferentes lugares del mismo, esos datos son posteriormente analizados y promediados de acuerdo a teorías de variables establecidas y al final se toman las decisiones para realizar labores en terreno (siembra, procesos de adecuación de terreno, cosecha y otros). Por lo anterior, se quiere hacer alusión al cambio y diferencia que genera la implementación de la agricultura de precisión, ya que a través de un muestreo intensivo y más detallado, se determina la variabilidad espacial del terreno basado en el monitoreo del rendimiento en cada sector o área de terreno. Todos estos procesos se proyectan para lograr eficiencia a la hora de proceder con la aplicación de tecnología, aumentando la competitividad y productividad en el sector agrícola, reduciendo costos, mejorando calidad para un manejo adecuado ambiental de los cultivos.

La agricultura de precisión puede implementarse en cualquier cultivo y labor, sin importar la zona del país ni la escala de la producción. Se puede adaptar a las especificidades de cada sistema productivo: ambiente, clima, suelo, topografía material genético y sistema de gestión. Por esta razón, un número considerable de agro empresarios en Colombia se están beneficiando con su implementación: productores de caña de azúcar, banano, palma de aceite, maíz, soya y algunos frutales entre otros.

Después y considerando la trayectoria de las aplicaciones e influencias de las prácticas de la AP se quiere aplicar técnicas relacionadas a esta, como ayuda al problema de degradación de la estructura de suelo que ocurre en todos los suelos y niveles de producción agrícola, ya que se ha demostrado que es inminente este problema ya sea por mecanización o tiro animal a la hora del laboreo, y es ahí al tema a profundizar y a mejorar con equipos de análisis y medición en la AP que dará una buena investigación como ingenieros agrícolas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siempre se ha hablado de la compactación de suelos como un problema abismal de la agricultura, estudios realizados durante años relacionando a esta con diferentes tópicos de una mala utilización de la tierra por parte del hombre o de una característica innata del propio suelo. Trabajos dando múltiples soluciones con técnicas de buenas prácticas agrícolas (BPA) para controlar y recuperarlos de este lio. Según La FAO (1990) indica que del total de 1475 millones de hectáreas que son utilizadas en agricultura (cultivos permanentes + cultivos anuales), 553 millones de hectáreas se encuentran degradadas por intervención humana, lo cual equivale a que cerca del 37% del área intervenida por el hombre tiene algún problema de degradación. A nivel del Continente Americano, en Norte América el 27% de las tierras dedicadas a agricultura están degradadas, en Centro América el 74% y Sur América el 45% (Oldeman, 1994)

Las condiciones favorables para el crecimiento radicular están asociadas a cualidades del suelo como la distribución de poros, la facilidad del movimiento del agua, además de las condiciones de formación del suelo, que le confiere una variabilidad natural a estas propiedades (Gomes et al., 2007), Por otra parte, la capacidad que tiene de la raíz para encontrar algún espacio para poder desarrollarse en el suelo y no hallarlo limita el crecimiento de la planta. Estas limitantes debido a condiciones de compactación a profundidades del suelo sobre el piso de arado, combinado con altas fluctuaciones del contenido de agua y temperatura del horizonte superficial del suelo, puede resultar en una mayor vulnerabilidad del cultivo a la aireación y a un stress de humedad o nutrimentos (Materchera *et al.*, 1993).

La compactación de suelos agrícolas es un problema que afecta diversas partes del departamento del Huila y el mundo, debido al uso excesivo de maquinaria para procesos de labranza, ganadería intensiva y también por características innatas del suelo. Éste problema incide notoriamente en la producción agrícola, disminuyéndola debido a que no se presentan las características de porosidad apropiadas, los elementos esenciales del suelo escasean (N, P, K), incidiendo en la mala relación suelo-planta, impidiendo que haya una absorción ideal de agua y nutrientes, lo que hace que el crecimiento y desarrollo general de las plantas no sea el esperado.

Se ve como una preocupación la “posible compactación” de los suelos agrícolas en esquemas de agricultura continua con sistemas de siembra directa. Ante dicha interrogante, y al no existir un método fiable, rápido y razonablemente económico de análisis, muchos productores deciden volver a laborear, mayormente con el método de subsolado, perdiendo así años de equilibrio. Así mismo, se incurre en un costo importantísimo ya que el laboreo implica un gasto energético enorme, para cubrir así un supuesto problema. Problema que se desconoce no vuelva a presentarse a brevedad. En consecuencia con este proyecto se quiere implementar una alternativa a este problema, mediante la Agricultura de Precisión y asociado a ello los sistemas de información geográfica con la utilización de equipos tecnológicos en predios del centro de formación agroindustrial SENA regional Huila ubicado en cercanías al municipio de Campoalegre , ya que a la hora de elaborar estrategias de manejo de suelos, determinar el grado de compactación del mismo tanto como su variabilidad espacial en una zona determinada, permiten conocer con exactitud si tenemos el suelo compactado y donde, permitiendo solucionarlo (en caso necesario) donde y solo donde debemos hacerlo.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

- Implementar las tecnologías de sistemas de información geográfica, variabilidad espacial de suelos y AP en la evaluación de procesos de compactación de suelos agrícolas.

1.2 ESPECÍFICOS

- Determinar valores de la resistencia mecánica a la penetración (RP) como indicador de procesos de compactación del suelo en el área de estudio.
- Graficar el área de estudio para identificar y visualizar zonas de mayor y menor compactación.
- Analizar la variabilidad espacial de la RP y algunas propiedades físicas y químicas en relación a la compactación del suelo, utilizando equipos tecnológicos de AP
- Comprobar la veracidad y normalidad de los datos tomados en campo mediante métodos estadísticos y modelos geostatísticos.

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1 Antecedentes

De los estudios más recientes se cita dos principales como ayuda a orientar y complementar este proyecto. En primer lugar se tiene que, en el 2014 fue presentado en la Facultad de Ingeniería, programa de ingeniería civil de la Universidad militar nueva granada de Colombia, trabajo de grado "*variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración del suelo. "caso estudio: centro agropecuario marengo - sabana de Bogotá"* por Orduz Salamanca, Karen E., como requisito para optar el título de *Especialista en Geomática*.

La investigación es un estudio de un indicador de proceso de compactación como lo es la resistencia mecánica a la penetración que representa limitantes en la producción agrícola, el estudio se concentró y fue concebido en totalidad en terrenos del Centro Agropecuario Marengo ubicado en Mosquera – Cundinamarca, aproximadamente se utilizó 90 ha para realizar el muestreo en campo, se establece un muestreo aleatorio de 85 puntos con distancias que varían de 50 a 100 metros entre punto y punto donde se lleva a cabo cada medición, para la cual se utiliza como instrumento de estas el penetrolgger para evaluar profundidades de resistencia a la compactación de 0.05 metros hasta 0.30 metros con lo que se obtuvo la información para establecer áreas afectadas por problemas de compactación usando técnicas estadísticas y geoestadísticas, y mediante interpolación kriging.

Los procesos del proyecto y el análisis de los resultados permitieron determinar aspectos positivos y negativos en el transcurso de la elaboración de este proyecto, esta investigación ayudó en la comprensión en cuanto a que el análisis espacial de las variables del suelo debe considerar más de una variable, que el suelo hace parte de un conjunto de condiciones que determinan sus características, para el caso de la RP las labores culturales, clima, humedad del suelo, y ocupación del suelo hacen variar esta propiedad por lo que debe ser estudiada en condiciones aptas del suelo, a capacidad de campo y así determinar cuáles son críticas y lograr un manejo adecuado del suelo para preservar su calidad.

También se consultó el trabajo de grado que en el 2012, fue presentado por el ingeniero agrícola Mogollón Lancheros, Miguel R., como requisito para optar el

título de Magister en ingeniería agrícola que se dicta en la Facultad de ingeniería, departamento de ingeniería civil, de la Universidad Nacional de Colombia titulado *Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá.*

Este trabajo también hace alusión a la compactación del suelo como una de las principales limitantes en la producción agrícola. Se toma como variable la resistencia mecánica a la penetración, método más común para cuantificar el grado de compactación de un suelo. El objetivo del estudio fue establecer el comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración (RP) y su relación con propiedades físicas del suelo en un Andisol con diferentes usos y ocupaciones. Además otras variables fueron analizadas, humedad gravimétrica y volumétrica, densidades aparente y real, contenidos de arena, limo y arcilla, conductividad hidráulica saturada, porosidad total, agua disponible, macroporosidad y microporosidad. En el procedimiento se diseñaron dos mallas consistieron en dimensiones rectangulares de 20 m por 20 m y dos profundidades de muestreo (0,15 m y 0,30 m) en lote de pasturas y otro con labores previas de cultivo.

El estudio conduce y orienta esta investigación con el análisis descriptivo que dio a conocer que los suelos estudiados presentaron texturas francas y franco arcillosas, valores medios de RP superiores a 2,40 MPa en el lote de pasturas y de 1,50 MPa en el preparado mostrando un dato importante a tener en cuenta para nuestro estudio. En el lote con pastura, la mayoría de atributos presentaron dependencia espacial; caso contrario se observó en el lote preparado. Todo esto representado en mapas de interpolación kriging y semivariogramas ajustados que permiten una mejor percepción y visualización de las variables estudiadas en campo.

También este estudio no enseña que la permanencia prolongada de lotes con fines de pastoreo afecta notoriamente el grado de compactación del suelo a tal punto de presentar capas endurecidas o con valores superiores a 2 MPa un valor que es de vital importancia a tener en cuenta ya que ese valor de compactación y ubicadas en los primeros 0,10 m de profundidad del terreno afecta de gran manera el crecimiento radicular generando problemas a la planta, así mismo con el fin de no llegar a grados de compactación en esta clase de lotes esta tesis hace recomendable la alternancia de cultivos agrícolas (cultivos transitorios) o un manejo adecuado de drenaje para así suavizar los efectos de compactación ocasionados por el pisoteo animal.

2.2 Compactación de los suelos.

La definición formal de compactación está dada por (Doran y Parkin, 1996) como el proceso físico por el cual los granos del suelo se acomodan de manera tal que se reduce la porosidad y aumenta la densidad aparente del mismo. Este fenómeno afecta el desarrollo radicular de las plantas, disminuye el intercambio gaseoso y la capacidad de infiltración de agua en el suelo. Por lo tanto este es uno de los tantos fenómenos físicos responsables de la degradación de la calidad de los suelos destinados a la producción de alimentos

La compactación del suelo perjudica la fijación de plantas, afectando características propias del suelo como la disponibilidad de los nutrientes (Conte et al., 2007) y el almacenamiento de agua en el suelo, provocando una ineficiencia del uso del recurso hídrico (Serafim et al., 2008) y afectando directamente el rendimiento del cultivo (Stelluti et al., 1998). El incremento en la compactación del suelo da como resultados incrementos en la densidad aparente, deteniendo así el desarrollo radicular, la infiltración y los procesos y aireación en la matriz porosa (Jung et al., 2010). Cuando el suelo se compacta, la porosidad del suelo y otras propiedades fisicoquímicas (por ejemplo, contenido de agua, permeabilidad al aire o el agua, resistencia a la penetración, capacidad de intercambio catiónica, contenido de materia orgánica, entre otras.) y la textura (sobre todo si predominan el contenido de arcillas) se alteran, afectando el desarrollo radicular y por tanto el crecimiento del cultivo, disminuyendo la productividad (Soane & Ouwerkerk, 1994)

2.2.1 Factores de variabilidad de los suelos.

Los suelos presentan a lo largo del paisaje una gran variabilidad natural que es resultante de la interacción de los diversos factores de formación, implicados en el proceso de meteorización. Esta situación de heterogeneidad del suelo es responsable de la variación espacial de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Considerando que esta variabilidad tiene que ser consideradas en los procesos de producción agrícola, en los últimos años la llamada agricultura de precisión se ha desarrollado mucho (JOHANN et al., 2004).

El cultivo del suelo provoca modificaciones en la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, dependiendo de la intensidad del laboreo (SOUZA et al., 2004; UTSET & CID, 2001; STRECK et al., 2004).

La mayoría de los productores agrícolas consideran el suelo como uniforme a la hora del manejo, pero las propiedades del suelo son variables en el espacio y en el tiempo. Como consecuencia de estas variaciones, el uso del valor medio de una propiedad en estudio es a veces de poca utilidad, conduciendo a decisiones de manejo equivocadas (Machado 2009), principalmente cuando estas decisiones se refieren al sistema suelo-planta-atmósfera (MACEDO et al., 1998).

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo de interés agrícola, principalmente en áreas extensas puede ser relativamente elevada (SOUZA et al., 2004), necesitando un manejo localizado que considere su variabilidad, lo que favorece la reducción de los costes de producción, debido al mejor aprovechamiento de los insumos y de la maquinaria agrícola. La aplicación de un manejo diferenciado del suelo, por medio del aprovechamiento de las diferencias en los campos de cultivo, depende de un conocimiento adecuado de la variabilidad espacial de las propiedades de suelo y planta (SANTOS et al., 2003).

(Blanco 2000) y (Lowery y Morrison 2002) indican que los factores de variabilidad más importantes son: textura, estructura, porosidad, contenido de carbonato cálcico y de gravas, exposición de ladera, pendiente, cobertura herbácea, propiedades mecánicas del suelo (consistencia, adhesividad y plasticidad), contenido de agua y capacidad de retención de agua en el suelo.

2.2.2 Penetrometro y Resistencia a la penetración [RP]

La dureza del suelo puede ser medida con un penetrómetro que mide la combinación de falla tangencial, compactación y flujo plástico. El valor crítico para esta variable propuesto por (Taylor et al 1965) ha sido de 2,5 MPa, mientras que (Forsythe 1985) propuso un valor de 2.96 MPa, como indicador de restricción al desarrollo radicular a capacidad de campo, pues el porcentaje de penetración de raíces pivotantes disminuyeron drásticamente independientemente del material del suelo. (Henriquez et al 2011) evaluaron el uso de dos tipos de penetrómetro de cono con diámetros diferentes donde se encontró que el valor de RP en la superficie duplicaba el valor obtenido a los 15 cm. Ambos equipos suministran valores significativamente diferentes pero presentan una tendencia, por lo que la diferencia entre valores se explica por el diámetro del cono utilizado.

Los suelos manejados con siembra directa suelen presentar valores de resistencias a la penetración más elevados y, en algunos casos, aumento de la densidad aparente (Álvarez *et al.*, 2004; Díaz Zorita *et al.*, 2002) El maíz es uno de los cultivos más sensibles al déficit hídrico, debido a su acotado período crítico en

momentos de alta demanda atmosférica (Sadras & Calviño, 2001) Las raíces de maíz responden negativamente a la presencia de capas compactas en el subsuelo, pero no siempre con impacto sobre los rendimientos (Díaz Zorita, 2000)

2.2.3 Caracterización Física y química de los suelos compactados

Las propiedades físicas de los suelos determinan, en gran medida, la capacidad de los posibles usos, donde se consideran características como su resiliencia, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes (Rucks et al., 2004). Diferentes actores de la producción agrícola saben la importancia que tiene el conocimiento de las propiedades físicas del suelo, para entender en qué medida y cómo influyen en el desarrollo de los cultivos, de que forma la actividad humana puede llegar a modificarlas y lo más importante, mantener las mejores condiciones físicas del suelo.

