



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN DEL
SUELO COMO RESULTADO DEL FERTIRRIEGO Y FERTILIZACIÓN
EDÁFICA EN BANANO

ARMIJOS NIETO CARLOS ALFREDO
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2021



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA
PENETRACIÓN DEL SUELO COMO RESULTADO DEL
FERTIRRIEGO Y FERTILIZACIÓN EDÁFICA EN BANANO

ARMIJOS NIETO CARLOS ALFREDO
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2021



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TRABAJO TITULACIÓN
TRABAJO EXPERIMENTAL

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO
COMO RESULTADO DEL FERTIRRIEGO Y FERTILIZACIÓN EDÁFICA EN
BANANO

ARMIJOS NIETO CARLOS ALFREDO
INGENIERO AGRÓNOMO

CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE

MACHALA, 26 DE ABRIL DE 2021

MACHALA
2021

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO(RMP), COMO RESULTADO DEL FERTIRRIEGO Y FERTILIZACIÓN EDÁFICA EN BANANO

INFORME DE ORIGINALIDAD

1 %

INDICE DE SIMILITUD

1 %

FUENTES DE INTERNET

0 %

PUBLICACIONES

0 %

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.sabiia.cnptia.embrapa.br

Fuente de Internet

1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

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

El que suscribe, ARMIJOS NIETO CARLOS ALFREDO, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO COMO RESULTADO DEL FERTIRRIEGO Y FERTILIZACIÓN EDÁFICA EN BANANO, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

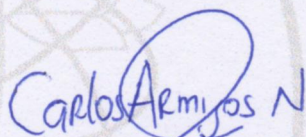
El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

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

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

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

Machala, 26 de abril de 2021



ARMIJOS NIETO CARLOS ALFREDO
0705957629



DEDICATORIA

A Dios, por brindarme salud y sabiduría durante mi etapa como estudiante, por permitirme disfrutar de la vida junto a mis seres queridos.

A mi madre, Sra. Mónica Nieto Romero por su amor inagotable e incondicional y ser pilar fundamental en el transcurso de mi vida, por la confianza puesta en mí y en mis sueños.

A la memoria de mi padre, Sr. Alfredo Armijos Ullauri por sus buenos deseos, enseñanzas y consejos brindados.

A mi hermana, Srta. Melissa Armijos Nieto por ser guía y establecer un camino de superación, por su constante apoyo y amor fraterno.

A mi tío, Sr. Mauricio Nieto Romero quien siempre ha brindado apoyo incondicional a lo largo de mi vida estudiantil, y aliento constante.

AGRADECIMIENTO

Al término de la presente etapa como estudiante quiero agradecer a la Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Agropecuarias por la cálida acogida durante mi instancia en sus instalaciones.

Al Ing. Julio Enrique Chabla Carrillo, Phd por ser guía y apoyo fundamental durante el transcurso de la investigación.

A todos los docentes pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agropecuarias que durante mi tiempo de estudio brindaron enseñanzas y experiencias de campo laboral en beneficio a mi formación como profesional.

Al Ing. Victor Chabla Carrillo por permitir el acceso y uso de su predio agrícola Finca Marquez para el presente trabajo de investigación.

A mis amigos y colegas Heiner Aguilar, Victor Castro, Gustavo Pazmiño quienes forman parte del equipo de trabajo.

RESUMEN

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO COMO RESULTADO DEL FERTIRRIEGO Y FERTILIZACIÓN EDÁFICA EN BANANO

Autor

Carlos Alfredo Armijos Nieto

Tutor

Julio Chabla Carrillo, PhD.

El suelo se encuentra sujeto a modificaciones de sus propiedades físico-químico-biológicas como consecuencia de fuerzas intervinientes relacionadas a las actividades agrícolas que se efectúan en el predio a lo largo del tiempo, la variación de valores óptimos de las propiedades físicas constituye un indicador de la existencia de problemas de compactación, y de inconvenientes más específicos en los distintos horizontes tales como la impedancia mecánica de profundización y desarrollo de la cabellera radicular.

Para comprender la alteración que ocasiona la actividad de fertilización se realizó la presente investigación en la Finca Marquez ubicada en la parroquia La Peaña del cantón Pasaje. Se efectuó la identificación de módulos en los que se aplicaron diferentes tipos de fertilización y un testigo; considerando áreas, al inicio, intermedio y al final de cada módulo se efectuó una calicata en forma de escalera de 50 cm de profundidad, estableciendo los niveles de estudio 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm en 12 puntos de interés, en cada estrato se tomó muestras de suelo para determinar de las propiedades físicas densidad aparente (D_a), densidad real (D_r), porosidad total (P_t) y la resistencia mecánica a la penetración (RMP), además se realizó la toma de muestras cada 15 días, durante la prueba de campo, en 31 puntos al azar. El análisis de las propiedades D_a , D_r y P_t se realizó en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y la RMP fue medida a través del penetrómetro digital Field Scout Sc 900.

El análisis estadístico se realizó con los softwares IBM SPSS Statistics y Rstudio, mediante el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homogeneidad de varianza se determinó la correlación existente entre las variables, así como también el análisis exploratorio por medio de cajas y bigotes, gráficos de líneas múltiples que

permite visualizar la tendencia de la variable, además de identificar que el tratamiento 3 no altera las propiedades físicas en estudio, obteniendo el porcentaje más alto de porosidad, la densidad aparente más baja y la menor resistencia mecánica a la penetración medida en todos los niveles de estudio. El análisis geoestadístico se ejecutó en el software Surfer 20, se elaboró semivariogramas experimentales para la determinación de ajuste a los modelos teóricos Esférico y Gaussiano por medio de los parámetros coeficiente de Nash y coeficiente de determinación R^2 cercanos o igual a uno, y los menores valores del error medio cuadrático (RMSE).

Los mapas de la variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración se efectuaron por medio del software ArcMap 10.5 mediante interpolaciones Kriging ordinario empleando los parámetros obtenidos del semivariograma. Los resultados evidencian una alta variabilidad espacial de la RMP en todos los estratos de estudio, acentuando una mayor variación en el estrato 0-10 y 40-50cm de profundidad; en los estratos correspondientes 10-20, 20-30, 30-40 se observa una resistencia mecánica a la penetración de rango de valores aprox. 500 kPa, constituyéndose en los estratos con menor coeficiente de variación, además se observa en todas las profundidades una nula dependencia espacial y estableciendo zonas perfectamente diferenciadas con tendencia de altos valores de resistencia mecánica a la penetración y zonas con rangos de valores óptimos para el correcto desarrollo de las raíces.

Palabras clave: Propiedades físicas, resistencia mecánica a la penetración, fertilización, variabilidad espacial.

SUMMARY

STUDY OF MECHANICAL RESISTANCE TO THE PENETRATION OF THE SOIL AS A RESULT OF THE FERTIGATION AND SOIL FERTILIZATION IN BANANAS

Author

Carlos Alfredo Armijos Nieto

Advisor

Julio Chabla Carrillo, PhD

Soil is subject to changes in its physical-chemical-biological properties as a result of intervening forces related to agricultural activities carried out on the land. The intervening forces are related to the agricultural activities that take place on the property over time, the variation of optimal values of the physical properties is an indicator of compaction problems and of the existence of an indicator of compaction problems, and of more specific drawbacks in the different horizons such as the mechanical impedance of deepening and development of root hairs.

In order to understand the alteration caused by fertilization activity, this research was carried out at the Finca Marquez located in the parish of La Peaña in the canton Pasaje. The study was developed with the identification of modules in which different types of fertilization and control was applied; at the beginning, middle and end of each module, a staircase-shaped test was carried out with a depth of 50 cm, establishing the study levels 0-10, 10-20, 20-30, 30, 30-40, 40-50 cm in 12 points of interest for the physical properties Da, Dr, Pt and RMP. RMP samples were taken every 15 days at 31 random representatives of the property, selected points. The analysis of Da, Dr and Pt properties was carried out in the laboratories of the Faculty of Agricultural Sciences. RMP was measured using a Field Scout Sc900 digital penetrometer.

The statistical analysis was carried out with IBM SPSS Statistics and Rstudio software, by fulfilling the assumptions of data normality and variance homogeneity and the correlation between the variables was determined, as well as the exploratory analysis by means of box-and-whisker, multiple line graphs that allow visualization of the trend of

the variable, also identifying that treatment 3 does not alter the physical properties under study, obtaining the highest percentage of porosity, the lowest apparent density and the lowest mechanical resistance to penetration measured at all levels of study. The geostatistical analysis was executed in the Surfer 20 software, experimental semivariograms which expressed the statistical parameters Sill, Nugget, Range and Spatial Dependency were elaborated for the determination of the fit to the Spherical and Gaussian theoretical models by means of the Nash coefficient and Nash coefficient parameters. R^2 close or equal to one, and the lowest values of the root mean square error (RMSE).

The maps of the spatial variability of the mechanical resistance to penetration were made using ArcMap 10.0 software through Kriging ordinary interpolations using the parameters obtained from the semivariogram. The results show a high spatial variability of the MPR in all the study strata, accentuating a greater variation in the 0-10 and 40-50cm depth strata; in the corresponding strata 10-20, 20-30, 30-40 a mechanical resistance to penetration of a range of values is observed approx. 500 kPa, becoming the strata with the lowest coefficient of variation, furthermore, at all depths there is no spatial dependence and establishing perfectly differentiated zones with a tendency of high values of mechanical penetration resistance and zones with optimal ranges of values for the correct root development.

Keywords: Physical properties, mechanical resistance to penetration, fertilization, spatial variability.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Objetivo General	13
1.2. Objetivos Específicos	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Propiedades físicas del suelo	14
2.1.1. Densidad Real	14
2.1.2. Densidad Aparente	14
2.1.3. Textura	15
2.1.4. Porosidad	16
2.1.5. Infiltración	16
2.1.6. Estructura	17
2.1.7. Humedad del Suelo	17
2.2. Componentes del suelo	18
2.3. Compactación de los suelos	19
2.3.1. Resistencia mecánica a la penetración	19
2.3.2. Penetrómetro	20
2.3.3. Tipos de penetrómetros	20
2.4. Láminas de riego	21
2.5. Comportamiento radicular del cultivo de Banano según la compactación y humedad del suelo	22
2.6. Fertirriego en relación a las raíces de banano	23
2.7. Fertilización edáfica en relación a las raíces de banano	24
2.8. Geoestadística	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1. Ubicación y caracterización del área de estudio	26
3.2. Materiales, equipos y reactivos	27