Las condiciones favorables para el crecimiento radicular están asociadas a cualidades del suelo como la distribución de poros, la facilidad del movimiento del agua, además de las condiciones de formación del suelo, que le confiere una variabilidad natural a estas propiedades (Gomes et al., 2007), las cuales a pesar de estar en suelos aparentemente homogéneos, presentan alta variabilidad, afectando así el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo y la macroporosidad (Bagarello & Sgroi 2004). Las labranzas modifican las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, reportándose para la región fuertes disminuciones de los contenidos MO con los años de agricultura (Sánchez *et al.*, 1998) con suelos pobres en materia orgánica (MO) y poco estables estructuralmente, lo que incrementa el riesgo que se degraden físicamente (Sanzano *et al.*, 2005) Ello es atribuible también a la ausencia de remoción, sumado al efecto compactante derivado del pasaje de maquinarias (Botta *et al.*, 2004)

las propiedades químicas también tienen un papel importante en la caracterización y estado de los suelos El pH y la conductividad eléctrica se tienen como indicadores de calidad del suelo (Soil Quality Institute (SQI), 1999; Moral *et al.*, 2010, Lopera y López 1997), en cultivos de Aster bajo invernadero en el Oriente Antioqueño, observaron que en los primeros 0,15 m del suelo el 53,46 % de la variabilidad del pH se producía a distancias menores a 60 cm y que el 30,59 % de dicha variabilidad se presentaba a distancias mayores de 30 m. También encontraron que el 14,13 % de la variabilidad de la conductividad eléctrica se daba a menos de 0,60 m de distancia y que el 73,64 % se acumulaba a distancias mayores a 30 m.

El suelo es un recurso natural y un sistema muy complejo; que permite el sostenimiento de las actividades productivas, pero por su amplia variabilidad, es difícil establecer una sola medida física, química o biológica que refleje su calidad (Bandick y Dick, 1999)

2.4 Estadística y geoestadística en variabilidad de los suelos

Actualmente, la investigación de la variabilidad espacial en la ciencia del suelo se apoya en la geoestadística que junto con la estadística clásica conforman técnicas de extraordinaria importancia agronómica (CARVALHO et al., 2003). La geoestadística permite establecer un modelo matemático que describe la variabilidad espacial de los datos, la cual será utilizada en el proceso de estimación para los puntos que no fueron muestreados. El término geoestadística es empleado para caracterizar el estudio estadístico de un fenómeno teniendo en cuenta su localización espacial, siendo a su vez caracterizado por la distribución en el espacio de una o más variables, denominadas “variables regionalizadas” (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978).

La diferencia básica entre la estadística clásica y la geoestadística consiste en que la primera requiere valores de las muestras sin considerar su posición espacial, siendo necesario en el caso de la segunda el conocimiento de su posición espacial, al considerar que las muestras se encuentran correlacionadas (dependientes) en el espacio (STURARO, 1993). El análisis de la variabilidad espacial del suelo por medio de la geoestadística puede indicar alternativas de manejo que favorezcan la disminución de los efectos de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo sobre los cultivos.

La aplicación de las herramientas de la estadística clásica en la experimentación agrícola, utilizando pruebas de comparación entre tratamientos, está vinculada a la observación de los presupuestos básicos del análisis de varianza, tales como: independencia entre observaciones; independencia y homogeneidad entre los errores de las observaciones; aditividad de los efectos y normalidad de los residuos (ORTIZ, 2003). Por otra parte, se sabe que estas hipótesis no son corroboradas con la realidad encontrada en campo, dado que la variabilidad espacial de los suelos existe siempre y si no es considerada, puede producir evaluaciones erróneas (VIEIRA, 2000).

Autores como (Ramírez-López et al. 2008) evaluaron la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) en un Oxisol de los llanos orientales, y su relación con la densidad aparente, la densidad real, la porosidad total y los contenidos de arena, limo y arcilla, para establecer zonas donde se pueden presentar limitantes para el desarrollo de cultivos. Estos autores encontraron que

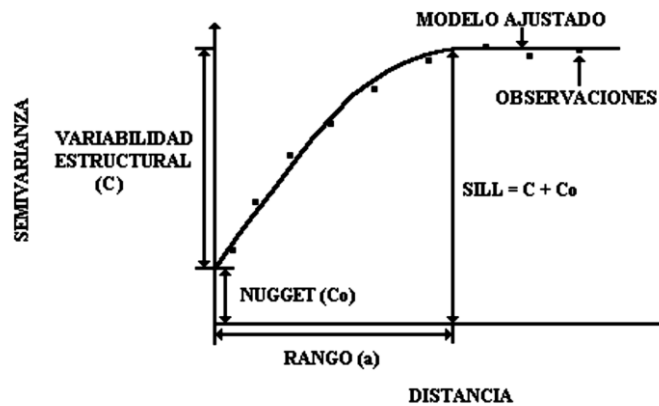
las propiedades evaluadas presentaban dependencia espacial a una profundidad entre 0 y 0.10 m, pero no a profundidades entre 0.10 y 0.20 m

Según (Orduz 2014), El grado de dependencia espacial se establece al hallar el porcentaje de la variable aleatoria (Pepita) de una variable dentro de la variabilidad total (meseta) que ella presenta. (Cambardella et al. 1994) establecieron diferentes clases de dependencia espacial, donde valores inferiores al 25% se considera como una fuerte dependencia espacial, moderada si esta entre 25-75% y débil si el valor es inferior al 75%.

Al evaluar la variabilidad como característica intrínseca de cada propiedad, su comportamiento es específico para cada condición ambiental, de suelo, de uso y de manejo. Cuando el valor que toma una propiedad en un sitio depende de la distancia y dirección en la cual se ubica con respecto a otro sitio vecino, se tiene una variable con dependencia espacial. Para el estudio de estas variables se utilizan un grupo de herramientas estadísticas conocidas como Geoestadística o Estadística espacial. (JARAMILLO, 2012).

El semivariograma representa un índice de cambio de una variable con la distancia. Su forma describe el patrón de variación espacial en términos de su magnitud y forma general. La pendiente del semivariograma indica la intensidad de cambio de la variable analizado con la distancia al mismo tiempo que el porcentaje de disminución en la dependencia espacial. La Figura 1 representa los parámetros del semivariograma, grafica que relaciona los valores promedios de la semivarianza con la distancia entre muestras en las que se realizó el estudio.

Grafica 1. Grafica parámetros del semivariograma



Fuente: Jaramillo, 2012

Advirtiendo esta variabilidad espacial puede lograr resultados que no se conseguirían si se trata el lote como un promedio. Las ZM pueden determinarse en base a mapas detallados de suelos (Franzen et al., 2000), imágenes satelitales (Kemerer, 2003) y mapas de rendimiento de cultivos (Schepers et al., 2000)

2.4 Agricultura de precisión

La Agricultura de Precisión (AP) (GIL 2008), es un concepto agronómico de gestión de lotes o parcelas agrícolas, basado en la variabilidad espacial de los factores que controlan el rendimiento de un cultivo y en la posibilidad humana de alterarlos mediante la aplicación controlada de agroquímicos. El uso de las nuevas tecnologías, como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores, monitores de rendimiento del cultivo, imágenes satelitales, y Sistemas de Información Geográfica (SIG) son incorporadas al campo. Los SIG vinculados a tareas de AP están limitados a la visualización de mapas de cosecha, cálculo del rendimiento promedio parcial o total de un lote, entre otras funcionalidades. Carecen, principalmente, de herramientas que permitan la vinculación de los datos, como por ejemplo la comparación de mapas de un mismo lote en campañas diferentes. Actualmente, ingenieros agrónomos vinculados con la AP recopilan un conjunto de datos: análisis de suelos, mapas de cosecha, datos referidos a como ha sido trabajado el campo, fertilizantes aplicados en campañas anteriores, información brindada por el dueño o encargado del campo, etc., (ARIEL & CAMPANELLA, 2009). Es necesario que el profesional a cargo de la toma de decisiones estratégicas de los tratamientos a seguir, tenga disponible toda esta información de manera integrada. Son los SIG quienes deben encargarse de esta labor permitiendo vincular datos existentes y posibilitando la extracción de nueva información. En nuestra línea de investigación proponemos Implementar las tecnologías de sistemas de información geográfica, variabilidad espacial de suelos y AP en la evaluación de procesos de compactación de suelos agrícolas.

2.4.1 Generalidades

Existen distintas definiciones de lo que se entiende por AP, entre ellas:

- Es una estrategia de manejo que utiliza la tecnología de la información para captar datos de múltiples fuentes para generar decisiones asociadas a la producción de cultivos (US National Research Council, 1997).

- Es un sistema de producción que se basa en la integración de la información y la producción. Está diseñado para sitios específicos y la unidad completa de producción, a objeto de incrementar en el largo plazo, la eficiencia, productividad y margen de ganancia, minimizando los indeseados impactos sobre el ambiente (US Farm Bill,1996).
- La AP comprende la observación, el establecimiento del impacto y la respuesta estratégica a tiempo al nivel de detalle requerido en cuanto a los componentes determinantes del proceso de producción agrícola (ACPA, 2005).
- Está referida al uso de las llamadas Tecnologías de Información para la toma de decisiones de manejo técnica, económica y ambientalmente adecuadas (Centro de Agricultura de Precisión-Universidad Católica de Chile)
- Una derivación del concepto de AP es el Sistema de Producción Preciso (Precision Farming -PF), que significa la captura y control de la información agronómica para satisfacer las necesidades de lotes individuales, en lugar de las necesidades promedio de todos los lotes (Doerge, 2000)
- No obstante, la definición más entendible y ajustada a su fundamento filosófico fue establecida por el Centro de Agricultura de Precisión de la Universidad de Purdue, la AP significa “hacer lo adecuado, en el momento indicado y en el sitio correcto”. Es importante puntualizar que debido a la diversidad de los agroecosistemas, la AP varía de acuerdo con el cultivo, la condición agroecológica y el sistema de producción (US National Research Council, 1997).

En este caso y en resumen La AP consiste en una tecnología que se basa en obtener datos georreferenciados de los lotes para lograr un mayor conocimiento de los factores que contribuyen a la variabilidad que se presenta a nivel de lote y así delimitar Zonas de Manejo (ZM) (Anselin, Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004) Éstas han sido definidas como subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación homogénea de factores determinantes del rendimiento y a la cual le resulta apropiada una dosis única de insumos (Doerge et al, 1999).

La variabilidad intra lotes de los cultivos es un fenómeno conocido por los productores. El desarrollo de nuevas tecnologías, como los sistemas de información geográfica (SIG), GPS y monitores de cosecha, entre otros, permiten

la obtención de información detallada del desarrollo y rendimiento de los cultivos. Los procesos y atributos que influyen sobre el desempeño de los cultivos varían en el espacio y tiempo. Su magnitud y estructura espacial es específica para cada lote y su cuantificación es necesaria para la aplicación del manejo sitio-específico de cultivos (MSEC) (ALESSO, 2012.)

2.4.2 Componentes de la agricultura de precisión

Los componentes de la AP (ACPA, 2005) están referidos a:

- La captura de los datos a una escala y con una frecuencia apropiada. La captura está referida al muestreo, donde ya no sólo se considera a los parámetros característicos (suelo, cultivo, plagas, etc.) sino también nuevos elementos, entre ellos la ubicación y el monitoreo espacial del rendimiento; incluyendo nuevas técnicas de muestreo donde los sensores juegan un papel importante.
- La interpretación y análisis de los datos. En esta etapa son fundamentales los sistemas de información geográfica, los programas de procesamiento, los sistemas de soporte a las decisiones, los modelos de simulación, así como el desarrollo de nuevos modelos de experimentación a nivel de campo, ya que las nuevas parcelas experimentales son los campos de los agricultores en toda su extensión.
- La implementación de la respuesta de manejo a la escala y tiempo apropiados. En esta etapa es importante el desarrollo de las denominadas tecnologías tasa de aplicación diferencial o de dosis variables (TDV), que corresponden al manejo específico al sitio, entre ellos están la fertilización, el control de malezas, insectos y enfermedades, la aplicación variable de plaguicidas y la aplicación de dosis variables de semilla de acuerdo al potencial productivo del suelo.

Para la implementación de prácticas de AP, unido a las metodologías tradicionales de muestreo, análisis e interpretación, existen tres tecnologías, o grupos de ellas, que son clave:

- Sistemas de posicionamiento global (GPS): permiten la localización instantánea (latitud, longitud) dentro de un sitio o lote de producción. Normalmente, y partir de la eliminación de la disponibilidad selectiva, los sistemas de GPS han alcanzado alcanzan una mayor exactitud, pero aún

existen errores en las mediciones, por ello deben usarse equipos GPS con corrección diferencial (DGPS).

- Sistemas de información geográfica (SIG): permiten la integración espacial, el manejo y análisis de la información recolectada.
- Sensores, equipos y maquinaria especializada: permiten la recolección de la información en terreno y la aplicación variable de insumos.

2.4.3 Sistemas de Información Geográfica

Se entiende por "Sistema de Información" la conjunción de información con herramientas informáticas, es decir, con programas informáticos o software. Si el objeto concreto de un sistema de información (información+software) es la obtención de datos relacionados con el espacio físico, entonces estaremos hablando de un Sistema de Información Geográfica o SIG (GIS en su acrónimo inglés, *Geographic Information Systems*).

Así pues, un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones.

La tecnología de los SIG (Sistemas de Información Geográfica) está basada en componentes de hardware y software que permite el análisis e integración de información geográfica, permitiendo visualizar los datos obtenidos en un mapa (Zarzosa 2002). Los SIG integran la información a través de capas o coberturas de datos georreferenciados que se van superponiendo. De la integración por superposición se obtienen mapas temáticos. El uso de los SIG en la actualidad es muy variado. Se utilizan para la producción cartográfica, evaluaciones ambientales y de recursos naturales, estudio y evaluación de redes de servicios y transportes, sistemas de catastro, etc. Para el caso de la agricultura, los SIG brindan la

posibilidad de obtener un mapa digital del campo y al mismo tiempo la interacción con el mismo. Un ingeniero agrónomo podría determinar los puntos exactos para la realización de las extracciones de muestras de suelo para un posterior análisis. También La maquinaria agrícola moderna está equipada con la tecnología que permite la extracción de una gran cantidad de capas de información de cada sector o lote del campo. Una de estas capas son los “mapas de rendimiento”. Un mapa de rendimiento puede definirse como un modelo digital del lote conformado por un conjunto de puntos de mapeo registrados durante la cosecha del lote. Cada uno de estos puntos posee un conjunto de atributos tales como la humedad del suelo, rendimiento en quintales, etc.