3.3. Metodología para determinar la ubicación del área de muestreo	27
3.3.1. Ubicación de toma de muestras y análisis de laboratorio.....	27
3.4. Determinación de las propiedades físicas del suelo.....	28
3.5. Registro de la resistencia mecánica a la penetración del suelo mediante el penetrómetro digital FieldScout Sc 900.....	29
3.6. Análisis estadístico	29
3.7. Análisis geoestadístico.....	29
3.8. Coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	30
3.9. Coeficiente de determinación (R^2).....	30
3.10. Error cuadrático medio (RMSE).....	30
3.11. Análisis de componentes principales	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	31
4.1. Análisis exploratorio de la resistencia mecánica a la penetración y propiedades físicas del suelo.....	31
4.2. Análisis multivariado.....	38
4.3. Determinación de la variabilidad espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración.....	40
4.3.1. Mapas de distribución espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración por estratos de profundidad.....	42
5. CONCLUSIONES	47
6. RECOMENDACIONES.....	48
7. BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos y variables de muestras procesadas	29
Tabla 2. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza	32
Tabla 3. Análisis de varianza factorial para todas las variables de estudio	33
Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la variable Resistencia mecánica a la penetración	34
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la variable Densidad aparente.....	36
Tabla 6. Estadísticos descriptivos de la variable Densidad real	36
Tabla 7. Estadísticos descriptivos de la variable Porosidad total	37
Tabla 8. Clasificación de las propiedades físicas según el CV.....	38
Tabla 9. Análisis de componentes principales de las variables en estudio.....	39
Tabla 10. Geoestadístico aplicado a las profundidades en estudio.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	26
Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo “Finca Marquez”	28
Figura 3. Diagramas de cajas de cada variable y tratamiento en 5 perfiles de estudio... 31	
Figura 4. Resistencia mecánica a la penetración (kPa) en un perfil de suelo de 50cm. . 35	
Figura 5. Matriz de correlación de Pearson para las variables de estudio	38
Figura 6. Semiovariogramas ajustados de RMP del perfil de estudio	40
Figura 7. Distribución espacial de RMP en el estrato 0-10cm	42
Figura 8. Distribución espacial de RMP en el estrato 10-20cm	43
Figura 9. Distribución espacial de RMP en el estrato 20-30cm	44
Figura 10. Distribución espacial de RMP en el estrato 30-40cm	45
Figura 11. Distribución espacial de RMP en el estrato 40-50cm	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Toma de muestras de suelo	59
Anexo 2. Realización de calicata y toma de muestra mediante cilindro	59
Anexo 3. Toma de datos con el penetrómetro	60
Anexo 4. Secado de muestras en estufa.....	60
Anexo 5. Determinación de densidad aparente	61
Anexo 6. Determinación de densidad real	61
Anexo 7. Valores reales y predichos de cada profundidad de estudio.	62

1. INTRODUCCIÓN

El suelo está constituido por un conjunto de tres fases interrelacionadas, compuesto de partículas sólidas, una fase fluida y otra gaseiforme; conforme transcurre el tiempo, este ente es sujeto de transformaciones, que son acordadas por las fuerzas que intervienen, de tal manera se producen cambios en sus propiedades físico químicas.

Los sistemas utilizados de riego, se encuentran entre las fuerzas trascendentales que modifican las condiciones del suelo, los cuales se sujetan al nivel de agua presente en los acuíferos, esto puede ocasionar alteraciones en las cualidades del suelo, pudiendo afectarse principalmente la densidad aparente, la resistencia mecánica a la penetración y la operatividad del espacio poroso.

La fertirrigación es una de las técnicas de mayor uso en la actualidad, por medio de esta es posible optimizar el flujo hídrico, y actualmente es conocida la primordial técnica de fertilización, de esta manera es posible tener una conveniente nutrición de las plantas, al mismo tiempo que se disminuye la lixiviación del nitrógeno (Glab et al., 2020). La fertirrigación y la fertilización edáfica se han utilizado como complementarias, este es el método fundamental que se utiliza para la producción del cultivo de banano con características de exportación, como consecuencia es posible observar alteraciones en el suelo y finalmente su compactación.

La fertilización en el cultivo de banano es una práctica fundamental para el desarrollo y productividad del cultivo, sin embargo, se desconoce la totalidad de efectos contraproducentes para las propiedades físicas del suelo entre las que encontramos principalmente la variación de la resistencia mecánica a la penetración.

Como consecuencia de la compactación se pueden presentar variaciones en factores tales como el nivel de humedad del suelo, resistencia mecánica a la penetración, aireación y temperatura, las cuales van a ocasionar estrés, que finalmente se verá reflejado en el cultivo y su desempeño (Tuzzin et al., 2020); los poros presentes en el suelo se verán reducidos de tamaño, el agua se moverá más lento de lo normal, también se disminuirá la aireación, la fauna y el crecimiento radicular.

La cuantificación de la resistencia mecánica a la penetración del suelo como consecuencia de la fertilización edáfica y fertirriego en el cultivo de banano, se evaluó a través del penetrómetro digital FieldScout sc 900 en el predio Finca Márquez, ubicada en el cantón Pasaje de la provincia de El Oro, ante lo cual se plantearon los objetivos descritos a continuación.

1.1. Objetivo General

- Analizar la variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración del suelo en conjunto de ciertas propiedades físicas a través de estadística multivariada para la determinación del comportamiento de la fertilización.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia mecánica a la penetración y las propiedades físicas del suelo en función de tres tipos de fertilización en un perfil de 50cm por medio de un penetrómetro digital y análisis de laboratorio para conocer la incidencia de la fertilización y la profundización radicular.
- Establecer la variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración del suelo a través de un análisis geostatístico en cinco profundidades de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Propiedades físicas del suelo

Los monocultivos, al igual que la intensidad de manejo que se produce en los suelos, ha dejado como consecuencia la destrucción de sus niveles de calidad, afectando así a sus principales propiedades, entre las cuales se encuentran las propiedades físicas, por lo que es imprescindible la implementación de alternativas que permitan mejorar la calidad del sustrato, estas deben ser eficaces y eficientes, además debe considerarse el entorno en el que se van a aplicar y la factibilidad de su uso (Rodríguez et al., 2020).

Para realizar una evaluación del suelo y su nivel de calidad, generalmente se recurre a la ponderación de sus propiedades, las cuales son perceptivas a las prácticas de manejo, y podrían utilizarse como indicadores, así es posible contribuir con el diagnóstico de los sistemas de producción (Sokolowski et al., 2020). Las propiedades físicas del suelo constituyen un marco para entender su naturaleza e interacciones tróficas (Erktan et al., 2020).

2.1.1. Densidad Real

Existe una dependencia entre el volumen de moléculas que se encuentran en estado sólido y el espacio ocupado por estas, ha esto se conoce como densidad real, con exclusión del volumen de los poros (Aguilar, 2018); propiedad del suelo que constituye la fase sólida, este valor es invariable, en su mayoría los minerales arcillosos presentan densidad aproximada de 2,65 gramos por cm^3 (Rojas, Cajiao, & Rivera, 2018).

En varias expresiones de matemáticas se recurre al indicador de densidad real, en las cuales se examina como la cantidad correspondiente a una muestra de suelo, para realizar transformaciones precisas de datos base-masa a base-volumétrica, además para el volumen de sólidos, para ponderar la porosidad del suelo en su totalidad, el contenido de calorías del suelo y otros materiales, rectificar la densidad aparente de aquellas muestras cuya característica es la cantidad de fragmentos gruesos, para todo esto se recurre a este cálculo (Villaseñor, 2016).

2.1.2. Densidad Aparente

Para indicar el nivel de dependencia que se encuentra entre el volumen de suelo seco y el volumen total ocupado por la muestra sin alteraciones, se recurre a la densidad aparente,

indicador que es expresado en Kg. m^{-3} o g. cm^{-3} (Porta, López, & Poch, 2019); al mismo tiempo que se incrementa la densidad aparente, también se va a producir un mayor nivel de compactación, va a repercutir en la retención de humedad, produciéndose finalmente una limitación en el desarrollo del sistema radicular (Amaya, 2020).

Es posible definir también a la densidad aparente como el conglomerado de la masa sólida que se encuentra disponible en una unidad de volumen de suelo, propiedad encargada de estimar la porosidad, compactación, macro y microporosidad y saturación, estos valores que pueden resultar limitantes para el adecuado desarrollo de la planta, son superados por la textura del suelo (López & Estrada, 2015).

2.1.3. Textura

La armonía relativa existente entre la arena, limo y arcilla disponibles en el suelo, a esto se lo conoce como la textura, si se presenta una preponderancia de arenas, entonces será conocido como suelo arenoso, si existe un mayor dominio de limos, se conoce como limoso, y si existe mayor presencia de arcillas, entonces será arcilloso, estos retienen mayores niveles de humedad y nutrientes (Comisión Nacional Forestal, 2018). La materia orgánica biodisponible presente en el suelo es influenciada por la textura, además de por otros factores como la humedad y sus niveles de variación (Li et al., 2020).

Al suelo lo conforman las partículas minerales, estas se encasillan según el tamaño: arcillas (0,002 mm), limos (0,002–0,05 mm) y arena (0,05–2,0 mm); el porcentaje de estas que están disponibles en el suelo, son las que determinan su textura, pudiendo existir variaciones de acuerdo al tamaño de las partículas predominantes, la textura perfecta para el desarrollo vegetal es el arcilloso calcáreo o marga (Rajakaruna & Boyd, 2019).

La textura del suelo ayuda a controlar el equilibrio hídrico, si la disposición de partículas y poros resulta más fina será posible que la retención de líquidos sea mayor, esto dependerá de las condiciones climáticas, no en todo suelo va a ser constante; los resultados favorables de una textura fina y el nivel de inmovilización de líquidos se reflejará así mismo en el dinamismo de los microorganismos a cargo de la descomposición del suelo, la cual será favorecida, mientras que la textura gruesa se va a poner árida con mayor rapidez (Li et al., 2020).

2.1.4. Porosidad

La porosidad del suelo constituye el volumen de poros o espacios vacíos existentes, por medio de esto es posible establecer la relación agua-aire (Rivera, Carfagno, & Eiza, 2017). El nivel de porosidad puede tener repercusiones en el flujo de calor mediante las fases sólidas y fluidas por separado, adicionalmente del intercambio de calor presente entre las dos fases (Wang & Fox, 2020).

Las modificaciones que se ocasionan como consecuencia de la distribución y dimensión de los poros, al igual que la porosidad existente en los suelos debido a la compactación, son de mucha importancia para la circulación de calor, agua y aire; después de algún tiempo se van a producir variaciones en la porosidad del suelo (Fu, Tian, Amoozegar, & Heitman, 2019).

2.1.5. Infiltración

La propiedad encargada de regular el deslizamiento superficial del agua es la infiltración, esto es resultado de procesos como la erosión y la contaminación, proceso que dispone de gran inestabilidad espacial, y generalmente es posible encontrarla en asociación con las modificaciones que se producen en las características del suelo, la ubicación que este tiene en el paisaje o su profundidad, el uso y los métodos utilizados para su medición (Darder, Castiglioni, Andriulo, & Sasal, 2019).

Este indicador se ve afectado por las actividades agrícolas, incendios, cría de bovinos, y también como consecuencia de las especies leñosas exóticas que puedan estar presentes invadiendo el terreno, producto de esto, se va a producir una reducción de la capacidad de mitigación en precipitaciones intensas (Karlin et al., 2019). Además de las escalas de medición existentes, existen otros factores involucrados en la infiltración del suelo (Lozano et al., 2020).

Resulta de vital importancia el cálculo de parámetros de infiltración y escurrimiento dependiendo del tipo de suelo y de la vegetación existente, esto hace posible la distinción entre el impacto ejecutado por los cambios en el uso del suelo al momento del recuento hídrico; en aquellos suelos que presentan textura franca también es posible que se presenten mermas en la capacidad de infiltración, cuando estos son intervenidos mediante el uso de prácticas agrícolas (Lozano et al., 2020).

2.1.6. Estructura

Entre las propiedades físicas de importancia para el suelo se encuentra su estructura, esta puede degenerarse como consecuencia de la labranza, se trata de un indicador fundamental que tiene relación con su función y condición, la clasificación de este resulta de tipo cualitativo y tiene como base tres propiedades: el grado, esta tiene relación con la simpleza para su desarticulación en sus unidades estructurales, la clase de tamaño constituye el tamaño y forma de su constitución, y el tipo, el cual se refiere a la forma de una unidad (Bagnall, Jones, Balke, & Morgan, 2020).

El suelo y su degradación cuentan con una naturaleza oculta, lo cual conlleva acarrea problemas que pueden ser más específicos, entre estos, el escaso crecimiento del cultivo o el nivel de filtración del agua, las cuales en ocasiones son imputadas a otras causas (García et al., 2020). Es posible que se presenten diferencias, esto dependerá de factores como las condiciones climáticas, uso o profundidad del suelo, tipo de suelo, también es posible observar modificaciones que se presentan con el tiempo, estas en su mayoría se presentan en las capas superficiales (FAO, 2017).

Los diferentes horizontes del suelo, cada uno de ellos cuenta con una estructura diferente, así, la estructura correspondiente al horizonte A es más fina, mientras que en el B se puede identificar una más compacta; los agregados son masas muy pequeñas que forman parte de la estructura del suelo, estas se unen con otras por medio de la materia orgánica (FAO, 2017).

Los agregados que forman parte del suelo, al igual que los poros, estos últimos son los lugares existentes entre las partículas del suelo; los agregados consisten en partículas que se encuentran localizadas pegadas entre sí, estas se encargan de manipular la materia orgánica como si se trataran de un pegamento (FAO, 2017).

2.1.7. Humedad del Suelo

Por medio de la humedad disponible en el suelo se expresa su disposición de agua para el adecuado desarrollo de la vegetación, por esta razón existen rangos de aceptabilidad de humedad, cualquier modificación que se produzca puede afectar al cultivo, como en cuanto a la velocidad con la que germina, su desarrollo radicular, es una variable

fundamental para tener un óptimo rendimiento en los cultivos (Yang, Wang, Lazim, Shen, & Anagnostou, 2021).

Los niveles de humedad pueden afectar tanto la producción como el mantenimiento de los cultivos, este parámetro bien utilizado puede optimizar el beneficio de los cultivos, por lo que es considerado de fundamental importancia para mantener costos de producción adecuados, esto ha hecho que sea producto de monitoreo constante con la finalidad de mejorar el rendimiento (Chatterjee, Roychowdhury, Singh, Singh, & Hazra, 2020).

Las constantes modificaciones que se pueden hacer presentes en los niveles de humedad, tienen su origen en la presencia o carencia de oxígeno, se modifica el estado de oxidación de varios iones y compuestos, los puentes de hidrógeno resultan ser importantes mecanismos al momento de que se produzca la adsorción de los pesticidas no iónicos (Rodríguez, McLaughlin, & Pennock, 2019).

El suelo y su capacidad para absorber humedad es un símbolo de la relación suelo-agua, tener conocimiento sobre esto va a permitir concebir el funcionamiento de los métodos hidráulicos que están presentes en el suelo, esto tiene altos costos económicos y en tiempo de trabajo, esto se debe al número de muestras requerido (Bejar, Cantú, Yáñez, & Luna, 2020).

2.2. Componentes del suelo

El color que presenta el suelo va a depender de sus componentes, puede observarse variaciones de acuerdo a los niveles de humedad, el grado de materia orgánica presente, y los niveles de oxidación que presenten los minerales disponibles, sean estos orgánicos e inorgánicos, además de esto, dependen de la putrefacción de los residuos orgánicos que provienen de los vegetales y animales, este proceso es llevado a cabo por macro y microorganismos encargados de su desintegración y resintetización, lo cual es posible gracias a la humedad y temperatura (García, Sequeira, & Álvarez, 2020).

Uno de los componentes de mucha importancia para el suelo son los coloides, estos constituyen partículas, sean de origen mineral u orgánico, tienen como una de sus principales características la asignación de cargas eléctrica, las cuales no están neutralizadas, y pueden ser negativas como positivas (Toledo, 2016).

2.3. Compactación de los suelos

Se define a la degradación como el agotamiento del suelo a largo plazo, teniendo como base la productividad y función a la que se dedica el ecosistema y que es producida por los cambios que se producen; el suelo no cuenta con capacidad para autorecuperarse, es decir, es necesaria la ayuda del exterior, existen diferentes factores físicos que ocasionan su deterioro, uno de estos es la compactación, la cual se considera la trascendental causa de degradación (García C., 2020).

La compactación puede convertirse en una verdadera amenaza para la productividad agrícola, la resistencia a la penetración presente en altos niveles y escasos de oxígeno disponible en el aire del suelo, todo esto va a dejar como resultado la disminución del crecimiento radicular, factor que va a limitar la accesibilidad al agua y nutrientes, finalmente esto se reflejará en los niveles de productividad (Colombi & Keller, 2019).

Algunas actividades como son el tamaño y peso de la maquinaria que se utiliza para la producción agrícola, al igual que el clima en niveles extremos, pueden llevar a que se compacte el suelo, viéndose afectado el rendimiento de las plantas; se estima que en regiones como la Unión Europea existen cerca de 33 millones de hectáreas de tierra agrícola degradadas como consecuencia de la compactación del suelo (Hargreaves et al., 2019).

El suelo dispone de atributos químicos, físicos y biológicos, los cuales se ven afectados por la constante utilización de la maquinaria agrícola, esta va a ocasionar su compactación, descomponiendo así la materia orgánica, en la que se encuentra presente la biota del suelo, que es de fundamental importancia al momento de que se produce el ciclo de los nutrientes y su abastecimiento a las plantas (Carlesso et al., 2019).

2.3.1. Resistencia mecánica a la penetración

Comprender el tema de la compactación del suelo de manera práctica es posible por medio de la determinación de aquellos efectos que puede ocasionar la densidad aparente, al igual que la resistencia a la penetración (Carlesso et al., 2019), variable que servirá al momento de caracterizar al suelo y su situación física, esto se debe complementar con diferentes variables (Elisei, 2017).

Una variable de interés es sin duda la resistencia mecánica, esta dispone de interacción con las demás propiedades del suelo, entre las cuales es posible identificar la textura, humedad, densidad aparente y porosidad (Ramos, Martínez, García, & Hernández, 2020).

Un factor que puede resultar determinante al momento del desarrollo vegetativo es la resistencia a la penetración, si esta se encuentra en niveles elevados va a imposibilitar la adecuada porosidad, esto a su vez va a disminuir los niveles de aireación, drenaje y al mismo tiempo la acumulación de líquido, las consecuencias de esto van a ser que la planta no tenga las posibilidades de alcanzar los niveles de líquido, se va a observar dificultades con el desarrollo radicular al momento que este penetra el suelo, esto va a hacer que la planta no consiga los nutrientes esenciales para el desarrollo (Gómez & Hoyos, 2020).

2.3.2. Penetrómetro

El penetrómetro es una estructura que dispone de una forma de proyectil, este cae de manera libre al suelo, consiste en una prueba muy rápida, de bajo costo y muy versátil, por medio de este aparato es posible llevar un registro de la aceleración y las presiones de poros (Zambrano & Yerro, 2020). Resulta fácil para manipular y es muy rústico, este certifica las diferentes lecturas de resistencia a varios niveles de compactación y humedad del suelo (García & Vidal, 2020).

Este instrumento se suele utilizar con la finalidad de proveer el estimado de la presión e impulsar un cono de acero verticalmente en el perfil del suelo; los resultados de estimación de resistencia que se obtengan mediante este aparato servirán de mucha utilidad al momento de realizar estudios de manejo del suelo y la elongación de las raíces, los resultados deberán ser obtenidos en puntos de tiempo cuidadosos (Zhang, Gao, Ren, & Whalley, 2020).

2.3.3. Tipos de penetrómetros

Mediante el uso de los penetrómetros es posible medir la resistencia que tiene el suelo frente a la penetración vertical, pueden ser de cono estático (SCP) y de cono dinámico (DCP):

- **Penetrómetro de cono estático (SCP):** estos serán empujados constantemente en el suelo, la fuerza que se ocupe será continua y se procederá a aplicarla de manera

manual, también se lo puede hacer mediante la energía hidráulica; su fabricación es económica, resulta relativamente fácil para ser transportado y para su uso en el campo (Singh, Trivedi, & Kumar, 2020).

Esta prueba es utilizada con frecuencia para realizar una caracterización del suelo, su uso es rentable, y gracias a este es posible la elaboración de perfiles del suelo, al igual que la evaluación de sus propiedades de resistencia; el principio de este instrumento consiste en el impulso hidráulico mediante una punta con ángulo cuyo vértice es de 60° en el suelo, la tasa de penetración deberá mantenerse constante a 20 mm / s, en ese mismo momento se empezará a registrar de manera electrónica los niveles de resistencia de esta punta a la frote y a la influencia del agua de los poros (Schnaid, Lourenço, & Odebrecht, 2017).

- **Penetrómetro de cono dinámico (PCD):** en este instrumento se encuentra una celda de carga y un acelerómetro presente en su punta, por medio de este es posible realizar mediciones de consultas dinámicas de fuerza y velocidad en el tiempo que transcurra, es de transportación portátil, además permitirá la obtención del índice de penetración de cono dinámico (DCPI), el cual se utiliza como índice de fuerza (Lee, Yeob, Hong, & Byun, 2019).

Los primeros de estos penetrómetros fueron diseñados para ser operados por medio de un martillo de manera automática, el cual tenía la función de hacer entrega de energía cinética continuamente por cada golpe, se utiliza con la finalidad de comprobar los niveles de resistencia que presenta el suelo cuando se combina con los otros parámetros del dispositivo, entre estos el diámetro y el ángulo del cono (Beckett et al., 2018).

Este instrumento es utilizado ampliamente para obtener estimaciones rápidas en relación con la calidad del material y la resistencia a la penetración que este presenta, de esta manera se tiene una proporción graduada de energía de impacto que suministra el peso que cae en la superficie del suelo (Amadi, Sadiku, Abdullahi, & Danyaya, 2018).

2.4. Láminas de riego

El cuerpo de agua que pasa por el suelo en determinado espacio de tiempo constituyen lo que se conoce como láminas de riego, la infiltración de líquidos es condicionada por propiedades del suelo como son la textura y estructura; si se desea establecer la velocidad

con la que los líquidos se infiltran, al igual que la lámina que se ha infiltrado, el método utilizado es el de doble cilindro, método conformado por dos cilindros cuyo material es el acero, con estos se perforará la superficie del suelo mediante el uso de un martillo e intentando no modificar la disposición del suelo (Ortíz, 2019).

La idea de medir los volúmenes de agua que están presentes en el suelo se realiza para instituir la frecuencia de riego para un cultivo en particular, al igual que la lámina que se deberá reponer, estos aspectos son dependientes de la capacidad de acumulación del agua, del peso aparente que se determine del suelo, así como la hondura del lugar donde se va a infiltrar el líquido; las láminas se expresan mm (Duarte & González, 2020).

La aplicación o no de una lámina de riego en particular tiene beneficios para el cultivo que se pueden medir mediante el análisis del rendimiento y el costo para su implementación (Quintero, 2019); esta lámina de riego puede ser neta, esto es la masa de agua gastada para el cultivo de manera teórica, esta deberá ser repuesta mediante el sistema de riego; mientras que la lámina de riego bruta, esta va a ser el volumen que realmente consume la planta, y que deberá ser repuesta (Jiménez, 2019).