En esta línea de investigación se ha utilizado el SIG ArcView 10 de la empresa ESRI (Zarzosa 2002). Se optó por este SIG en un primer momento debido a su alto rendimiento, liderazgo en el mercado y además, por ser altamente configurable y extensible lo cual permite un mejor análisis para la toma de decisiones.

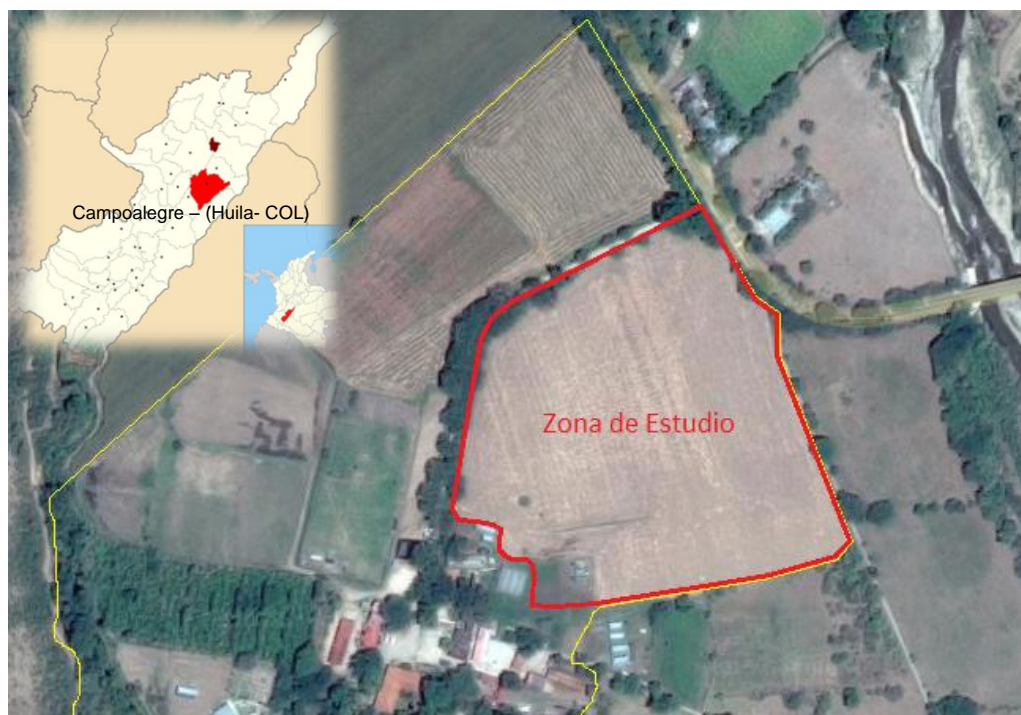
3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Ubicación general de la zona de estudio

El estudio fue desarrollado en el centro de formación agroindustrial La Angostura-SENA, Ubicado en el kilómetro 38 vía al sur de Neiva (Huila) en la Vereda Llano sur del Municipio de Campoalegre, Huila – Colombia, ($2^{\circ} 36' 55''$ N de latitud Norte, $75^{\circ} 21' 33''$ O de longitud oeste) altitud de 600 msnm, sus instalaciones y ambientes de Aprendizaje funcionan en la Antigua Hacienda Ganadera denominada La Angostura, con 250 Hectáreas disponibles para la formación en los sectores: Agrícola, Pecuaria, piscícola y agroindustrial.

Sector de baja humedad, con precipitaciones promedias entre 50mm y 1000 mm anuales, su temperatura promedio es de 26.5° C; en esta región, los meses de agosto y septiembre son los más cálidos, y los de noviembre y diciembre más frescos, aunque la diferencia no pasa de 20° C, corresponden a la zona de vida bosque seco tropical (bs-T). Tierra de influencia aluvial dado sus cercanía al Rio Neiva, casi en su totalidad su relieve es plano y de pendiente suave, El suelo en su taxonomía es un inceptisol - type ustifluvents, suelos de textura arenoso franco y franco arenoso que drenan bien o moderadamente bien, mostrando un color marrón 7.5 YR 4/3.5 en húmedo; 7.5 YR 6/3 en seco en la capa arable del suelo, otros desarrollados a partir de materiales como cascajo, gravillas y pedregones, localizados a diferentes profundidades.

Figura 1. Ubicación general del área de estudio



3.2 Diseño experimental

Se realizó el diseño en una superficie aproximada de 6,4 ha, de las cuales 4,4 ha sido dedicadas a cultivos semestrales especialmente cereales y 2 ha en campo erial, juntas áreas proyectadas y calculadas en el sistema de referencia magna Colombia Bogotá y georreferenciadas previamente con GPS. En el total del área de estudio se estableció una distribución espacial de puntos regulares de 35 m por 35 m compuesta por 54 puntos de muestreo (Figura 2). Todo esto mediante la extensión gratuita *Geospatial Modelling Environment* para software gis.

Figura 2. Distribución de puntos de muestreo en la zona de estudio



Fuente: Imágenes Google maps (2015)

Antes de realizar la labor en campo se calibraron los equipos haciendo medidas aleatorias (Figura 3), se necesitó elaborar estacas en guadua, con el fin de demarcar primeramente los puntos de muestreo. Para esto se generó el diseño de distribución de puntos, queriendo hacer un estudio detallado de la zona, y tratando de superar los 50 para un mejor análisis detallado geoestadístico kriging, de la cual se obtiene base data de coordenadas planas Gauss krüger del mismo y se

transforman a elipsoidales con el objetivo de precisar cada lugar usando el GPS HandHeld Nautiz X7 y poder demarcar.

Figura 3. Prueba y calibración del equipo



Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso de diseño y para comenzar mediciones y muestras de campo se realizó procesos de laboreo mínimo conservando los residuos pequeños de las plantas en la superficie de la tierra para el control de la erosión y la conservación de la humedad, luego se hizo quema y laboreo en caballones siguiendo líneas de contorno y una ligera pendiente para riego.

Figura 4. Lote estudio sometido a riego



Fuente: Elaboración propia

El terreno a estudiar se sometió a constante riego debido a su contenido de arenas (Figura 4), por lo cual se hizo indispensable planificar un organigrama para la toma de muestras y mediciones, ya que es de vital importancia realizarlas a capacidad de campo (CC), es decir alrededor de 24 a 48 horas después del riego para tener certeza de los datos adquiridos.

3.3 Medición y toma de muestras en campo

Se situó mediante GPS los puntos con coordenadas anteriormente obtenidas, se utiliza estacas en guadua de 50 cm, se demarcaron los respectivos puntos a capacidad de campo (Figura 5), en cada punto se realizaron lecturas de RP hasta 30 cm de profundidad, mediante la utilización de Penetrometro digital FieldScout SC 900 Soil Compaction Meter de punta cónica de 12,7 mm de base, que se conecta a cualquier receptor GPS, en esa ocasión un garmin 72H y con opción de salida en serie (Figura 6), sensor de profundidad ultrasónica que llevaron a cabo capturas de lecturas de RP cada 2,5 cm y equipado con puerto registrador de datos interno para luego poder descargar los datos en una PC.

Figura 5. Estacas en guadua demarcación de muestreo



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Lecturas de RP Penetrometro digital FieldScout SC 900



Fuente: Elaboración propia

En el mismo punto de medición de RP se tomaron muestras para determinación del contenido en porcentaje de humedad volumétrica a 0,20 m de profundidad, se usó un medidor de humedad en el suelo (*soil moisture measurement*) insitu, sensor ML2x con rango de 0 to 1.0 m³.m⁻³ (Figura 7), también se extraen muestras de suelo empleando barreno edelman y almacenando en bolsas selladas ziploc (Figura 8), se busca no alterarlas mucho, para luego ser llevadas y analizadas a laboratorio, todo con el fin de obtener datos de las demás variables de estudio (Textura, Retención de humedad a CC y PMP, pH Y CE).

Figura 7. Toma de lecturas de Humedad volumétrica insitu



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Extracción y almacenado de muestras de suelo



Fuente: Elaboración propia

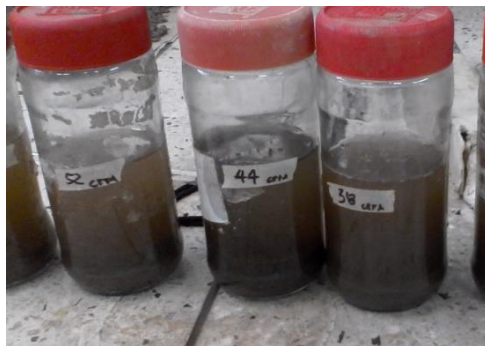
3.4 Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo obtenidas en campo, se analizaron y procesaron en el laboratorio apoyo de LABGAA (Lab. de Suelos Universidad Surcolombiana) y laboratorio SENA – CEFA centro de formación agroindustrial la Angostura.

Textura

Utilizando el método densimétrico por bouyoucos, se realiza el análisis textural de muestras del suelo, primeramente se secan las mismas durante 24 aproximadamente a 33°C , luego de observar que todas las 54 muestras alteradas estuvieran secas se pasó a ser tamizadas, para ello el tamiz de malla #200 o de 2mm fue utilizado, siguiente a esto se tomaron 50 gr de cada muestra y se les proporciono agua y 10ml del agente dispersante hexametáfosfato de sodio en recipientes de vidrio sellados (Figura 9) y durante 2 horas siendo agitados en agitador a vaivén.

Figura 9. Recipientes contenidos de suelo, agua y agente dispersante



Fuente: Elaboración propia

Transcurrido el tiempo se depositaron las muestras, agitadas y reposadas respectivamente, usando los cilindros de sedimentación de 1000ml (Figura 10) tomando lectura de hidrómetro a los 40 s y 2 h corrigiendo lecturas de temperatura en °C con la ayuda de la tabla del manual de prácticas del curso ciencia del suelo en la facultad de agronomía, de Martha C. Henao de la universidad nacional de Colombia,, seguidamente y mediante las ecuaciones mostradas a continuación fueron hallados los porcentajes de arena arcilla y limo.

$$ARENA\ TOTAL\ (\%) = 100 - \frac{lectura\ 40\ s\ corregida}{masa\ de\ suelo\ (g)} * 100\ Ec(1)$$

$$ARCILLA\ TOTAL\ (\%) = \frac{lectura\ 2h\ corregida}{masa\ de\ suelo\ (g)} * 100\ Ec(2)$$

$$LIMO\ TOTAL\ (\%) = 100 - (arena\ total\ (\%) + arcilla\ total(\%))\ Ec(3)$$

Figura 10. Cilindros de sedimentación - Lectura de hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Retención de humedad

Se tomaron las muestras de suelo y se llenaron los anillos a tope (Figura 11), luego estas fueron saturadas de agua en los platos porosos durante 24 horas y se retiró el exceso de agua y de arena fuera de los anillos con mucha precaución, usando la olla y membrana de presión, se aplicó una presión de 0.3 bar y 15 bar respectivamente por un periodo de 3 días verificando que ya no había evacuación de agua.

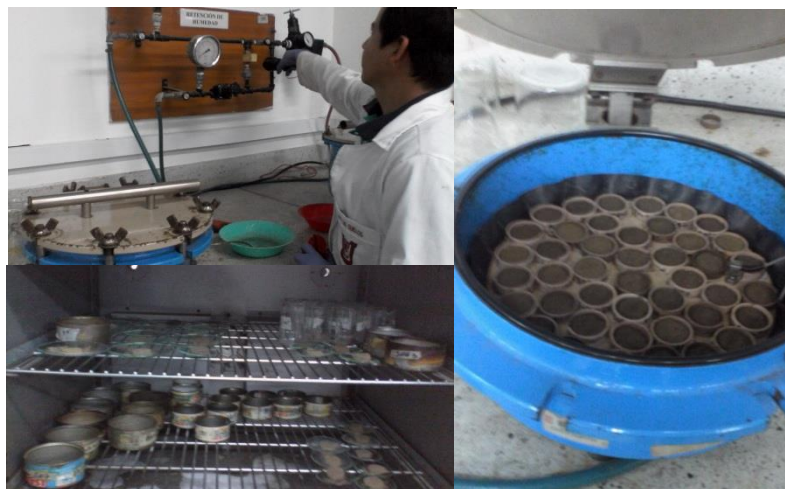
Figura 11. Muestras de suelo en saturación, plato poroso de 0.3 y 15 bar



Fuente: Elaboración propia

Después de este tiempo, se quitó la presión de la línea de aire comprimido, se retiró las muestras de la olla y de la membrana, luego siendo pesadas en la balanza analítica obteniendo el peso húmedo y metiendo al horno seguidamente, (Figura 12).

Figura 12. Presión liberada, Muestras retiradas pesadas y secadas



Fuente: Elaboración propia

Una vez cumplido 24 Horas de colocadas las muestras en el horno, se sacaron y pesaron para obtener el peso del suelo seco.

Reacción del suelo (pH)

Se determinó potenciométricamente, las muestras se prepararon a saturación relación suelo/agua destilada 1:1, fueron agitadas 20 minutos y reposadas media hora para luego ser analizadas en phmetro thermo scientific Orion 4-star plus ph/ise.

Conductividad eléctrica del suelo (CE)

Se realiza mediante la ayuda de un multiparametro, o Medidor PCD 650 de pH/Conductividad/ Oxígeno Disuelto, pero el cual solo se usó para este análisis de CE, Primeramente calibrando el equipo y siguiente a eso utilizando una relación 1:1 de muestra cada suelo y agua destilada, agitando durante 10 minutos, luego introduciendo el electrodo y tomando el dato.

3.5 Procesamiento de datos

Después de tener los datos obtenidos en campo y en laboratorio a la mano, fueron debidamente organizados digitalmente, para luego ser estudiados, considerados y comparados.

3.5.1 Análisis estadístico

Como primer filtro se comprobó si los datos, tanto los tomados en campo como los de laboratorio tienden a una distribución normal.

Para los datos de RP que fueron en total 12 por cada punto, se tomaron solo 6 profundidades representativas para los análisis, estas aumentadas cada 2,5 cm desde 0,0 cm hasta 30 cm. Para cada profundidad se realizó un análisis de medidas de tendencia central la cual incluye (media, mediana, mínimo, máximo), de variación (desviación estándar y coeficiente de variación) y de forma (asimetría y curtosis). También se realizó correlación de Pearson para asociar algunas propiedades con la RP como indicador principal de compactación.

3.5.2 Obtención de del semivariograma y mapas Kriging

Teniendo ya datos aproximados a una distribución normal se realiza el análisis geoestadístico, a partir de los modelos de semivariograma generados en el programa CS+ fueron estudiados para realizar el mejor ajuste, y que como resultado expresaron dependencia espacial, definido como la relación entre el

efecto pepita y la meseta (C/Co+C) y que es clasificado por Cambardella et al. (1994) y citado también por Mogollón (2012) como fuerte si se encuentra por encima del 75% moderado si esta entre 75% y el 25 % y débil si es inferior al 25 %.