2.5. Comportamiento radicular del cultivo de Banano según la compactación y humedad del suelo

El banano, por tratarse de una planta monocotiledónea, su sistema radicular es fibroso, en este hay una raíz embrionaria que proviene de la semilla y que es de interés para el proceso de germinación, al igual que las principales etapas del desarrollo (Shekhar, Stockle, Thellmann, & Vermeer, 2019). El sistema radicular superior se produce hasta de cinco metros, mientras que las inferiores se introducen a profundidades de hasta 1.5 metros (Guerrero, 2016).

El sistema radicular presenta una competencia por la adquisición de los recursos hídricos; las precipitaciones son inconstantes y la consecuencia de esto es la presencia de estrés hídrico, lo cual va a limitar la productividad del banano y pérdidas en el rendimiento, las pérdidas que se pueden presentar llegan hasta el 65%, esto ha hecho que sea cada vez más frecuente la financiación en sistemas de riego que funcionan con mayor eficiencia y mejoran los niveles de productividad mediante programaciones mejoradas (Panigrahi, Thompson, Zobelzu, & Knox, 2021).

El crecimiento de las raíces de la planta del banano puede verse afectada por algunos factores, entre estos, el inadecuado manejo del suelo agrícola, esto va a traer como consecuencia la merma de espacios porosos o también la compactación, lo cual va a producir un menor y más lento movimiento de líquidos, se va a reducir el nivel de aireación, esto va a afectar a las raíces y también a la fauna presente en el suelo, además de a la productividad (Gía, 2014).

Las musáceas, debido a sus características fisiológicas son demandantes de gran cantidad de agua y fertilizantes, los cuales se deberán administrar considerando la humedad y nutrientes presentes en el suelo (Castro & Chiquillo, 2016).

La producción de banano demanda de elevadas cantidades de nutrientes, por lo que el productor de banano necesita de fertilización edáfica en grandes cantidades, de esta manera le es posible cubrir los requerimientos que la planta necesita durante el ciclo productivo, sin embargo, esto ocasiona un desbalance de sus elementos esenciales en situación intercambiable y en solución, ocasionando así el bloqueo de nutrientes para que estos no se puedan aprovechar totalmente (Carriel, 2020).

2.6. Fertirriego en relación a las raíces de banano

La aplicación de nutrientes y agua al mismo tiempo se conoce con el nombre de fertirriego, el objetivo de esta metodología consiste en la provisión al cultivo de agua y nutrientes que la planta necesita, y así pueda desarrollarse con normalidad, este debe convenirse teniendo como base el cultivo, la época del año, su nivel de desarrollo y el objetivo que tenga el sistema productivo, esto hace que sea fundamental el conocimiento de las particularidades que tiene el agua (Mazuela & de la Riva, 2013).

En los sistemas de riego continuo, la fertirrigación puede ser una opción adecuada, aunque también se pueden adaptar a diferentes sistemas de riego, para esto es necesario de adecuados sistemas de dosificación y depósitos adecuados en los cuales va a estar presente la solución en la cual se van a añadir los nutrientes y los fertilizantes a los que se va a recurrir, cuyas características de reacción de pH, pureza, concentración y solubilidad, además hay que considerar las características de calidad del agua, el calcio y los bicarbonatos presentes (Villalobos, Quemada, & Delgado, 2016).

El sistema de raíces que tiene el banano es fasciculado y fibroso, su constitución es de raíces primarias, secundarias, terciarias, también posee pelos absorbentes, sus raíces presentan un rápido desarrollo y son muy sensibles a la ausencia o incremento hídrico, debido a que los primeros 65% se presentan en los 30 centímetros principales del espacio del suelo, su textura es de mucha importancia en el cultivo de banano, esto se deberá considerar algunos factores, entre estos la estructura, resistencia a la penetración, drenaje y densidad aparente del suelo (Sánchez & Mira, 2013).

Las raíces del banano son superficiales, la capa en la que están distribuidas es de entre 30 y 40 cm, en su mayoría se encuentran concentradas en los 15-20 cm, tienen una coloración blanca, diámetro de 5 a 8 mm y longitud entre 2,5 y 3 metros lateralmente y pueden llegar hasta 1,5 metros en fondo (Peñañiel, 2020).

Para utilizar la fertirrigación en la producción de banano se deben seguir algunos principios, estos son: la colocación de fertilizantes nitrogenados y potásicos, considerando las demandas del cultivo, esta puede tener algunas variaciones tomando en cuenta la etapa de desarrollo de la planta y la temperatura que se presente en el lugar donde se produce el cultivo; los suelos con características ácidas, lo ideal es el uso de fertilizantes con nitratos, esto hace posible evitar la acidificación en el suelo y al mismo tiempo la toxicidad del aluminio; el monitoreo de las plantas es fundamental para el momento de instaurar las necesidades de nitrógeno (Kafkafi & Tarchitzky, 2012).

2.7. Fertilización edáfica en relación a las raíces de banano

Para realizar la fertilización edáfica se debe utilizar fertilizante sólido en la periferia de la planta, se debe recurrir para esto a las herramientas con las que se disponga, entre estas, palas y bultos, además, existen métodos a los que se recurre al momento de incorporar los fertilizantes edáficos, como son el voleo, cobertera, entre otros, una vez realizado esto, la planta por medio de su sistema radicular lo asimilan y reparten a sus diferentes órganos vegetativos (Colorado, 2010).

El sistema radicular del banano tiene sensibilidad al estrés físico, esto se debe a la ausencia de oxígeno, la disminución o incremento de agua, produciéndose así problemas como la compactación y la resistencia mecánica, se va a originar una lámina impermeable que va a evitar que los minerales ingresen a la solución del suelo, la penetración de las

raíces en el suelo no se produce con la normalidad con la que lo hace en condiciones normales, por lo que se reduce la densidad de estas, esto es muy dificultoso al momento de realizar la fertilización (Hidalgo, 2016).

2.8. Geoestadística

Los softwares con capacidad de análisis geoestadística tales como Surfer, ArcGis, R studio, etc., se utilizan para generar mapas de variabilidad espacial de propiedades de los suelos; desarrollando representaciones gráficas donde se evidencia la variación cuantitativa de los cambios en el predio.

Estos resultados son utilizados por los agricultores para efectuar estrategias y mejoras en las labores culturales realizadas en el cultivo, además de influir en la toma de decisiones de la agricultura de precisión. (Erazo & Sandoval, 2015)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación y caracterización del área de estudio

La Finca Márquez es el área donde se realizó el estudio, se encuentra situada en la parroquia La Peaña del cantón Pasaje, ubicada en el Km 15 de la vía Machala-Pasaje, provincia de El Oro.

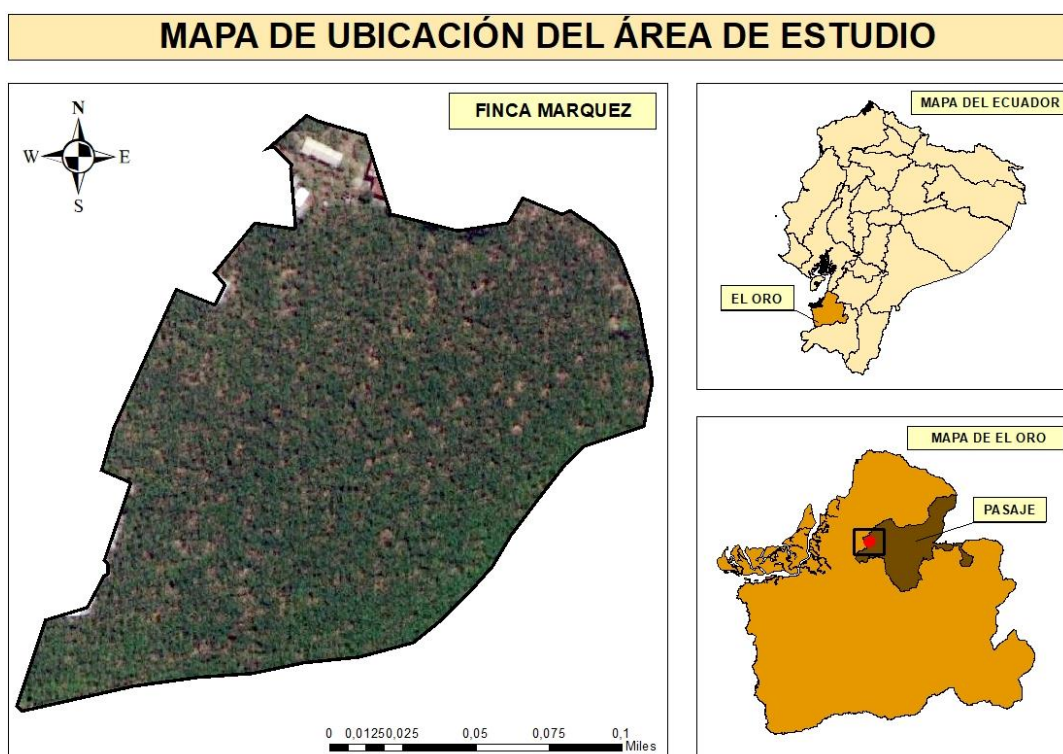


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Fuente. Autor

Ubicación geográfica:

- Datum: WGS 84; Zona: 17 Sur
- Latitud: 620701
- Longitud: 9636128

La zona de estudio presenta un clima tropical húmedo cálido, con una precipitación que oscila entre 200 – 1000 mm anuales, una temperatura media mensual de 26 °C, de velocidad media de vientos 2 a 4 m* s⁻¹, y una humedad relativa de 83%.

3.2. Materiales, equipos y reactivos

Materiales

- Fundas, plástico de embalaje
- Cilindros de hierro galvanizado
- Pala, cuchillo aserrado, espátula
- Balde plástico
- Tamiz
- Balón aforado
- Picnómetro
- Cinta métrica

Equipos

- GPS
- Estufa
- Penetrómetro FieldScout SC-900
- Bomba de vacío
- Balanza electrónica

3.3. Metodología para determinar la ubicación del área de muestreo

3.3.1. Ubicación de toma de muestras y análisis de laboratorio

Se identificó cuatro módulos de riego, estos fueron georreferenciados mediante GPS; al inicio, en la mitad y al final de cada módulo se procedió a realizar respectivamente una calicata en forma de escalera de 50 cm de profundidad con escalones en estratos cada 10cm, en los cuales se tomó una muestra de suelo por estrato. Obteniendo un total de 12 puntos de interés para análisis de propiedades físicas en laboratorio, en complemento de la medición de la resistencia mecánica a la penetración en dichos puntos.

En cuanto a la determinación de la variabilidad espacial de la RMP se determinó 31 puntos de muestreo de forma al azar, en lugares de mayor representatividad, estimando el valor en el perfil de suelo por estratos de 0 a 10cm, 10 a 20cm, 20 a 30cm, 30 a 40cm y 40 a 50cm de profundidad.

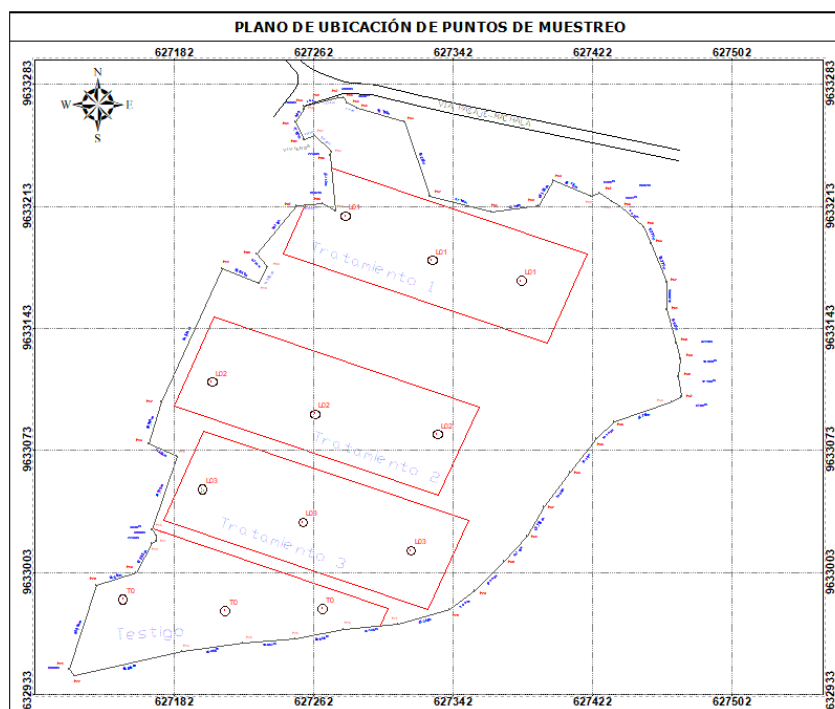


Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo Finca Márquez

Fuente. Autor

- Se realizó la toma de muestras de los estratos 0-10 10-20 20-30 30-40 40-50cm de profundidad de cada calicata.
- Se introdujo en el centro de cada escalón un cilindro de hierro galvanizado de $h=5\text{cm}$ y $\varnothing=5.4\text{cm}$, presionando para su ingreso por completo y ubicando otro cilindro sobre el anterior, se presiona para lograr que el primer cilindro quede ubicado en el centro de cada estrato con la finalidad de obtener una muestra sin alterar.
- Se realiza surcos alrededor del cilindro, y se introduce la pala desde la base del escalón para retirar el cilindro sin alterar la muestra.
- Haciendo uso del cuchillo aserrado se procede a enrasar los bordes de cada cilindro y se embala para su traslado a laboratorio.

3.4. Determinación de las propiedades físicas del suelo

En el laboratorio de suelos perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias, se procesó las muestras de suelo recolectadas, en la **Tabla 1** se describe el método utilizado para cada variable.

Tabla 1. Métodos y variables de muestras procesadas

Variable	Método	Parámetro
Densidad Real	Picnómetro	Dr (g*cm ⁻³)
Densidad Aparente	Cilindro metálico	Da (g*cm ⁻³)
Porosidad Total	Relación de densidades	Pt (%)

3.5. Registro de la resistencia mecánica a la penetración del suelo mediante el penetrómetro digital FieldScout Sc 900.

Las lecturas de RMP se efectuaron cada 15 días a través del penetrómetro FieldScout Sc 900, se introdujo a una velocidad moderada y como máxima de 182 cm* min⁻¹ con la finalidad de tomar una correcta lectura, el equipo registra la resistencia mecánica a la penetración del suelo cada 2.5 cm de profundidad. Los datos se presentan en kPa, cuya precisión oscila ± 1.25 cm y ± 103 kPa; además el dispositivo almacena el historial de datos por lo que es posible observar el comportamiento en el transcurso del tiempo de la compactación del suelo y de la incidencia de la aplicación de fertilizantes.

3.6. Análisis estadístico

Los datos recolectados en laboratorio de suelo y del penetrómetro se procesaron mediante el software IBM SPSS STATISTICS 23 (2014), se efectuó un análisis exploratorio para cada variable en estudio y de tal forma evidenciar la distribución y dispersión de datos; mediante diagramas de cajas, gráfico de líneas múltiples y tablas que permiten apreciar de manera visual y numérica el comportamiento de las variables.

3.7. Análisis geoestadístico

La base de datos es cargada en el software Surfer 20, programa mediante el cual se determinan semivariogramas experimentales de las variables en estudio. Se obtuvo los errores cuadrados medios, de igual forma se realizó la validación de métodos aplicables predeterminados con anterioridad en ArcMap 10.5 a través de esto se procede a establecer los coeficientes de Nash y Pearson.

3.8. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Este coeficiente permite normalizar y ajustar los mínimos cuadrados, además determina la magnitud relativa de la varianza residual comparándose con la varianza de los datos obtenidos. El ajuste perfecto de este criterio es determinado por la unidad y cuando es negativo indica un modelo pobre que no se ajusta a los datos observados, se aplica la siguiente ecuación (1) (Cristóbal et al., 2014)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^N Q_{oi} - Q_{si}}^2 \quad 1)$$

3.9. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson y es empleado para realizar un modelo de ajuste al conjunto de datos, da la relación de la variación de la variable (Y) con respecto a la variable (X). El modelo presenta un ajuste perfecto en cuando es cercano o igual a 1, y pierde su capacidad predictiva cuando se aleja de la unidad. (Martínez, 2005).

3.10. Error cuadrático medio (RMSE)

El RMSE proporciona una evaluación de diferencia entre los datos simulados y los datos obtenidos, las diferencias individuales obtenidas se denominan residuos; en cuanto el error cuadrático medio presenta valores más aproximados o iguales a cero da como resultado un ajuste perfecto. (Cristóbal et al., 2014)

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{xi}^2}{n}} \quad 2)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{yi}^2}{n}} \quad 3)$$

3.11. Análisis de componentes principales

La RMP, Da, Dr, y Pt en función de los tratamientos y de las profundidades estudiadas son las variables que fueron analizadas mediante el procedimiento de Análisis de Componentes Principales (ACP) mediante el paquete estadístico IBM SPSS STATICS 23 (2014), a través de una tabla se agruparon y definen la correlación entre variables.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis exploratorio de la resistencia mecánica a la penetración y propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo tales como RMP en conjunto a D_a , D_r y P_t , se integran como índice para determinar un grado de compactación y a su vez manifestar problemas de desarrollo radicular (Montoya et al., 2017).

Los diagramas de cajas y bigotes de la **Figura 3** presenta el análisis exploratorio de datos de cuatro variables de estudio como resistencia mecánica a la penetración, porosidad total, densidad aparente y densidad real. Dichas propiedades se analizaron en estratos y en función de tres tratamientos y un testigo, los cuales no presentaron outliers o datos atípicos en ninguna profundidad de estudio, asegurando así la representatividad de la muestra.

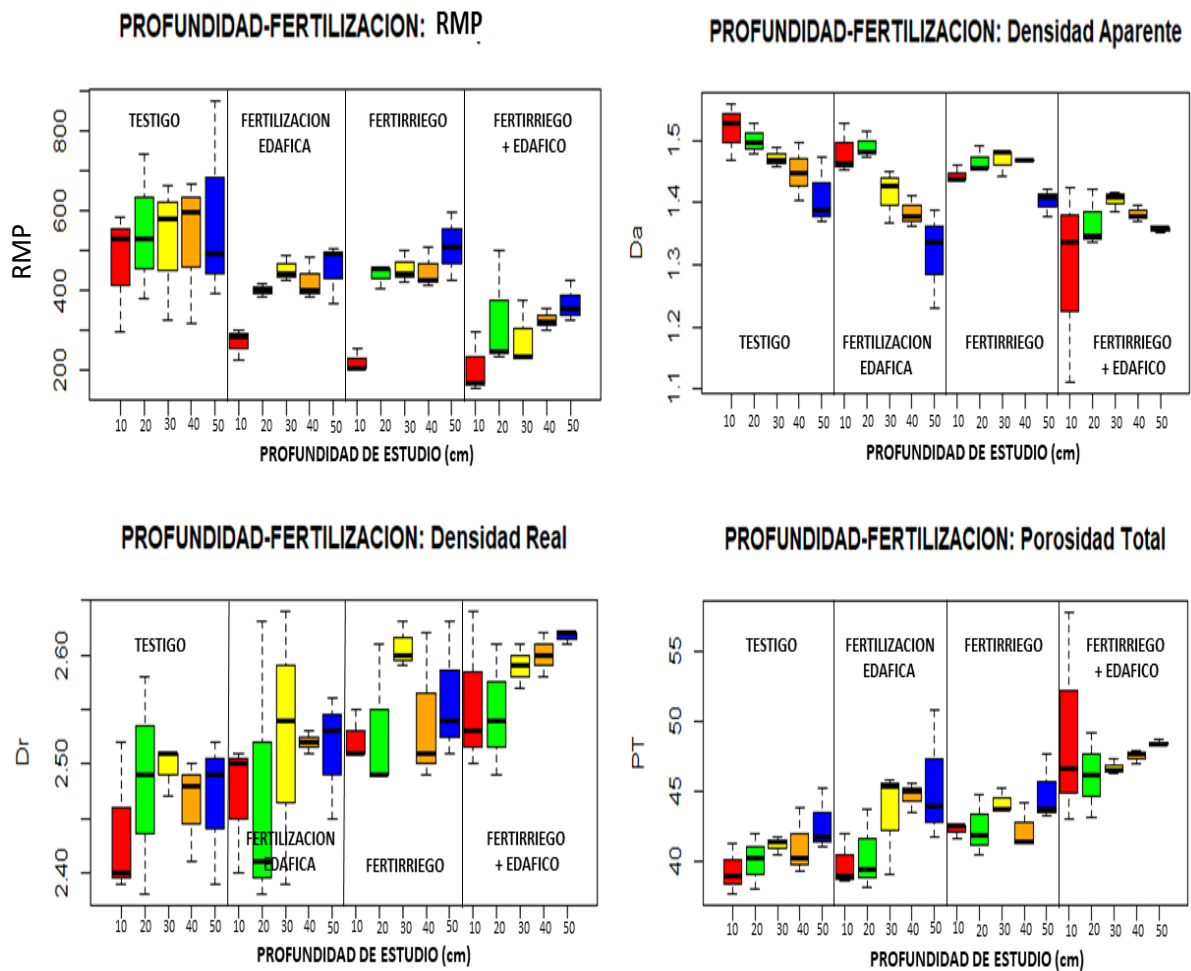


Figura 3. Diagramas de cajas de cada variable y tratamiento en 5 perfiles de estudio.

Se comprobó los supuestos de normalidad de datos y homogeneidad de varianza por medio de la prueba de Shapiro Wilk y el Test de Levene de cada variable en cada estrato de estudio. Como se observa en la **Tabla 2** todos los conjuntos de datos expresaron un P-valor mayor al nivel de significancia (0.050), asegurando que los datos de las propiedades físicas en los diferentes estratos siguen una distribución similar a la distribución normal (Carmona Arce & Carrion Rosales, 2015).