Durante el mismo procedimiento y usando el software Arcgis 10, se realiza la interpolación por el método de kriging ordinario, la cual mediante predicciones genera valores en zonas no muestreadas, permitiendo analizar casi en totalidad el área de estudio.

4. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultado de análisis estadístico y geoestadístico

4.1.1 Estadística en la RP y algunas propiedades de estudio

Como primera medida se analizaron los resultados de RP mediante estadística descriptiva, realizando un resumen estadístico (Tabla 1), y validando los datos observando que obtuvieran una tendencia normal.

Tabla 1. Resumen estadístico para valores de RP (Mpa) a diferentes profundidades

	RP (5 cm)	RP (10 cm)	RP (15 cm)	RP (20 cm)	RP (25 cm)	RP (30 cm)
Recuento	54	54	54	54	54	54
Promedio	0,817	1,265	2,090	2,712	2,984	3,078
Mediana	0,351	0,746	1,611	2,456	2,994	2,945
Desviación Estándar	0,9173	1,1239	1,1704	0,8445	0,8288	0,6222
Coefficiente de Variación (%)	112,24	88,80	55,98	31,13	27,77	20,22
Mínimo	0,067	0,223	0,702	1,245	1,309	1,755
Máximo	3,045	3,843	4	4	4,318	4
Rango	2,978	3,620	3,398	2,755	3,009	2,245
Sesgo Estandarizado	3,7141	2,5622	2,4627	1,0018	-0,7494	0,4675
Curtosis Estandarizada	0,2180	-1,2511	-1,3523	-1,4995	-1,4266	-1,2041

Se tienen resultados de medias, desviación estándar, CV, sesgo y curtosis. Siendo estas como las más a tener en cuenta para identificar una normalidad en el comportamiento de los datos, (Gomes 1987) permite clasificar el coeficiente de variación (CV), con rangos para evaluar la variabilidad de los datos como baja $\leq 10\%$; media entre 10-20%; alta entre 20-30% y muy alta $\geq 30\%$, en esta ocasión los datos arrojan una muy alta variabilidad de los datos para profundidades que van de un rango de cero a veinte centímetros (0-20 cm); y una variabilidad alta para valores que oscilan en el rango de veinte a treinta centímetros de profundidad (20-30 cm), por otra parte el sesgo para el rango de profundidades (0-15 cm)

muestra valores mayores a +2, ya que los valores de sesgo estandarizado y curtosis estandarizada pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal, valores estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, demostrando por siguiente que los valores de RP a estas profundidades no tienden a ello; sin embargo, al observar que la curtosis si se encuentra dentro del rango aceptable, fue necesario realizar el grafico de probabilidad normal para estas profundidades y verificar que solo pocos puntos estaban fuera de proximidad a lo largo de la línea recta de la gráfica indicando que si provienen de una buena distribución y no hay desviaciones significativas de la normalidad.

La explicación a que se genere esta variabilidad tan alta para valores de RP, es resultado que estos son tomados de la capa arable del suelo, y que ahí son más susceptibles a variar por apisonamiento o condiciones innatas de formación del suelo, además de datos atípicos de resistencia a la penetración en la zona erial del predio que superan los 3 Mpa en los primeros 10 cm de profundidad, y que por ende generan esta variabilidad con respecto al total de datos en toda la zona de estudio.

Tabla 2. Estadística descriptiva de algunas propiedades físicas y químicas en la zona de estudio

	%Arena	%Arcilla	%Limo	Ad %	Hv%	CE (dS/m)	pH
Recuento	54	54	54	54	54	54	54
Promedio	74,607	11,290	12,439	13,673	19,223	0,126	6,276
Mediana	74,560	11,080	13,32	12,969	21,20	0,125	6,350
Desviación Estándar	3,611	1,381	3,103	2,863	6,989	0,019	0,482
Coefficiente de Variación (%)	4,84	12,24	24,94	20,93	36,36	15,03	7,69
Mínimo	68,2	9,08	6,16	7,725	6,6	0,094	5,3
Máximo	83,76	14,88	17,36	20,97	34,1	0,172	7,2
Rango	15,56	5,8	11,2	13,25	27,5	0,077	1,9
Sesgo Estandarizado	1,830	1,282	-1,677	1,522	-1,580	1,068	-0,312
Curtosis Estandarizada	0,253	0,167	-1,082	-0,070	-0,684	-0,815	-0,844

Hv: Humedad volumétrica; Ad: Agua disponible; CE: Conductividad eléctrica.

La tabla 2. Muestra los estadísticos de resumen para siete propiedades o variables estudiadas en el área de estudio, incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal, ya que para todos los casos se encuentran dentro del rango esperado de -2 a +2 se puede decir que no indican desviaciones significativas a la normalidad.

Al observar el coeficiente de variación se encuentra variabilidad baja para los datos de pH y %arena; media para CE y %arcilla; alta para Ad y %limo; muy alta para %Hv. Para todos los casos se realizaron intervalos de confianza del 95 % para la media y desviación estándar con el fin de establecer que los datos de estos sean verídicos.

4.1.2 Análisis geoestadístico y de variabilidad espacial

4.1.2.1 Variabilidad espacial de RP a diferentes profundidades

Se realizó un análisis geoestadístico de los datos de resistencia a la penetración como indicador de compactación del suelo, en la tabla 3 se muestran los resultados de semivariograma generado para las 6 profundidades de datos almacenados, 5-10-15-20-25-30 cm, en los cuales mediante diferentes parámetros, se ajustó y determinó el mejor modelo acorde a los datos.

Tabla 3. Resultados semivariograma isotrópico para valores de RP (Mpa) a diferentes profundidades

	Modelo	C _o	C _o +C	C/C _o +C	Rango (m)	R ²	GDE (%)	RMSE
Rp (5 cm)	Gaussiano	0,1040	1,061	0,902	220,32	0,998	90,2	0,4032
Rp (10 cm)	Gaussiano	0,2000	1,747	0,886	252,53	0,995	88,6	0,4532
Rp (15 cm)	Exponencial	0,0010	1,923	0,999	348,30	0,997	99,9	0,4020
Rp (20 cm)	Exponencial	0,1240	1,367	0,909	623,70	0,969	90,9	0,5110
Rp (25 cm)	Exponencial	0,0580	0,860	0,933	231,90	0,974	93,3	0,4810
Rp (30 cm)	Exponencial	0,0130	0,417	0,969	184,50	0,994	96,9	0,4134

C_o = pepita-nugget; C_o+C = meseta- Sill; C/C_o+C = dependencia espacial; R²: coef. de determinación; GDE%: grado de dependencia espacial en porcentaje; RMSE: error de raíz cuadrada media.

Se pudo encontrar que en general el R^2 no está por debajo de un valor 0,97 y es casi cercano a 1 lo cual indica un ajuste casi perfecto de los datos al modelo inducido, los valores de RMSE no sobrepasan los 0,52 lo que es indicador también de un buen ajuste entre los valores observados y predichos, ya que valores más cercanos a cero indican un mejor ajuste. El rango mínimo es de 184,5 para el caso de Rp a 30 cm de profundidad, lo cual indica que valores fuera de este son independientes espacialmente, el grado de dependencia espacial GDE está por encima de 88,6 % el cual indica una dependencia fuerte en todos los datos de diferentes profundidades de Rp.

4.1.2.2 Variabilidad espacial de RP y otras propiedades

Tabla 4. Resultados semivariograma isotrópico propiedades a 30 cm de profundidad

Prof. 30(cm)	Modelo	C_0	C_0+C	C/C_0+C	Rango (m)	R^2	GDE (%)
Rp	Exponencial	0,0130	0,417	0,969	184,50	0,994	96,9
%Arena	Exponencial	2,0800	14,72	0,859	199,50	0,996	85,9
%Arcilla	Exponencial	0,2910	2,182	0,867	120,90	0,983	86,7
%Limo	Esférico	3,5600	9,068	0,607	134,20	0,995	60,7
Ad %	Esférico	2,2000	8,563	0,743	118,40	0,998	74,3
Hv%	Gaussiano	20,800	72,60	0,713	294,44	0,955	71,3
CE (dS/m)	Exponencial	3E-5	37E-4	0,917	119,40	0,970	91,7
pH	Exponencial	0,0039	0,229	0,983	79,50	0,993	98,3

C_0 =pepita-nugget; C_0+C = meseta- Sill; C/C_0+C =dependencia espacial; R^2 :coef. de determinación;GDE%:grado de dependencia espacial en porcentaje.

Los semivariograma en la tabla 3, arrojan datos que significan un buen ajuste para la mayoría de variables, el R^2 no es menor a 0,95 y el grado de dependencia espacial es fuerte en el peor de los casos con un valor de 60,7, el rango menor de dependencia espacial es de 79,5 m.

Las propiedades evaluadas muestran estructura espacial que detecta por medio del semivariograma, el modelo que mejor se ajusta para el mayor de los casos a esta profundidad es el exponencial, con RMSE de 0,41 para RP a 30 cm y valores de R^2 mayores a 0,97 en estos y con un grado de dependencia espacial mayor a 87,7 % lo que indica una fuerte dependencia de los datos, y que al igual que mogollon y medina et al 20 reportan predominio de este modelo evaluando la

misma región, el modelo exponencial tiene la bondad que representa muy bien la continuidad espacial, Gallardo (2006).

4.1.3 Relación de la RP como indicador de compactación con otras propiedades Físicas y químicas

A continuación se muestra los resultados del coeficiente de correlación de Pearson, esta es una medida de relación lineal entre dos variables cuantitativas. En esta ocasión se realizó para identificar la relación entre todas las variables a profundidades de 0.2 y 0.3 m.

Tabla 5. Resultados correlación de Pearson a 20 cm de profundidad

	RP (Prof.20cm)	%arcilla	%arena	%limo	Ad %	CE (dS/m)	Hv%	pH
RP (Prof 20cm)		<u>-0,159</u>	<u>-0,007</u>	<u>0,090</u>	<u>0,320*</u>	<u>0,414*</u>	<u>-0,752*</u>	<u>-0,026</u>
Valor-P		0,250	0,957	0,513	0,018	0,001	0,000	0,847
%arcilla	<u>-0,159</u>		<u>-0,630*</u>	<u>0,269*</u>	<u>0,220</u>	<u>0,125</u>	<u>0,161</u>	<u>0,341*</u>
Valor-P	0,250		0,000	0,049	0,109	0,364	0,242	0,011
%arena	<u>-0,007</u>	<u>-0,630*</u>		<u>-0,917*</u>	<u>-0,546*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,174</u>	<u>-0,242</u>
Valor-P	0,957	0,000		0,000	0,000	0,027	0,206	0,077
%limo	<u>0,090</u>	<u>0,269*</u>	<u>-0,917*</u>		<u>0,564*</u>	<u>0,306*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,125</u>
Valor-P	0,513	0,049	0,000		0,000	0,024	0,027	0,364
Ad %	<u>0,320*</u>	<u>0,220</u>	<u>-0,546*</u>	<u>0,564*</u>		<u>0,488*</u>	<u>-0,478*</u>	<u>0,305*</u>
Valor-P	0,018	0,109	0,000	0,000		0,000	0,000	0,024
CE (dS/m)	<u>0,414*</u>	<u>0,125</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,306*</u>	<u>0,488*</u>		<u>-0,385*</u>	<u>0,155</u>
Valor-P	0,001	0,364	0,027	0,024	0,000		0,004	0,262
Hv%	<u>-0,752*</u>	<u>0,161</u>	<u>0,174</u>	<u>-0,299*</u>	<u>-0,478*</u>	<u>-0,385*</u>		<u>-0,015</u>
Valor-P	0,000	0,242	0,206	0,027	0,000	0,004		0,914
pH	<u>-0,026</u>	<u>0,341*</u>	<u>-0,242</u>	<u>0,125</u>	<u>0,305*</u>	<u>0,155</u>	<u>-0,015</u>	
Valor-P	0,847	0,011	0,077	0,364	0,024	0,262	0,914	

Valor subrayado: Coef. de correlación; (*)= correlaciones significativas diferente de cero con NC 95%

Esta tabla muestra las correlaciones momento producto de Person, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1 y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. El número de pares utilizados para calcular cada coeficiente es de 54 datos correspondientes al muestreo, el segundo número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P debajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95 %. También cabe resaltar que valores positivos o negativos del coeficiente indican una correlación negativa o una positiva del mismo par y que las más cercanas a 1 o -1 indican una correlación perfecta.

De estas relaciones se quieren resaltar la resistencia a la penetración (Rp) y la humedad volumétrica (Hv) que tienen una fuerte relación lineal negativa, con un valor -0,752 lo cual confirma estudios citados y discutidos por Benghough et al. (2001) y Veronese Junior et al. (2006), que indican que las relaciones inversas entre Rp y contenido de humedad y los cuales señalan que los valores de Rp serán más bajas a medida que la humedad presente en el suelo aumente.