Tabla 2. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza

Variables	Profundidad del suelo (cm)	Test de Levene	Prueba de Shapiro Wilk
		P- valor	P-valor
Da (g*cm-3)	0-10	0.052	0.051
	10-20		0.051
	20-30		0.575
	30-40		0.203
	40-50		0.184
Dr (g*cm-3)	0-10	0.871	0.052
	10-20		0.054
	20-30		0.051
	30-40		0.053
	40-50		0.052
Pt %	0-10	0.123	0.057
	10-20		0.729
	20-30		0.387
	30-40		0.643
	40-50		0.284
RMP (kPa)	0-10	0.952	0.059
	10-20		0.197
	20-30		0.806
	30-40		0.253
	40-50		0.060

Cumplidos los supuestos de normalidad y homocedasticidad se realizó un análisis de varianza factorial para cada conjunto de datos, para determinar la existencia o no de

diferencias significativas entre los tipos de Fertilización y entre las Profundidades de estudio.

En la **Tabla 3** se observa los resultados de la prueba paramétrica ANOVA factorial, los cuales indican que para las profundidades de estudio existen diferencias significativas en las variables RMP y Da puesto que expresaron valores de P-valor menor al nivel de significancia (0.050). Caso contrario a lo expresado por las variables Dr y Pt en las cuales se observó que existe homogeneidad en todas las profundidades de estudio ya que su P-valor fue mayor al nivel de significancia.

En cuanto a los tipos de Fertilización, se observó que existen diferencias significativas entre los tratamientos para todas las variables de estudio, puesto que el P-valor en cada conjunto de datos fue menor al nivel de significancia.

La interacción entre las profundidades y los tipos de fertilización expresaron diferencias significativas en la variable Da siendo el nivel de significancia mayor a su P-valor, en las variables RMP, Dr y Pt no se observó diferencias significativas correspondientes a la correlación entre profundidad y Fertilización.

Tabla 3. Análisis de varianza factorial para todas las variables de estudio

	RMP (P-valor)	Da (P-valor)	Dr (P-valor)	Pt (P-valor)
Profundidad	0.003	0.002	0.232	0.066
Fertilización	0.000	0.000	0.000	0.000
Profundidad*Fertilización	0.983	0.031	0.995	0.769

La **Tabla 4** presenta los estadísticos descriptivos de la variable Resistencia mecánica a la penetración, tomando en cuenta todos los estratos estudiados y en función de los distintos modelos de fertilización, en los que resalta dentro del T3 (Fertilización edáfica+Fertirriego) la media más baja de 302.06 kPa y el valor mínimo de 157.15 kPa, el valor máximo medido de 872 kPa corresponde al T (Testigo); además se observó que en el estrato de 0-10cm se obtuvo 292.32 kPa, siendo la menor RMP de entre todos los estratos estudiados.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la variable Resistencia mecánica a la penetración

RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN (kPa)									
	FERTILIZACION				PROFUNDIDAD				
	T	T1	T2	T3	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Media	530.29	400.10	415.14	302.06	292.32	429.21	426.96	431.44	479.56
Mediana	528.75	402.37	427.37	302.43	270.90	411.43	433.37	408.43	458.37
Desv. Tip.	167.20	81.19	111.69	93.40	132.70	130.86	126.69	113.72	146.35
Asimetría	0.305	-0.722	-0.828	0.391	1.460	0.879	0.050	0.912	1.889
Curtosis	-0.385	0.067	0.296	0.079	1.440	2.361	0.029	0.114	0.458
Mínimo	296.05	224.75	204.2	157.15	157.15	236.13	229.19	302.44	325.75
Máximo	872.63	503.13	596	501	581.05	740.00	662.38	664.81	872.63
CV (%)	31.53	20.29	26.91	30.92	45.40	30.49	29.67	26.36	30.52

A partir del estrato 0-10cm se observó un aumento significativo de la RMP, llegando a obtenerse en el estrato final como valor máximo 872.63 kPa, profundidad a partir de la cual se encuentra una impedancia mecánica para el normal desarrollo radicular (Cortez et al., 2018)

La alta variabilidad dentro de los estratos 0-10cm y 10-20cm presenta una situación similar a la propuesta por Ramírez-López et al., (2008), según lo mencionado por Palacio et al., (2018) el valor crítico en la mayoría de los casos se presenta en un rango de 1000 a 2000 kPa, alrededor de estos valores se originan problemas de compactación en el suelo y dificultades para el desarrollo de la cabellera radicular

La RMP observada en la **Figura 4** de un perfil de suelo de 50 cm de profundidad, presenta un notorio incremento en cuanto más profundiza hasta alcanzar el estrato final, evidenciando que los valores más bajos pertenecen al Tratamiento 3 de (Fertilización edáfica+Fertirriego) en concordancia a lo propuesto por Hernández Díaz & Chailloux Laffita, (2014) el uso optimizado de aplicación de nitrógeno y potasio mediante fertirrigación permite principalmente disminuir la compactación generada por una fertilización irracional.

El empleo de enmiendas edáficas de macro y micronutrientes en conjunto con la fertirrigación representa una alternativa estratégica para revertir problemas de

compactación y mejorar las propiedades físicas del suelo, permitiendo así un correcto desarrollo del sistema radicular (Sun et al., 2020).

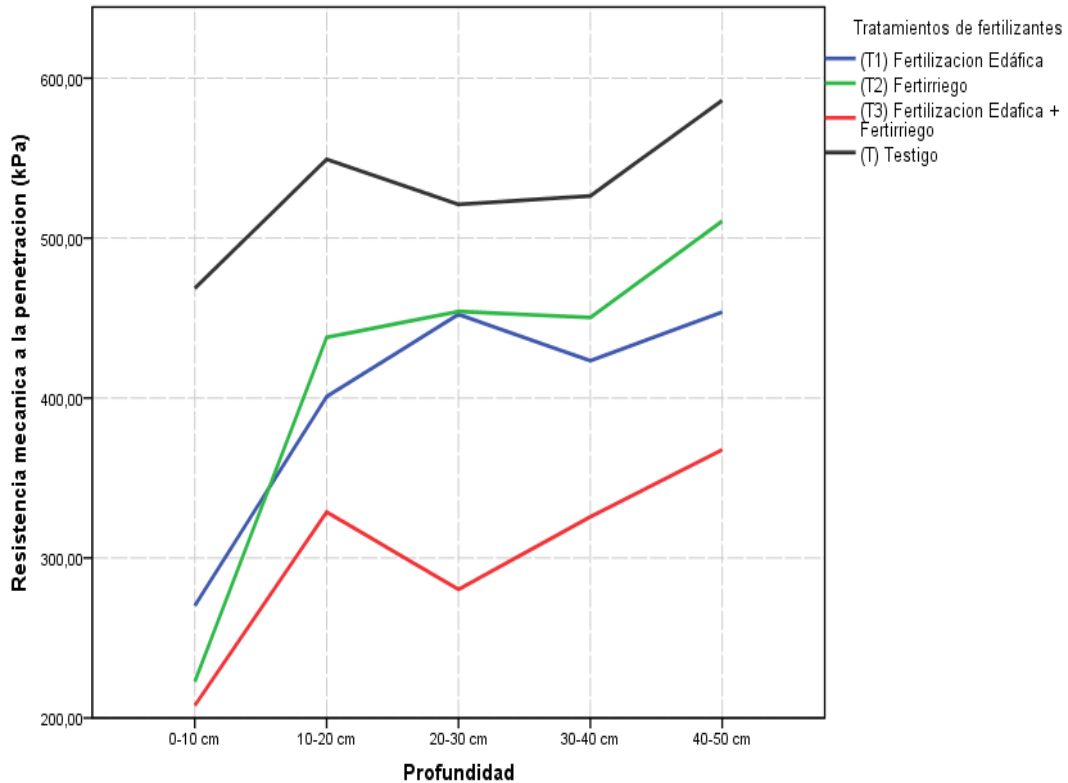


Figura 4. Resistencia mecánica a la penetración (kPa) en un perfil de suelo de 50cm.

En la **Tabla 5** se presenta los estadísticos descriptivos de la variable Densidad aparente, en la que se evidencia una similar dispersión de datos en todas las profundidades y tratamientos estudiados; además resalta que el T3 (fertilización edáfica + fertirriego) presentó el valor más bajo con ($1.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), en el estrato de 10-20cm se encuentra un valor máximo de ($1.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y al final del perfil de 50cm la Da desciende hasta ($1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), datos semejantes a los propuestos en la investigación por Montoya et al., (2017) el rango óptimo para un correcto desarrollo de la cabellera radicular oscila de una densidad aparente comprendida entre ($0.7\text{-}1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (Rose, 2005)

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la variable Densidad aparente

DENSIDAD APARENTE (g*cm⁻³)									
	FERTILIZACIÓN				PROFUNDIDAD				
	T	T1	T2	T3	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Media	1.47	1.42	1.45	1.36	1.43	1.46	1.44	1.42	1.37
Mediana	1.47	1.43	1.45	1.37	1.46	1.48	1.45	1.41	1.37
Desv. Tip.	0.05	0.08	0.03	0.08	0.12	0.06	0.04	0.05	0.06
Asimetría	-0.44	-0.83	-0.96	-2.82	-2.10	-1.18	-0.55	0.28	-0.96
Curtosis	-0.03	1.06	0.79	0.95	0.54	0.61	-0.66	-1.53	0.33
Mínimo	1.37	1.23	1.38	1.11	1.11	1.34	1.37	1.36	1.23
Máximo	1.56	1.53	1.49	1.42	1.56	1.53	1.49	1.50	1.47
CV (%)	3.55	5.45	2.08	5.51	8.13	4.14	2.71	3.29	4.21

La variable Densidad real evidencia mediante la **Tabla 6** una baja variabilidad que según Pearson se consideran como valores homogéneos, dichos estadísticos expresan que el T3 (fertilización edáfica + fertirriego) presentó la media más alta con (2.60 g*cm⁻³), mientras que el T1 (Fertilización edáfica) arrojó el menor valor (2.48 g*cm⁻³); el estrato correspondiente de 20-30cm proyectó el mayor valor (2.57 g*cm⁻³) de todo el perfil estudiado, datos semejantes a los obtenidos por Domínguez-Palacio & Pozo-Gálvez, (2018) cuyas densidades de partículas no tienen diferencias significativas y mantienen valores similares a lo largo de todo el perfil de estudio (Viciedo et al., 2018)

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de la variable Densidad real

DENSIDAD REAL (g*cm⁻³)									
	FERTILIZACION				PROFUNDIDAD				
	T	T1	T2	T3	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Media	2.49	2.48	2.55	2.60	2.50	2.52	2.57	2.53	2.51
Mediana	2.50	2.50	2.50	2.63	2.50	2.50	2.63	2.50	2.50
Desv. Tip.	0.06	0.08	0.07	0.06	0.05	0.09	0.09	0.08	0.10
Asimetría	-0.05	0.40	0.46	-1.18	0.36	-0.14	-0.97	-0.02	-0.06
Curtosis	1.75	-0.27	-0.29	-0.73	0.56	-0.85	-0.06	-0.42	-1.32
Mínimo	2.38	2.38	2.50	2.50	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38
Máximo	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
CV (%)	2.56	3.38	2.62	2.33	2.14	3.60	3.37	3.15	3.97

Los estadísticos descriptivos de la variable Porosidad presentados en la **Tabla 7**, demuestra que el T3 (fertilización edáfica + fertirriego) tiene el valor más alto con 47.58%, datos semejantes al estudio de Domínguez Palacio et al., (2018) la porosidad total cuando desciende del 50% empieza a manifestar problemas de compresión y de dificultades en el intercambio hídrico-gaseoso del suelo; el estrato final de 40-50cm presenta 45.36% de porosidad siendo un valor aceptable según lo mencionado por Hernández Jiménez Alberto et al., (2019) los estratos de suelo cuyos valores de porosidad total oscilen entre 40-45% presentan buen drenaje y buena condición de aireación parámetros que permiten un correcto desarrollo y profundización de raíces.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos de la variable Porosidad total