Tabla 6. Resultados correlación de Pearson a 30 cm de profundidad

	RP (Prof.30cm)	%arena	%arcilla	%limo	Ad %	CE (dS/m)	Hv%	pH
RP (Prof 30cm)		<u>-0,044</u>	<u>-0,035</u>	<u>0,072</u>	<u>0,279*</u>	<u>0,368*</u>	<u>-0,669*</u>	<u>0,027</u>
Valor-P		0,751	0,800	0,601	0,040	0,006	0,000	0,845
%arena	<u>-0,044</u>		<u>-0,630*</u>	<u>-0,917*</u>	<u>-0,546*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,174</u>	<u>-0,242</u>
Valor-P	0,751		0,000	0,000	0,000	0,027	0,206	0,077
%arcilla	<u>-0,035</u>	<u>-0,630*</u>		<u>0,269*</u>	<u>0,220</u>	<u>0,125</u>	<u>0,161</u>	<u>0,341*</u>
Valor-P	0,800	0,000		0,049	0,109	0,364	0,242	0,011
%limo	<u>0,072</u>	<u>-0,917*</u>	<u>0,269*</u>		<u>0,564*</u>	<u>0,306*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,125</u>
Valor-P	0,601	0,000	0,049		0,000	0,024	0,027	0,364
Ad %	<u>0,279*</u>	<u>-0,546*</u>	<u>0,220</u>	<u>0,564*</u>		<u>0,488*</u>	<u>-0,478*</u>	<u>0,305*</u>
Valor-P	0,040	0,000	0,109	0,000		0,000	0,000	0,024
CE (dS/m)	<u>0,368*</u>	<u>-0,299*</u>	<u>0,125</u>	<u>0,306*</u>	<u>0,488*</u>		<u>-0,385*</u>	<u>0,155</u>
Valor-P	0,006	0,027	0,364	0,024	0,000		0,004	0,262
Hv%	<u>-0,669*</u>	<u>0,174</u>	<u>0,161</u>	<u>-0,299*</u>	<u>-0,478*</u>	<u>-0,385*</u>		<u>-0,015</u>
Valor-P	0,000	0,206	0,242	0,027	0,000	0,004		0,914
pH	<u>0,027</u>	<u>-0,242</u>	<u>0,341*</u>	<u>0,125</u>	<u>0,305*</u>	<u>0,155</u>	<u>-0,015</u>	
Valor-P	0,845	0,077	0,011	0,364	0,024	0,262	0,914	

Valor subrayado: Coef. de correlación; (*)= correlaciones significativas diferente de cero con NC 95%

Al igual que la tabla 5 en esta se muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. el segundo número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

Los siguientes pares de variables que se identifican con un (*), tienen valores-P por debajo de 0,05:

- ✓ RP Mpa (Prof 200 mm) y AD %

- ✓ RP Mpa (Prof 200 mm) y CE (dS/m)
- ✓ RP Mpa (Prof 200 mm) y HV%
- ✓ %arcilla y %arena
- ✓ %arcilla y %limo
- ✓ %arcilla y PH
- ✓ %arena y %limo
- ✓ %arena y AD % (CRDAD)
- ✓ %arena y CE (dS/m)
- ✓ %limo y AD % (CRDAD)
- ✓ %limo y CE (dS/m)
- ✓ %limo y HV%
- ✓ AD % (CRDAD) y CE (dS/m)
- ✓ AD % (CRDAD) y HV%
- ✓ AD % (CRDAD) y PH
- ✓ CE (dS/m) y HV%

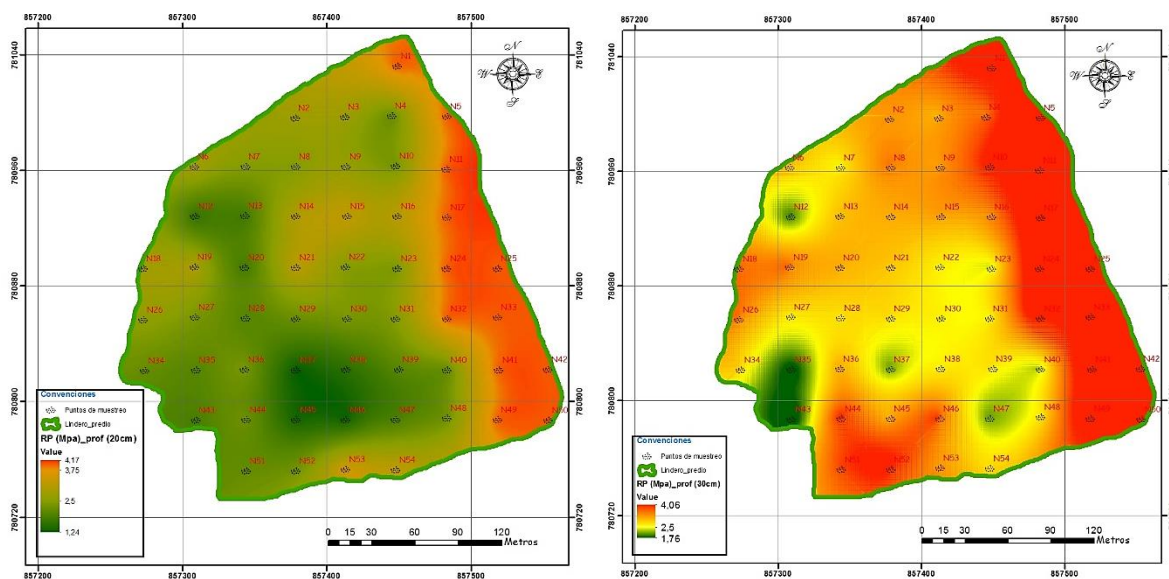
Estos pares de correlaciones repercuten para las dos profundidades de 20 y 30 cm, lo cual indica uniformidad y poca variabilidad de las correlaciones a medida de que la profundidad aumenta o disminuya, también al igual que en la tabla 5 a profundidad de 30 cm hay una correlación inversa o negativa fuerte entre la Rp y la Hv, y para porcentajes texturales especialmente entre relación arena –arcilla y arena – limo.

La correlación de agua disponible y porcentajes de clases texturales tales como arena y limo son importantes a resaltar, en el caso Ad-%arena es una correlación positiva significativa y en lo contrario Ad-%limo siendo negativa pero con un valor muy similar, lo cual lleva a deducir que debido a el contenido de macroporos en las arenas y microporos en los limos el Ad aumenta o disminuye directa o indirectamente proporcional.

4.1.4 Mapas Kriging

Se obtuvieron mapas de interpolación y predicción kriging ordinario utilizando los sistemas de información geográfica y software gis, a partir de los modelos mejor ajustados usando semivariograma. Los mapas kriging generados en contorno fueron exportados a tipo raster permitiendo una mejor visualización e identificación de zonas para los valores de RP y demás propiedades relacionadas.

Figura 13. Mapas raster de interpolación Kriging para la variable Rp (Mpa) a prof. de 20 y 30 cm.



Fuente: Elaboración propia

En los mapas de interpolación kriging para profundidades de 0.2 y 0.3 m se puede observar el aumento de la Rp como indicador de compactación en transición de una profundidad a otra, observamos que se diferencian 3 colores en los mapas para identificar zonas importantes, la zona intermedia de valores Rp de 2,5 Mpa es la ha tomar encuentra ya que según Taylor et al, y Forsythe reportan valores de Rp por encima de 2,5 Mpa como indicador de restricción en el crecimiento radicular de las plantas. Por otra parte, la capacidad que tiene de la raíz para encontrar algún espacio para poder desarrollarse en el suelo y no hallarlo limita el crecimiento de la planta. Estas limitantes debido a condiciones de compactación a profundidades del suelo sobre el piso de arado, combinado con altas fluctuaciones del contenido de agua y temperatura del horizonte superficial del suelo, puede resultar en una mayor vulnerabilidad del cultivo a la aireación y a un stress de humedad o nutrimentos (Materchera *et al.*, 1993).

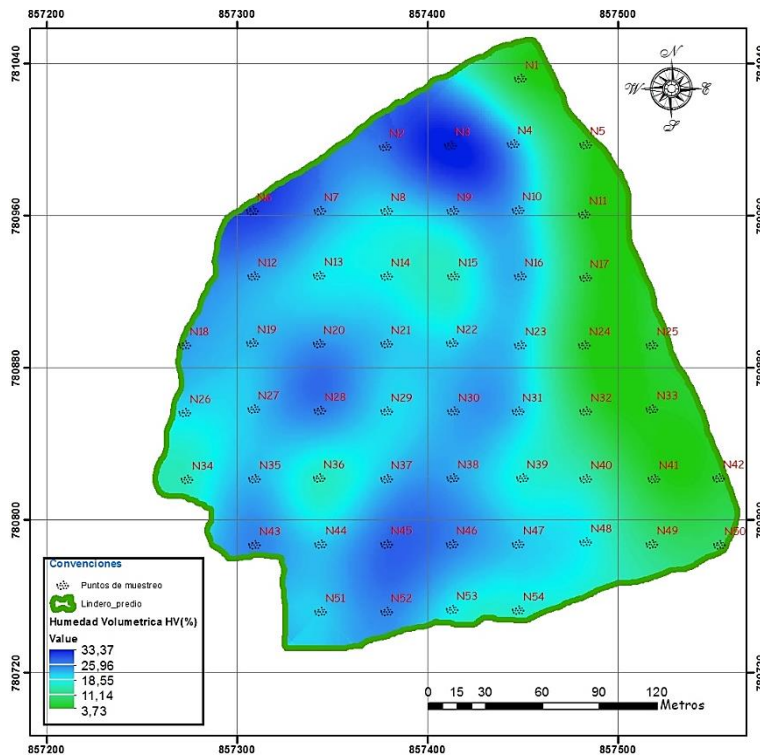
Además de eso y mencionado anteriormente las condiciones favorables para el crecimiento radicular están asociadas a cualidades del suelo como la distribución de poros, la facilidad del movimiento del agua, además de las condiciones de formación del suelo, que le confiere una variabilidad natural a estas propiedades (Gomes et al., 2007), es por eso que se plasmaron en mapas kriging mediante método geostadísticos la Rp como índice principal de compactación y otras propiedades queriendo ser asociadas a este problema.

También es vista en el predio zonas con más índices de compactación cuyo valor supera los 2,5 Mpa y es demarcada por los colores en transición de amarillo a rojos. Consecuente a esto como aumenta en la zona proporcionalmente a la profundidad, observando el cambio abrupto en los mapas de 0.2 a 0.3 m.

Teniendo en cuenta esto y al identificar características de compactación en en la totalidad del predio podemos delimitar zonas de manejo a este problema, tal como lo resume la definición de AP la cual consiste en una tecnología que se basa en obtener datos georreferenciados de los lotes para lograr un mayor conocimiento de los factores que contribuyen a la variabilidad que se presenta a nivel de lote y así delimitar Zonas de Manejo (ZM) (Anselin, Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Siendo estas las de color rojo como anteriormente se mencionada las que presentan problema como indicadores de compactación.

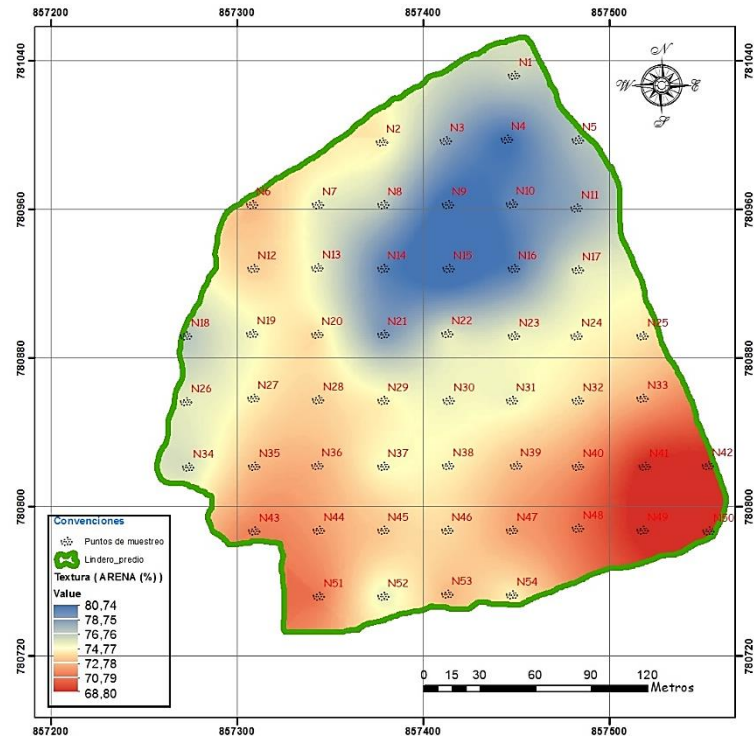
A continuación se muestran los mapas de predicción generados para las diferentes variables estudiadas:

Figura 14. Mapa raster de interpolación Kriging de Humedad volumétrica (%Hv)



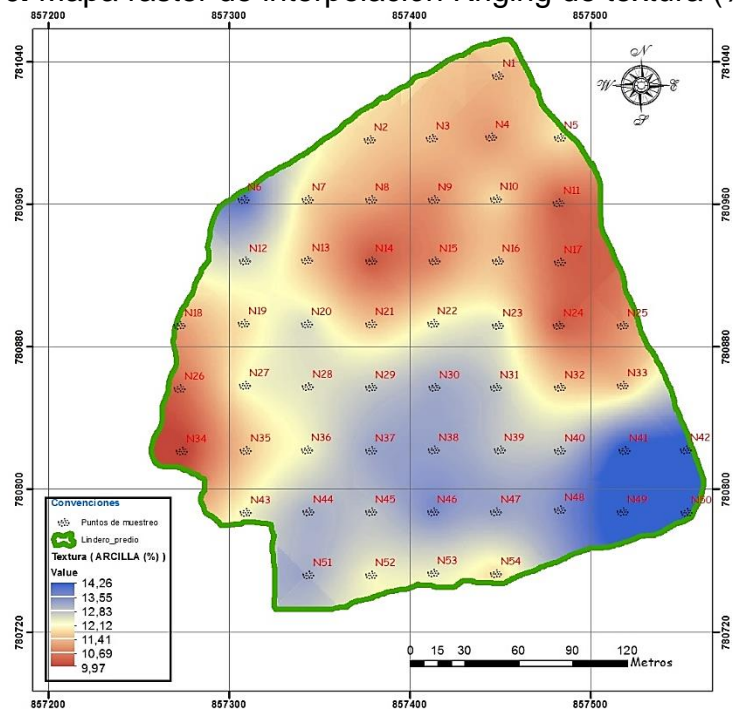
Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Mapa raster de interpolación Kriging de textura (%Arena)



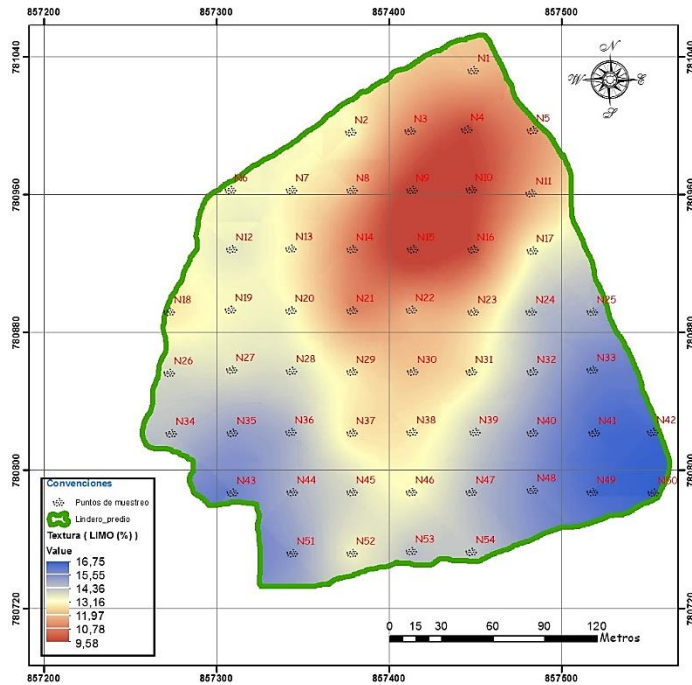
Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Mapa raster de interpolación Kriging de textura (%Arcilla)