PORODIDAD TOTAL (%)									
	FERTILIZACIÓN				PROFUNDIDAD				
	T	T1	T2	T3	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Media	40.85	42.75	43.19	47.58	42.62	42.23	43.87	43.88	45.36
Mediana	41.07	43.52	43.20	47.34	41.79	41.90	44.48	44.01	44.59
Desv. Tip.	2.02	3.55	1.85	3.34	5.37	3.36	2.65	2.90	3.27
Asimetría	0.47	0.52	0.78	1.93	0.29	0.67	-0.53	-0.14	0.21
Curtosis	0.52	0.16	0.99	0.65	0.62	0.11	-0.98	-1.14	-1.43
Mínimo	37.68	38.12	41.41	43.03	37.68	37.94	39.08	39.26	41.07
Máximo	45.26	50.78	47.63	57.76	57.76	49.19	47.34	47.93	50.78
CV (%)	4.95	8.30	4.29	7.01	12.59	7.96	6.05	6.61	7.21

El valor menor de porosidad se encuentra en los primeros 20cm de suelo, fenómeno que está ligado a una alta densidad aparente en el mismo estrato **Tabla 5** y a una moderada y en ciertas mediciones alta RMP **Tabla 4**, evidenciándose también en la **Figura 4** el considerable aumento de la resistencia mecánica a la penetración de todos los tratamientos en los primeros 20cm de estrato. En cuanto aumenta la compactación del suelo, la estructura y propiedades físicas del suelo se perjudican siendo que la densidad aparente aumenta considerablemente y la porosidad total disminuye a gran escala. (Viciedo et al., 2018)

Las variables estudiadas fueron clasificadas en función del porcentaje de su coeficiente de variación según la **Tabla 8** propuesta por Warrick & Nielsen (1980)

Tabla 8. Clasificación de las propiedades físicas según el Coeficiente de variación

CV (%)	Clasificación de variables	Variabes físicas del suelo
<12	Variabilidad baja	Dr, Da
12-60	Variabilidad media	RMP, Pt
>60	Alta variabilidad	

4.2. Análisis multivariado

Se efectuó un análisis de correlación lineal de Pearson de las variables en estudio **Figura 5**, misma que presenta una correlación alta positiva (0.77) entre Dr y Pt esto indica que al aumentar la densidad real también aumenta la porosidad del suelo y el tamaño de los poros, mientras que la Da y Pt tienen una alta correlación inversa (-0.87) es decir que cuando la estructura física del suelo se menoscaba la densidad aparente va en aumento y la porosidad total disminuye (Viciedo et al., 2018)

La resistencia mecánica a la penetración expresa una correlación moderada positiva (0.32) con la variable densidad aparente y con la variable porosidad total presenta una correlación negativa (-0.31), de acuerdo a Gutiérrez Rodríguez Francisco et al., (2012) la alteración en incremento de la densidad aparente y la disminución del espacio poroso da como consecuencia el aumento de valores de la resistencia mecánica a la penetración del suelo, siendo esto un indicativo de problemas de compactación.

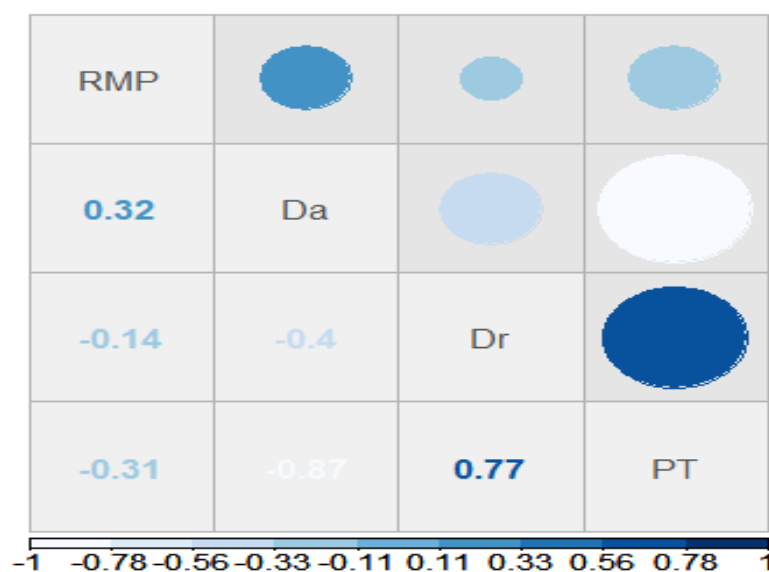


Figura 5. Matriz de correlación de Pearson para las variables de estudio

La **Tabla 9** evidencia el análisis estadístico de componentes principales efectuado a las variables en estudio, se obtuvo el agrupamiento de variables en tres componentes principales que representan el 81.845% de la varianza. El primer componente con una varianza de 39.771% presenta la correlación más alta positiva pertenece a Pt y Dr, y añadido a estas se encuentra una fuerte correlación negativa de la variable Da; el segundo componente explica el 62.885% de la varianza con una correlación fuerte positiva de la variable RMP y el último componente expresa mayor correlación de la Dr

Según Fu, Tian, Amoozegar, & Heitman, (2019) la porosidad y dimensión de los poros se encuentran influenciados por la densidad volumétrica y densidad aparente, siendo indicadores de compactación y de variación en la estructura del suelo.

De acuerdo con Elisei, (2017) el aumento de la densidad aparente y de la resistencia mecánica a la penetración a mayor profundidad del perfil de suelo son factores para determinar compactación, disminuyendo la capacidad de intercambio gaseoso y retención de humedad, dificultando el desarrollo radicular del cultivo.

Tabla 9. Análisis de componentes principales de las variables en estudio

	COMPONENTE		
	1	2	3
Pt (%)	,991		
Da (g*cm⁻³)	-,860	-,110	,265
Dr (g*cm⁻³)	,639	-,154	,512
RMP (kPa)	-,386	,764	,284
Varianza Total (%)	39.771	62.885	81.845

4.3. Determinación de la variabilidad espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración

Como resultado del análisis geostatístico, en el análisis estructural se observó el cumplimiento de variable regionalizada, puesto que los parámetros de estudio se registraron de forma aleatoria con dominio contenido en un espacio euclidiano tridimensional, es decir, cada punto de muestreo obtuvo un valor en coordenadas X, Y, Z.

Los semivariogramas experimentales de la resistencia mecánica a la penetración del suelo estudiada por cada estrato de profundidad evidenció un comportamiento espacial ajustado a la predicción por los modelos teóricos Esférico y Gaussiano **Figura 6**, mismos que en la **Tabla 10** expresan un coeficiente de Nash y Coeficiente de determinación (R^2) aproximados o igual a la unidad y un Error cuadrático medio ($RMSE$) de valores bajos cercanos a cero, lo que asegura una correcta validación de los datos predichos con los reales **Anexo 7**.

El modelo Esférico se ajustó a las profundidades en estudio **Figura 6^A**, **Figura 6^B**, **Figura 6^C**, mientras que el modelo Gaussiano se ajustó a los estratos **Figura 6^D**, **Figura 6^E**.

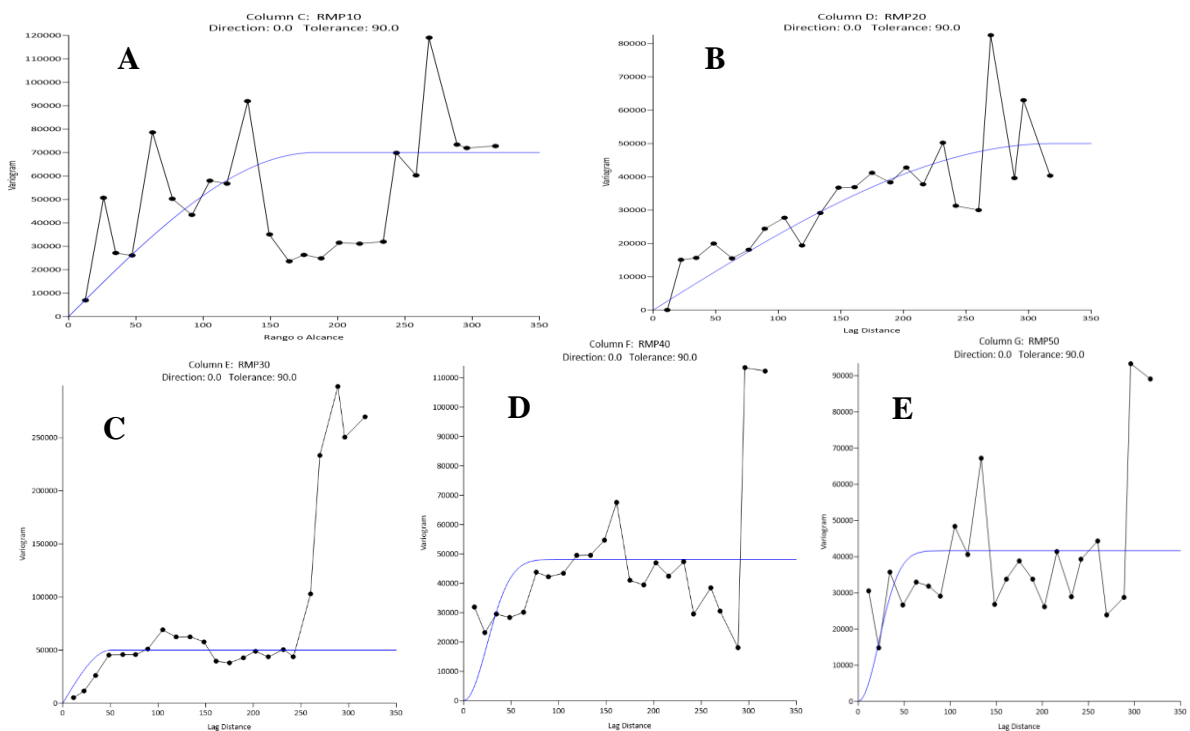


Figura 6. Semivariogramas ajustados de RMP del perfil de estudio

La **Tabla 10** determina la variabilidad espacial de los estratos estudiados, mismos que presentan un valor de efecto pepita o nugget menor a cero, lo cual representa un error mínimo al momento del levantamiento de información, la semivarianza para lograr estabilizarse oscilo en valores entre 40000-70000. La autocorrelacion espacial máxima se alcanzó en un rango de 40-320m y se evidencia la nula dependencia espacial en los estratos en estudio, situación que se esperaba puesto que los valores de efecto pepita se presentaron por debajo de cero sin alcanzar porcentaje alguno de la Meseta o Sill.