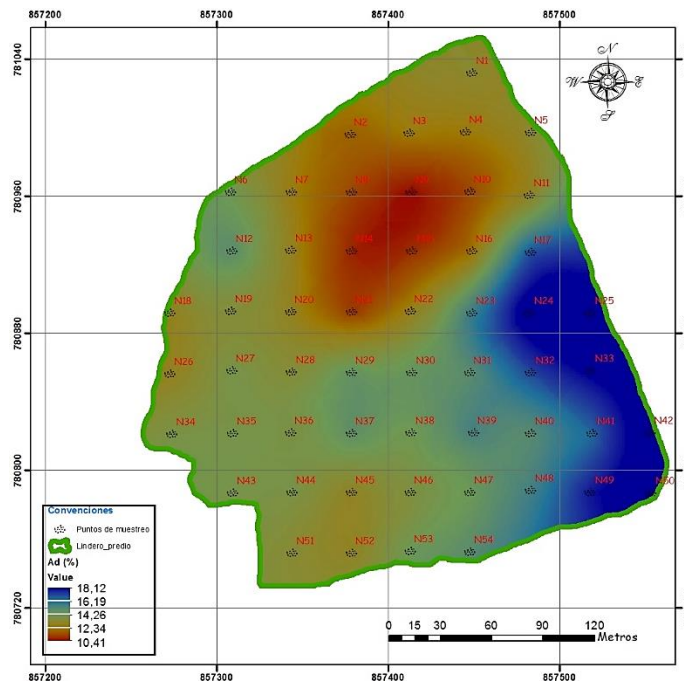
Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Mapa raster de interpolación Kriging de textura (%Limo)



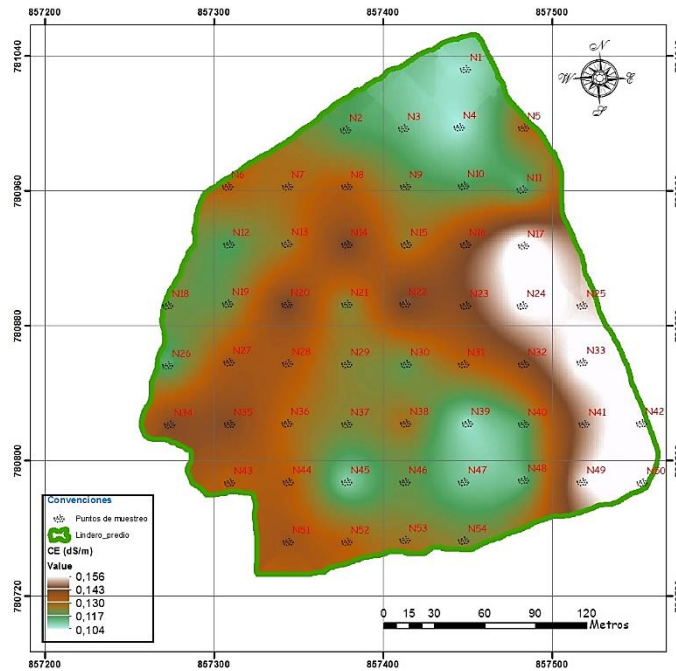
Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Mapa raster de interpolación Kriging de agua disponible (%Ad)



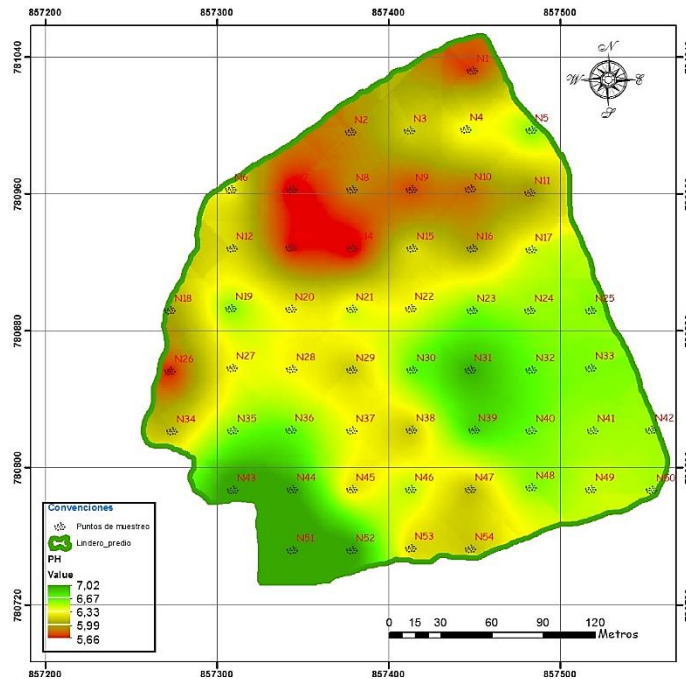
Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Mapa raster de interpolación Kriging de conductividad eléctrica (CE)



Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Mapa raster de interpolación Kriging de pH



Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Análisis de mapas kriging para las variables estudiadas

Los mapas de predicción e interpolación kriging solo demuestran gráficamente el análisis ya hecho con la correlaciones de Pearson, confirmando así que la Rp como índice de compactación del suelo, está ligada fuerte e inversamente al porcentaje humedad gravimétrica y un poco directamente al agua disponible y la conductividad eléctrica, lo citado y explicado en la pag.44, La conductividad eléctrica del suelo muestra gráficamente su correlación con el agua disponible del suelo donde muestran zonas con matices similares y dando a pensar que el agua de riego es principal influyente en que esto se presente, debido también a que el porcentaje de limos en las zonas donde aumenta la CE es también mayor. Los limos por tener mayor cantidad de microporos permiten menos permeabilidad e infiltración y por ende el agua disponible es mayor y la conductividad aumenta en esos lugares.

También los gráficos muestran representativamente la zona erial del terreno, cual es fácil identificar en los mapas de Rp a 20 cm en zonas de color rojo y en Hv en las zonas color verde, la cual influyo como un margen de identificación pues las características en esa parte varían abruptamente por el poco laboreo y la no utilización para siembra. Es por eso que el predio en su totalidad toma valores promedio de Rp a los 30 cm ya que la zona de manejo de siembra en profundidades más bajas no supera los 2,5 Mpa por sus altos contenidos de arena, mientras que desde la capa más superficial la zona erial ya es compacta de por si con valores de Rp de 2 Mpa indicando ningún tipo de laboreo ni utilidad.

Para los casos de pH y CE que gráficamente y estadísticamente en promedio muestras valores de 6,2 y 1,2 dS/m respectivamente, no son identificados y relacionados directamente con el problema de la compactación, pero si con la calidad del suelo mismo, así el suelo indica normalidad en cuestión de salinidad y un valor de pH ligeramente ácido, según lo indica la clasificación del departamento de agricultura de los estados unidos USDA.

5. CONCLUSIONES

El lote de estudio del centro de formación agroindustrial SENA tiene problemas de compactación, teniendo en cuenta como índice de este la R_p , la cual encuentra valores por encima de 2,5 Mpa en gran parte del predio a los 0.2 m de profundidad, lo cual origina limitaciones físicas para el buen desarrollo radicular de los cultivos, problema que incide notoriamente en la producción agrícola, disminuyéndola debido a que no se presentan las características de porosidad apropiadas, incidiendo en la mala relación suelo planta impidiendo una mala absorción de agua y nutrientes.

Los resultados del estudio estadístico y geoestadístico fueron esenciales para una mejor interpretación de los datos obtenidos en campo y laboratorio, generaron una buena síntesis demostrando confiabilidad de los mismos. Permitted graficar en mapas de interpolación kriging para inferir sobre las zonas no muestreadas gracias a las predicciones, realizando un análisis de variabilidad espacial y una correlación de los pares de datos que permitieron identificar el comportamiento de las variables, para así permitir realizar un diagnóstico y determinar las zonas de mayor o menor afectación.

Se observa que a medida que la profundidad aumenta la resistencia a la penetración es mayor, mostrando así que a profundidades de 0.3 m el terreno de estudio casi en su totalidad se encuentra promediado por valores superiores a los 3 Mpa, y dando a entender que a este nivel no llega ningún tipo de labranza provocando una susceptibilidad a compactarse.

Al realizar las correlaciones de Pearson entre la R_p y las variables estudiadas, se puede inferir que hay una estrecha relación inversa o negativa entre la humedad y la R_p , indicando que mientras una aumenta la otra disminuye, también relación entre las variables mismas, el agua disponible y las clases texturales en donde la microporosidad de estas permiten una retención mayor de agua y una clasificación de la calidad del suelo mediante las pruebas de pH y CE, que identificaron la normalidad, no salinidad del suelo y una ligeramente acidez del mismo respectivamente.

El estudio demostró que para realizar un estudio para la determinación de la compactación del suelo, no solo hay que tener a la R_p como único indicador ya que el suelo hace parte de un conjunto de características y parámetros que ayudan en el proceso de determinar este problema y que deben ser evaluados,

ejemplos de ello son la humedad, el laboreo a la hora de preparación del terreno, el clima y el uso de la tierra que permiten un análisis más fácil para hallar zonas críticas del problema y realizar un buen manejo de la tierra.

El uso de los equipos digitales y de uso insitu permitieron un fácil diseño del estudio detallado y recolección de los datos, determinando así la variabilidad espacial de todo el terreno observando el comportamiento del suelo mediante predicciones proyectados en mapas para lograr una eficiencia a la hora de proceder, identificando solo las zonas afectadas por el problema, aumentando la competitividad y productividad en el sector agrícola, reduciendo costos en un post manejo de laboreo y de los cultivos en el futuro, todo esto relacionado con el concepto de la agricultura de precisión.

La aplicación de los SIG fue de gran ayuda para graficar y mostrar las zonas de incidencia de los datos utilizando diferentes softwares para ajustar modelos y parámetros, generando semivariograma, mostrando un ajuste casi perfecto para la mayoría de las variables en donde el modelo exponencial predominó y un grado de dependencia espacial fuerte que permite confiar en los datos predichos, lo que hace más fácil el análisis e interpretación de los datos y dan satisfacción del trabajo realizado.

6. RECOMENDACIONES

Realizar estudios a diferentes condiciones del terreno, ya que para este caso se realizó solo a capacidad de campo y es necesario observar el comportamiento de todas las variables en situaciones críticas, tanto como en condiciones de sequía como de saturación.

Sería de gran ayuda realizar estudios a futuro sobre los rendimientos de los cultivos en la zona ya estudiada para comparar y relacionar la incidencia que tiene este problema hallado en las diferentes zonas y así establecer un plan de manejo adecuado para un mejor uso del suelo.

Realizar un estudio de los procesos de laboreo, la identificación de la maquinaria utilizada el pase sucesivo de ella, el grado de humedad a la que se realiza, el número de pases de la maquinaria, peso del tractor, equipos de ruedas sencillas o dobles, hasta la presión de hinchado de los neumáticos. Pues todo esto influye de alguna manera en procesos de compactación y podría complementar o relacionar los resultados de este estudio.

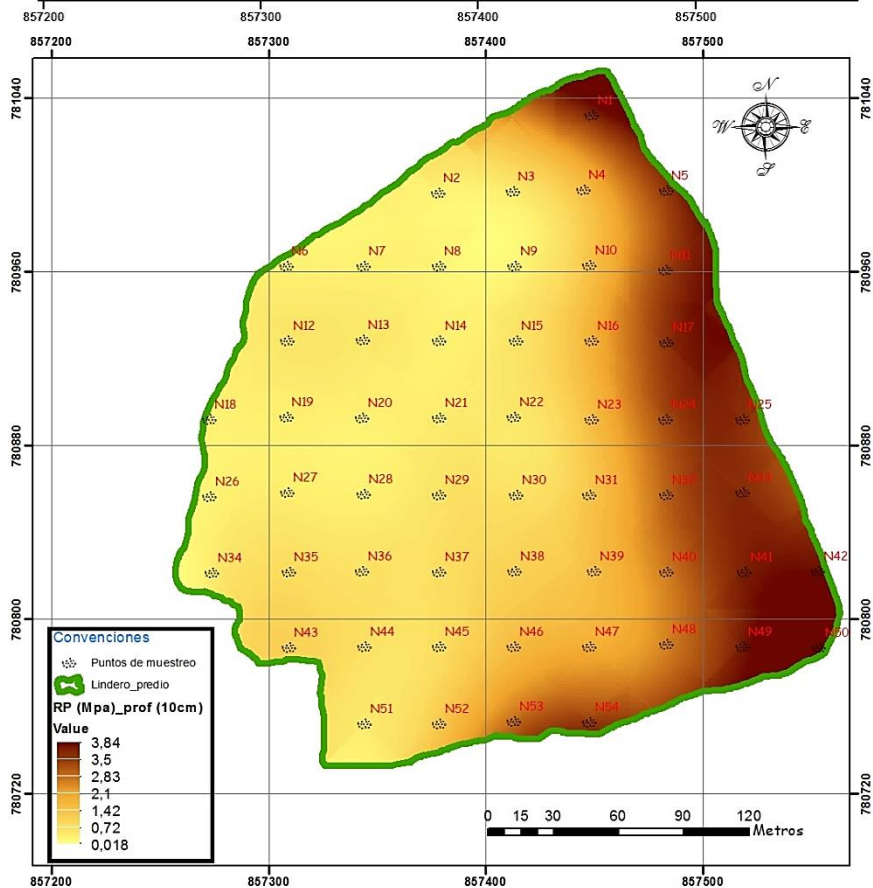
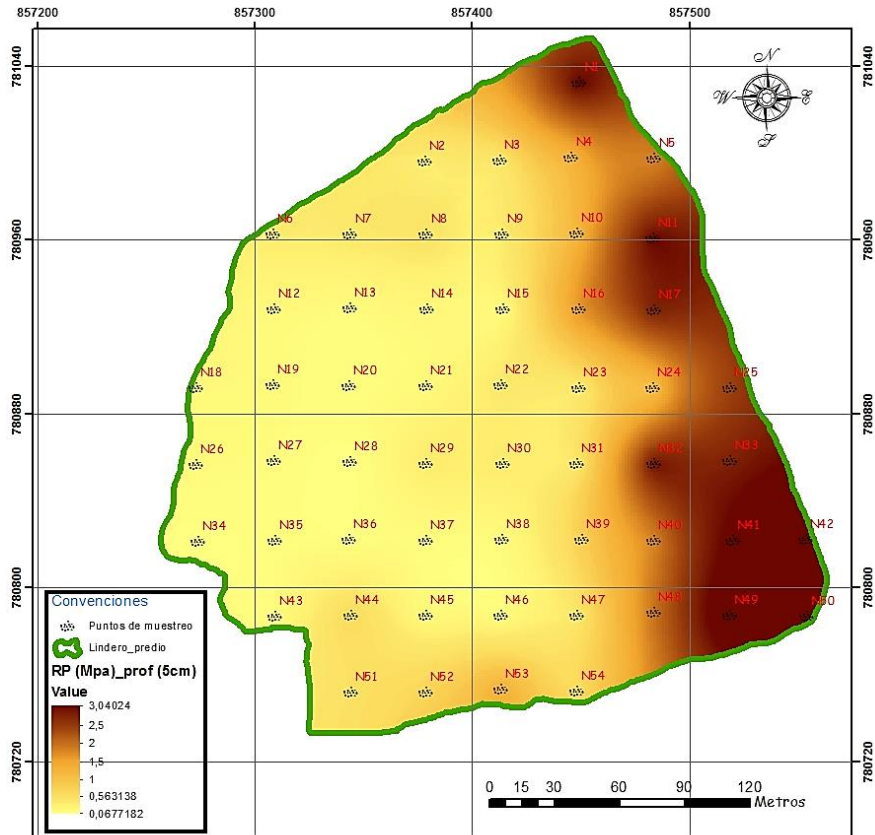
Una evaluación de las propiedades químicas y nutrientes en la zona de estudio sería de gran ayuda para complementar el estudio a nivel agrícola ya que el crecimiento de las raíces a veces es limitado por condiciones químicas del suelo desfavorables como son las deficiencias nutricionales severas, la toxicidad de manganeso y aluminio. La aplicación de fertilizantes puede mejorar las deficiencias, y estimular un enraizamiento más profundo que permite al cultivo acceder a más humedad del suelo y por lo tanto incrementar la productividad, es por eso que es de vital importancia realizar un estudio como este.

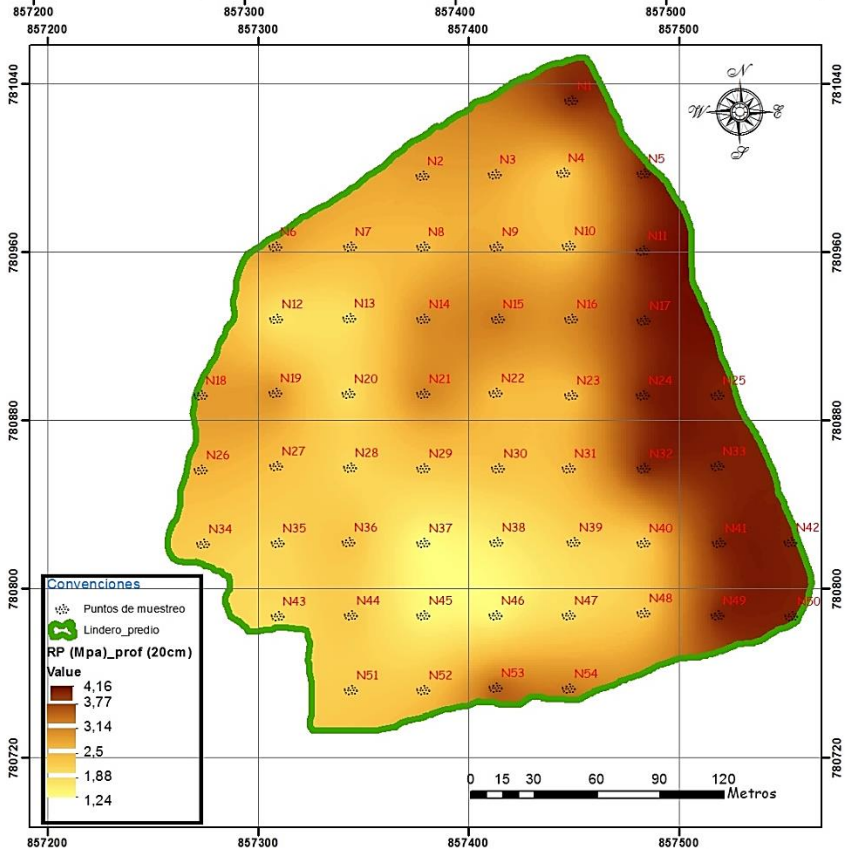
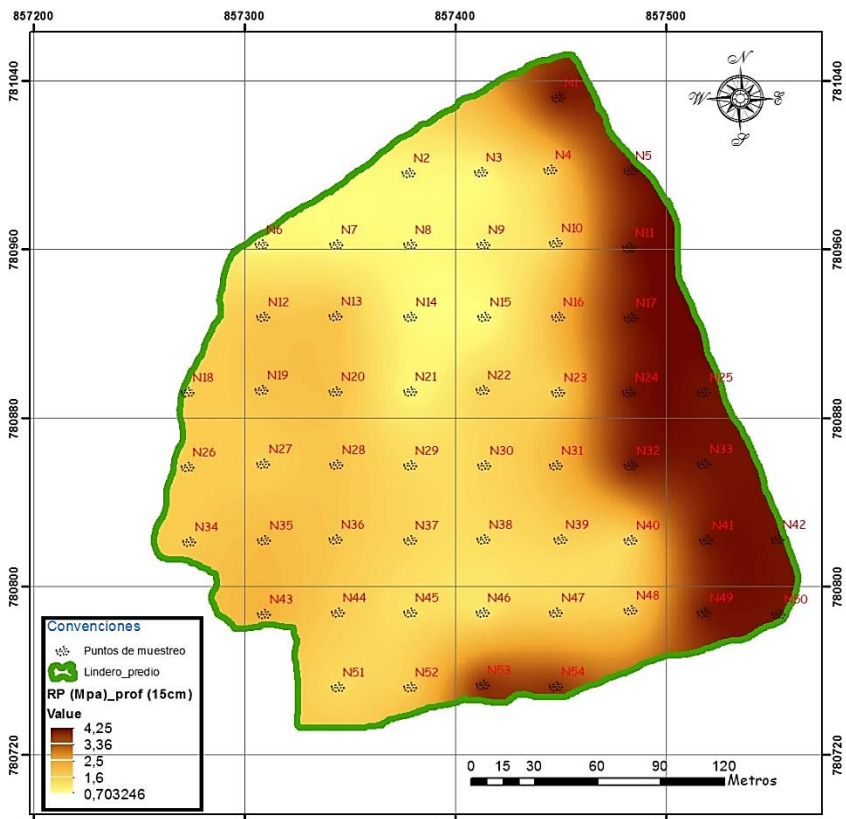
Identificar efectos del agua, la calidad de la misma y la implicación del riego con el fin de observar si esta influye notoriamente en procesos de compactación.

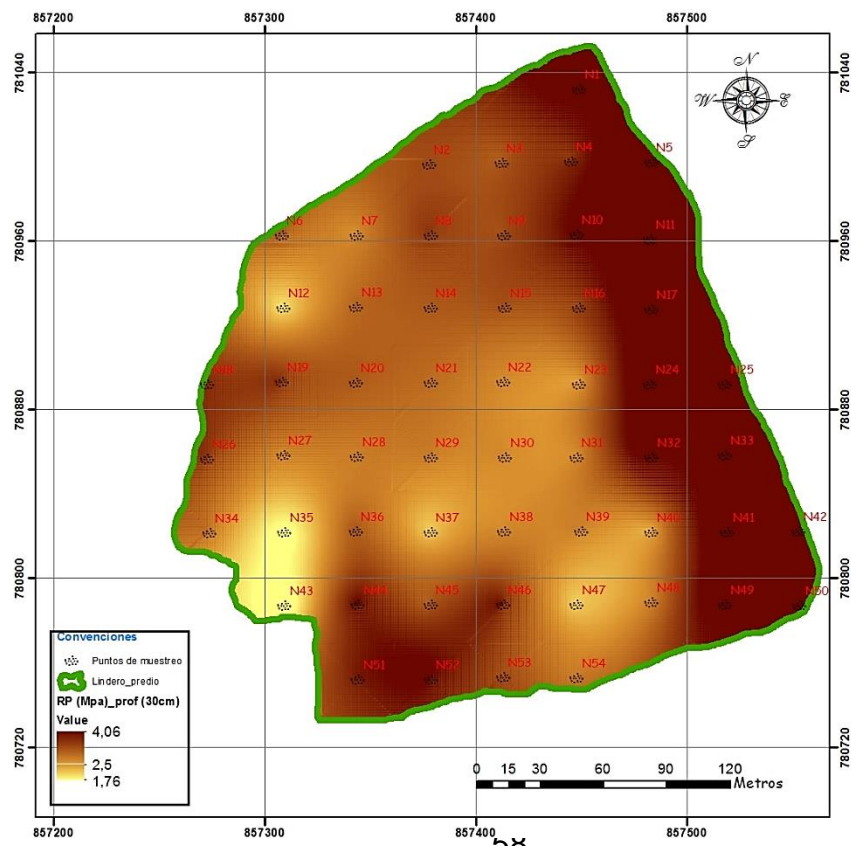
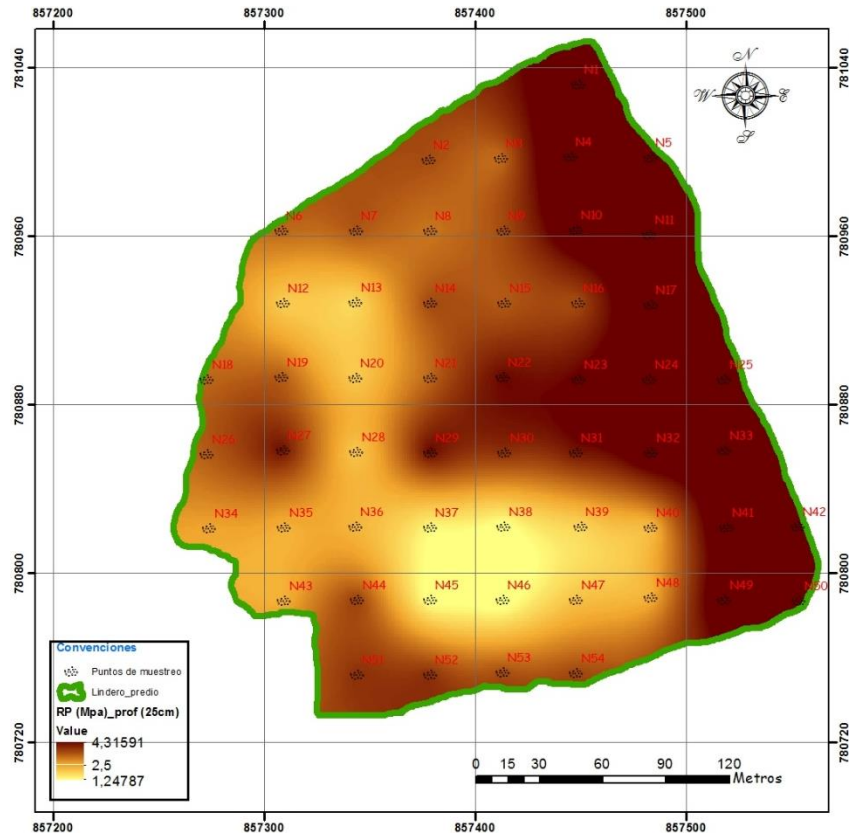
Se recomienda mejorar la estructura degradada del suelo mediante La labranza cero, que es uno de los componentes básicos de la agricultura de conservación que permite mejorar notoriamente los efectos de la compactación, utilizar métodos biológicos especialmente ya que estos son suelos arenosos, el aumento de los niveles materia orgánica es importante para incrementar la fertilidad y la capacidad

de retención del agua, reduciendo el riesgo de compactación. Inclusive, muy pequeños incrementos del contenido de materia orgánica pueden reducir la compactabilidad al aumentar la resistencia a la deformación y/o gracias al aumento de la elasticidad del suelo.

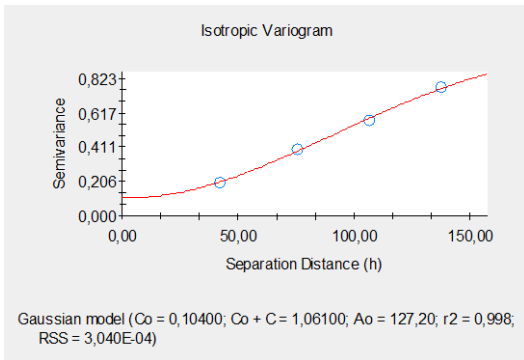
ANEXOS: Mapas de interpolación kriging Rp a diferentes profundidades y semivariograma para las variables estudiadas



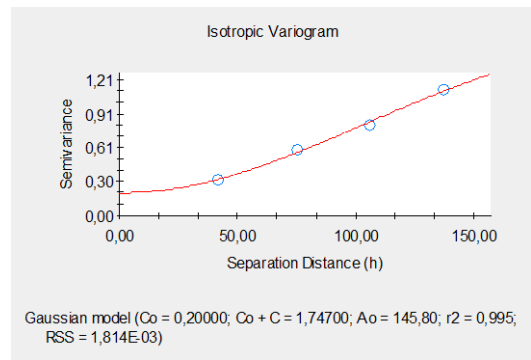




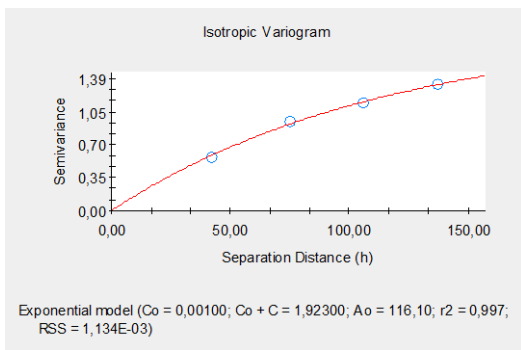
Grafica 2. Semivariograma para las variables estudiadas



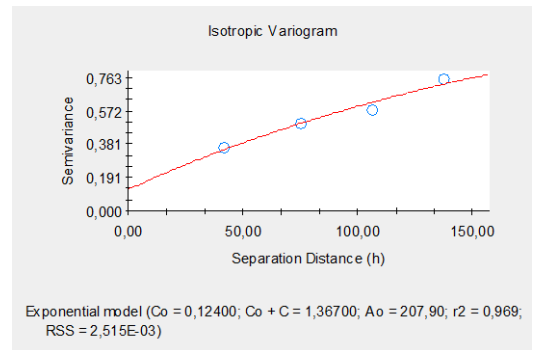
Semivariograma Rp 5 cm



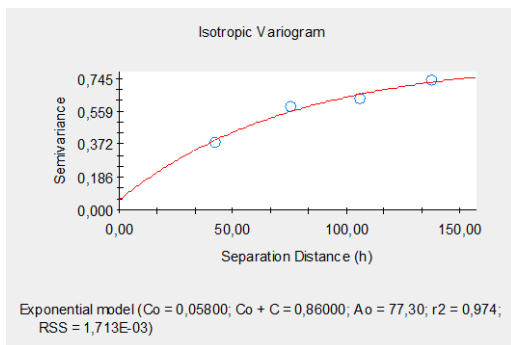
Semivariograma Rp 10cm



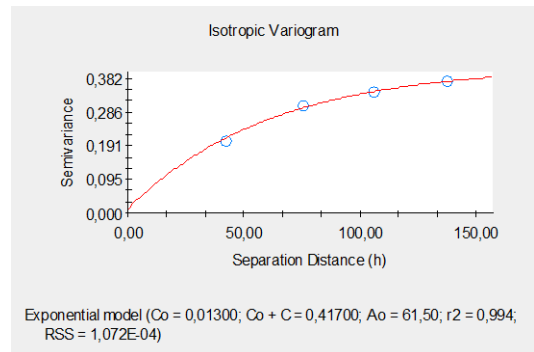
Semivariograma Rp 15 cm



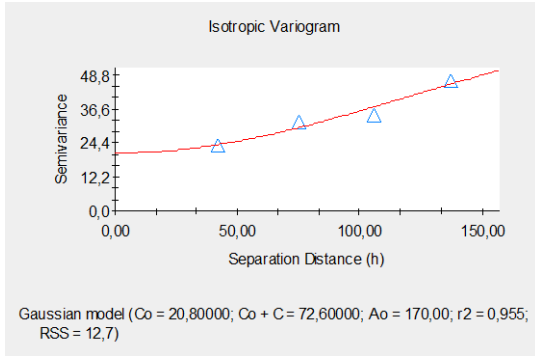
Semivariograma Rp 20 cm



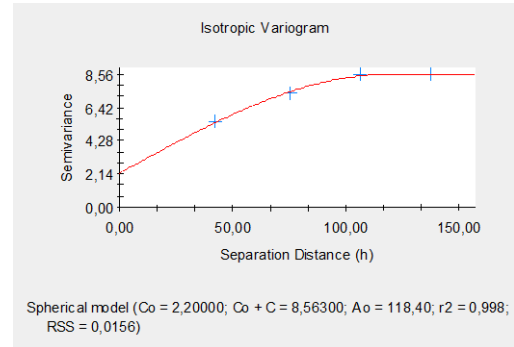
Semivariograma Rp 25 cm



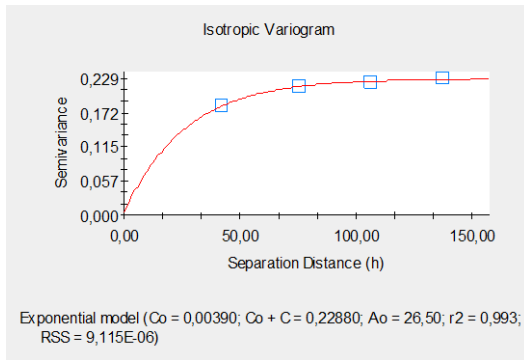
Semivariograma Rp 30 cm



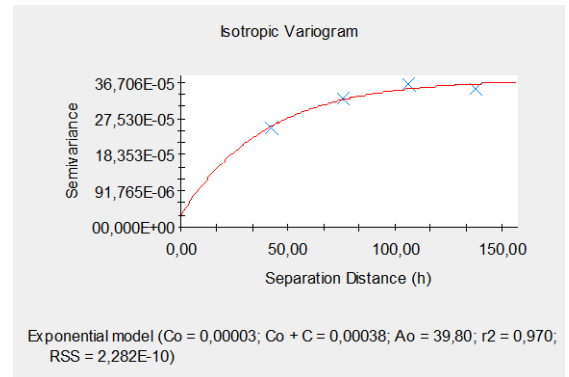
Semivariograma %Hv



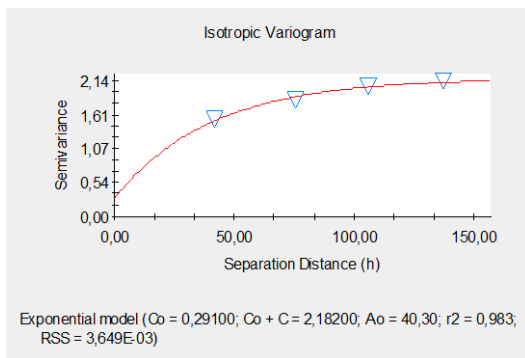
Semivariograma %Ad



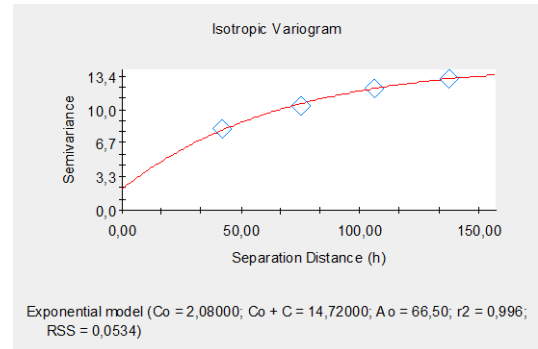
Semivariograma pH



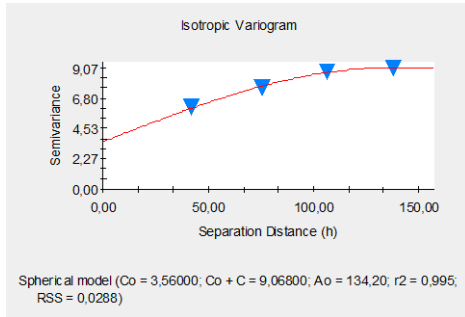
Semivariograma CE



Semivariograma %Arcilla



Semivariograma %Arena



Semivariograma %Limo

BIBLIOGRAFÍA

1. ACPA. Australian Centre for Precision Agriculture, University of Sidney 2005. URL:<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/>. (21/05/2015)
2. ALESSO, C.A; PILATTI, M.A.; DEL CARMEN IMHOFF, S. Y GRILLI, Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de La Pampa llana Santafesina. *Cienc. Suelo* [online]. vol.30, n.1, pp. 85-93. ISSN 1850-2067, 2012.
3. ÁLVAREZ, CR; FH GUTIERREZ BOEM; MA TABOADA; P PRYSTUPA; JF OCAMPO *ET AL*. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. Pp.238. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo*. Paraná, Entre Ríos, Argentina. 2004.
4. AMÉZQUITA, E. Hacia la sostenibilidad de los suelos de los Llanos Orientales. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa–Boyacá, Colombia, octubre 21-24 de 1998.
5. ANSELIN, L.; BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. *American Journal of Agricultural Economics* 86: 671 – 683, 2004.
6. ARIEL, U.M., CAMPANELLA O. AP-SIG: un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión. Objeto de exposición XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI) p. 531-535, 2009.
7. BAGARELLO, V. & SGROI, A. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.76, n.1, p. 13–24, 2004.
8. BANDICK, A.K., AND DICK, R. P. Field management effect on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 31(11): 1471–1479, 1999.
9. BENGHOUGH, A.G.; CAMPELL, D.J.; O’SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: *Soil & Environmental Analysis: Physical Methods*, Marcel Decker, p 377- 404. 2001.
10. BLANCO, R. Propuesta Metodológica para la Aplicación del Análisis de las Propiedades Físicas Edáficas a la Evaluación del Suelo para Usos Ganaderos. Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga. 434 p, 2000.
11. BOTTA, GF; D JORAJURIA; R BALBUENA & H ROSATTO. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.* 78(1):53-78, 2004.

12. CAMBARDELLA C. A., MOORMAN T. B., NOVAKJ. M., PARKIN T. B., KARLEN D. L. Y R. F. Y. K. A. E. TURCO, «Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils,» *Soil Science*, pp. 1501-1511, 1994.
13. CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 27: 695-703, 2003.
14. CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CEPIK, C.T.C; DEBIASI, H. Demanda de tracao em haste sulcadora na integracao lavoura-pecuaria con diferentes pressoes de pastejo e sua relacao con o estado de compactacao do solo. *Engenharia Agricola*, Jaboticabal, v.27, n.1, p. 220-228, 2007.
15. DÍAZ-ZORITA, M. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.* 54 (1):11-19, 2000.
16. DÍAZ-ZORITA, M; GA DUARTE & JH GROVE. A review of notill systems and soil management for sustainable crop production inthe subsumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65 (1):1-18, 2002.
17. DOERGE, T.A. Management Zone Concepts. Potash & Phosphate Institute, SSMG-2. 4p, 2000.
18. DOERGE, T.A. Management zone concepts.SSMG-2. En: Information Agriculture Conference, 9 al 11 de Agosto de 1999, Stewart Center, Purdue, IN. 1999.
19. DORAN, J.W., PARKIN, T.B. Quantitative indicators of soil quality: A minimun data set. *Methods for Assessing Soil Quality.* 22-27, 1996.
20. FAO. 1990. FAO Yearbook 1989. FAO Statistical Series No.94, Volumen 43. Roma,Italia, (1990).
21. FORSYTHE W., Manual Laboratorio Física de suelos, Costa Rica: IICA, 1985.
22. FRANZEN, D.W.; HOPKINS, D.H.; SWEENEY, N.D.; ULMER, N.K.; HALVORSON, A.D. Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. *Agronomy Journal* 94: 381-389, 2000.
23. GALLARDO A., «Geoestadística,» *Ecosistemas*, pp. 48-58, 2006.
24. GIL. E. Situación actual y posibilidades de la Agricultura de Precisión Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya, 2008.
25. GOMES, N.; SILVA, A.; MELLO, C.; FARIA, M.; OLIVEIRA, P. Metodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudio da variabilidade espacial de atributos físico-hidricos do solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Vicosa, v.31, p.435-443, 2007.
26. GOMES P. «Curso estatística experimental,» de *Curso estatística experimental*, Brasil, 1987.
27. HENRIQUEZ C., ORTIZ O., LARGAESPADA K., PORTUGUÉZ P., VARGAS M., VILLALOBOS P. Y GOMEZ D., «Determinación de la

- Resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica,» *Agronomía Costarricense*, pp. 175-184, 2011.
28. JARAMILLO, D «Variabilidad Espacial del suelo: Bases para su estudio,» *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, p. 73 a 87, 2012.
 29. JOHANN, J.A.; OPAZO, M.A.U.; SOUZA, E.G.; ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 8(2-3): p.212-219, 2004.
 30. JOURNEL, A.G., HUIJBREGTS, C.J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 600p, 1978.
 31. JUNG, K.Y.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; LEE, K.S.; CHUNG, S.O. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.107, n.1, p.1-10, 2010.
 32. KEMERER, A.C. Utilización de imágenes satelitales en agricultura de precisión para delimitar zonas de manejo uniforme. Tesis de grado. Facultad de agronomía, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, 2003.
 33. LOPERA, M. Y LÓPEZ, L. C. Variabilidad espacial de la salinidad en suelos con cultivo de flores bajo invernadero. Trabajo de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 66 p, 1997.
 34. LOWERY, B., AND J. E. MORRISON. Soil penetrometers and penetrability. *In: Dane, J. H., and G. Clarke (eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp: 363-388, 2002.
 35. MACEDO, J.R.; OTONNI FILHO, T.B.; MENEGUELLI, N.A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo Podzólico Vermelho-Amarelo de Seropédica, RJ. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.12, p.2043-2053, 1998.
 36. MACHADO, G. Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo por inducción electromagnética y variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo. p. 27-28 ,2009.
 37. MATERECHERA, S. A.; A. M. ALSTON; J. M. KIRBY AND A. R. DEXTER. Field evaluation of laboratory techniques for predicting the ability of roots to penetrate strong soil and of the influence of roots on water sorptivity. *Plant and Soil* 149:149-158, 1993.

38. MOGOLLON R., Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá, Bogotá, 2012.
39. MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; MARQUES DA SILVA, J. R. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil & Tillage Research* 106: 335-343, 2010.
40. OLDEMAN, L.R. The global extend of soil degradation. *In: Soil Resilience and Sustainable Land Use*. Greenland, D.J. and S. Zabolcs, eds. I. CAB International, Wallingford. Short Run Press Ltd., U.K. pp.99-118, 1994.
41. ORDUZ, S. Variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración del suelo caso estudio centro agropecuario marengo-sabana de Bogotá. Trabajo de Grado Especialista en Geomática. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada.p.6-9, 2014.
42. ORTIZ, J.L. Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura“Luiz de Queiroz”-ESALQ/USP. Piracicaba, 2003.
43. RAMIREZ L.L, SANCHEZ R. A y CAMACHO J.H «Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia.,» *Engenharia Agrícola*, 28(1), pp. 55-63, 2008.
44. RUCKS, L.; GARCÍA, F.; KAPLÁN, A. Propiedades físicas del suelo, Uruguay: Facultad de Agronomía - Universidad de la República, 2004.
45. SADRAS, V & A CALVIÑO. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93 (3):577-583, 2001.
46. SÁNCHEZ, H. A.; J. R. GARCÍA; M. R. CÁCERES Y R. D. CORBELLA. Labranzas en la Región Chacopampena subhúmeda de Tucumán. En: Panigatti, J. L.; H. Marelli, D. Buzchiazzo y R. Gil (eds.), Siembra Directa. INTA. Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, R. Argentina, pp. 245-256, 1998.
47. SANTOS, A.O.; PALLONE FILHO, W.J.; UNGARO, M.R.G.; LINO, A.C.L.; RANDIN, B. Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(3): 463-468, 2003.
48. SANZANO, G. A.; R. D. CORBELLA; J. R. GARCÍA Y G. S. FADDA. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Cienc. Suelo* 23 (1): 93-100, 2005.

49. SCHEPERS, J.S.; SCHLEMMER, M. R.; FERGUSON, R. B. Site-specific considerations for managing phosphorus. *Journal of Environmental Quality*. 29: 125-130, 2000
50. SERAFIM M.E.; VITORINO A.C.T.; PEIXOTO P.P.P; SOUZA C.M.A.; CARVALHO D.F. Intervalo hídrico ótimo em um latosso vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de produção. *Engenharia Agrícola*, Jaboticaval, v.28, n.4, p. 654-665, Oct., 2008.
51. SOANE, B.D.; OUWERKERK, C.VAN. Soil compaction problems in world agriculture, In: *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, p.1-21, 1994.
52. SOIL QUALITY INSTITUTE (SQI). *Soil Quality Test Kit Guide*. USDA. U.S.A. 82 p. 1999.
53. SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 937-944, 2004.
54. STELLUTI, M.; MAIORANA, M.; GIORGIO, D. Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.46, n.3-4, p.145-151, Junho. 1998.
55. STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto, *Revista Ciência Rural*, 34(3): 755- 760, 2004.
56. STURARO, J.R. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológicas e geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993
57. TAYLOR H., ROBERSON G. Y PARKER J., «Soil Strength - Root penetration relations for medium - To coarse textured soil materials,» *Soil Science*, pp. 18-22, 1965.
58. UCC-Universidad Católica de Chile. Centro de Agricultura de Precisión. URL:<http://www.conicyt.cl/bases/fondef/fondef/INST/0003781.HTML> (21/05/2015)
59. US Farm Bill. 1996. URL:<http://www.nrcs.usda.gov/programs/farmland/1996/MiscFB.html> (21/05/2015)
60. US National Research Council. *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Committee on Assessing Crop Yield: Site-Specific Farming, Information Systems, and Research Opportunities, National Research Council. Board on Agriculture. 168p, 1997.

61. UTSET, A.; CID, G. (Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil & Tillage Research*, 61: 193-202, 2001.
62. VERONESE JÚNIOR, V.; CARVALHO, M.P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O.S.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; INGARAMO, O.E. Spatial variability of soil water content and mechanical 308 resistance of Brazilian ferralsol. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.85, n.1-2, p.166-177, 2006.
63. VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (ed.) *Tópicos em Ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.
64. ZARZOSA, M. NÚÑEZ A. A., *Sistemas de información geográfica: Practicas con ArcView*. Nieves Lantada. UPC 2002.