Tabla 10. Geoestadístico aplicado a las profundidades en estudio

Variable	Prof. (cm)	Modelo	Nugget	Sill	Rango	R ²	Nash	RMSE	De
	0-10	Esférico	1,81E-03	70000	220,00	0,999	0,999	6,14	0,00
	10-20	Esférico	1,46E-07	50000	320,00	0,999	0,999	4,71	0,00
RMP	20-30	Esférico	0,00E+00	50000	50,00	1,000	0,999	3,39	0,00
	30-40	Gaussiano	1,56E-03	48180	42,02	1,000	1,000	3,26	0,00
	40-50	Gaussiano	1,89E-03	41650	54,40	0,999	0,999	5,20	0,00

4.3.1. Mapas de distribución espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración por estratos de profundidad

La distribución espacial de la resistencia mecánica a la penetración **Figura 7** presenta una amplia distribución en la que se aprecia tres zonas, concentrando los valores más elevados de RMP en el módulo perteneciente al Testigo mientras que el rango de puntos de 10-18 perteneciente al T2 (Fertirriego) y 19-27 pertenecientes a T3 (Fertilización edáfica+Fertirriego) tienen valores bajos de RMP. Al Sur del predio se ubican el rango de valores más altos sobre la capa superficial del suelo, según Gutiérrez Rodríguez Francisco et al., (2012) se encuentran ligados a una Da elevada ocasionada por el tráfico y pisotones constantes de los trabajadores, y de los múltiples implementos de trabajo que se desplazan sobre el suelo constantemente, evidenciando también la eficacia del uso de los fertilizantes en otras zonas del predio.

La zona media de la **Figura 7** evidencia que el empleo de fertilizantes mediante Fertirrigación, permite suministrar constantemente pequeñas dosis de nutrientes al suelo, mejorando la distribución de macro y microelementos además que los elementos N-K-Ca tienen efectos descompactadores al ser aplicados racionalmente, beneficiando las raíces superficiales del cultivo. Al Noreste se encuentra una zona de RMP media en los primeros centímetros de sustrato, fenómeno que se presume estar ligado al constante suministro de nutrientes por medio de Fertilización edáfica en zonas o bandas fijas de aplicación.

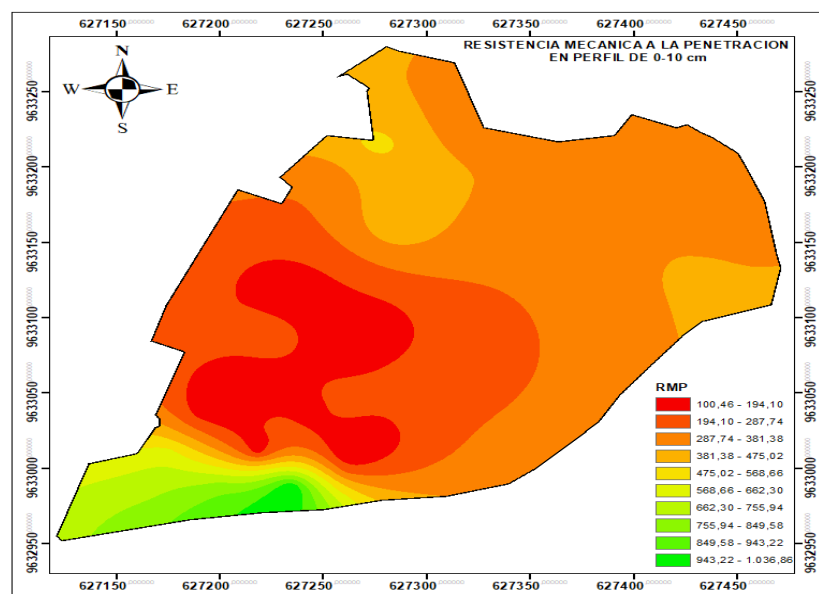


Figura 7. Distribución espacial de RMP en el estrato 0-10cm

La **Figura 8** evidencia una distribución espacial ligeramente homogénea en el segundo estrato de estudio, en la que se observa un rango de valores de RMP comprendidos entre 200 y 600 kPa en gran parte del predio, efecto atribuido a la acción de los fertilizantes.

La zona Sur presenta elevados valores de resistencia mecánica a la penetración, manifestando problemas de aireación, reducción de espacios porosos, dificultad del intercambio gaseoso del suelo. En la dirección Sureste y Noreste se concentra una RMP baja como consecuencia de las propiedades de los fertilizantes.

El Tratamiento 3 (Fertilización edáfica+Fertirriego) y Tratamiento 2 (Fertirriego) al suministrar dosis constantes de nutrientes tales como Ca^{++} que al aplicarse de manera uniforme y racional mejora las propiedades físicas del suelo, promueve e interviene en el crecimiento radicular, en la disponibilidad y absorción de nutrientes. (Daniel & Hernandez, 2012)

En dirección Norte y NorOeste se aprecia que el efecto de la Fertilización edáfica reacciona sobre la propiedad física RMP de manera diferente a los demás tratamientos a 20cm de profundidad.

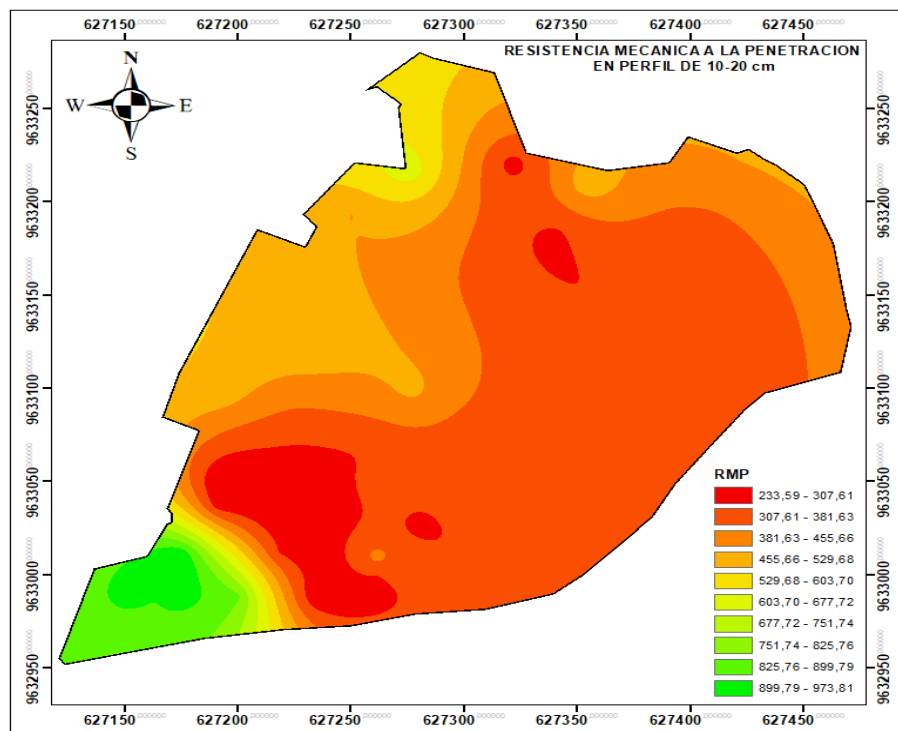


Figura 8. Distribución espacial de RMP en el estrato 10-20cm

La **Figura 9** presenta el mapa de distribución espacial del estrato 20-30cm de profundidad en la que la concentración de los datos varía en 29.67 %, observándose una zona mayoritariamente homogénea y pequeñas zonas de valores elevados de RMP.

En la zona Sur se ubica el Testigo, que continúa con valores altos en un rango de 600-800 kPa de resistencia mecánica a la penetración y junto a este se encuentra el módulo del Tratamiento 3 (Fertilización edáfica+Fertirriego) que presenta los menores valores de RMP de todo el mapa ligado a una porosidad de 43.87%, según el estudio de Peñafiel, (2020) las raíces superficiales del cultivo de banano se encuentran concentradas en los primeros 30cm de profundidad, siendo necesario que la resistencia mecánica a la compactación presente valores bajos, ideales para la profundización del sistema radicular.

La aplicación de fertilizantes fraccionados de forma paulatina por medio del Fertirriego complementa a la Fertilización edáfica según Bordoli, (1998) al evitar que se inmovilicen los nutrientes que se encuentran mineralizándose en la superficie de tal forma que aumenta la eficiencia e interacción del suelo con los nutrientes , por lo antes mencionado el Tratamiento 3 (Fertilización edáfica+Fertirriego) aporta las cantidades de macro y microelementos requerido por el cultivo sin alterar las propiedades físicas del suelo en ayuda del sistema radicular.

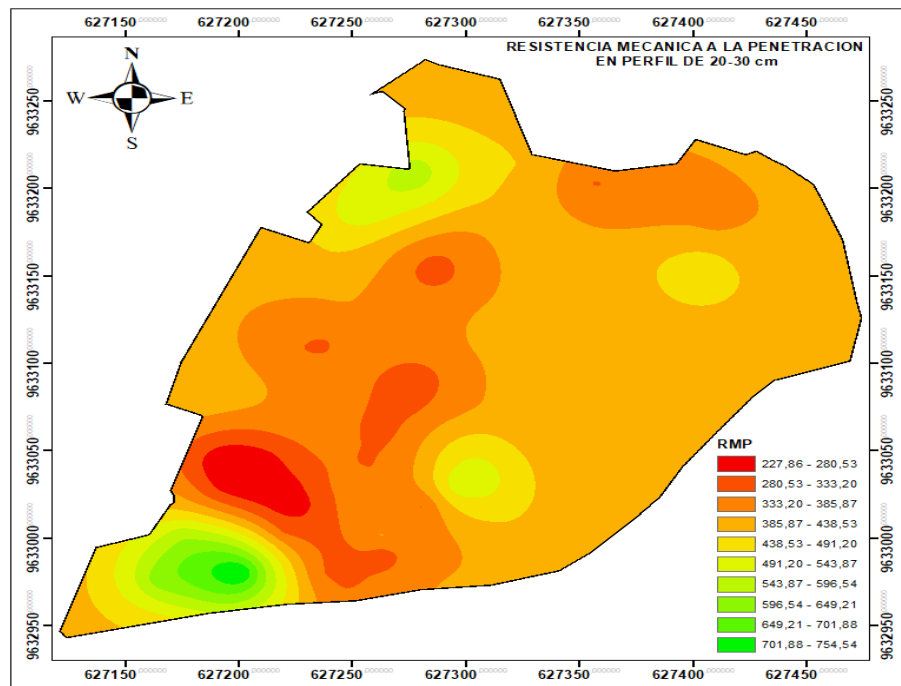


Figura 9. Distribución espacial de RMP en el estrato 20-30cm

El estrato de profundidad 30-40cm denota una alta homogeneidad de resistencia mecánica a la penetración en un rango de valores aproximados 400-500 kPa **Figura 10**; resaltan dos zonas específicas al Sur del predio, una con valores muy altos y la zona consecutiva con valores bajos.

En esta profundidad en estudio se visualiza en gran parte de la finca $RMP > 400$ kPa con tendencia de que este valor aumente debido a las alteraciones que comúnmente sufre la fertilidad del suelo, degradación de la estructura y afección de las principales propiedades físicas ocasionado por malas prácticas agrícolas según Cortez et al., (2018) valores superiores a 1000 kPa representa un indicador de problemas de compactación y ocasiona una impedancia mecánica para la exploración y desarrollo de las raíces.

La aplicación de fertilizantes por medio de Fertirriego+Fertilización Edáfica evita la percolación de nutrientes y a su vez no afecta ni modifica las propiedades físicas del suelo, siendo evidente que la aplicación de fertilizantes en el Tratamiento 3 no alteró las propiedades físicas RMP, Da **Tabla 5**, Dr **Tabla 6**, Pt **Tabla 7** y se mantuvieron en los rangos óptimos para el desarrollo radicular de los cultivos, descritos por diversos autores.

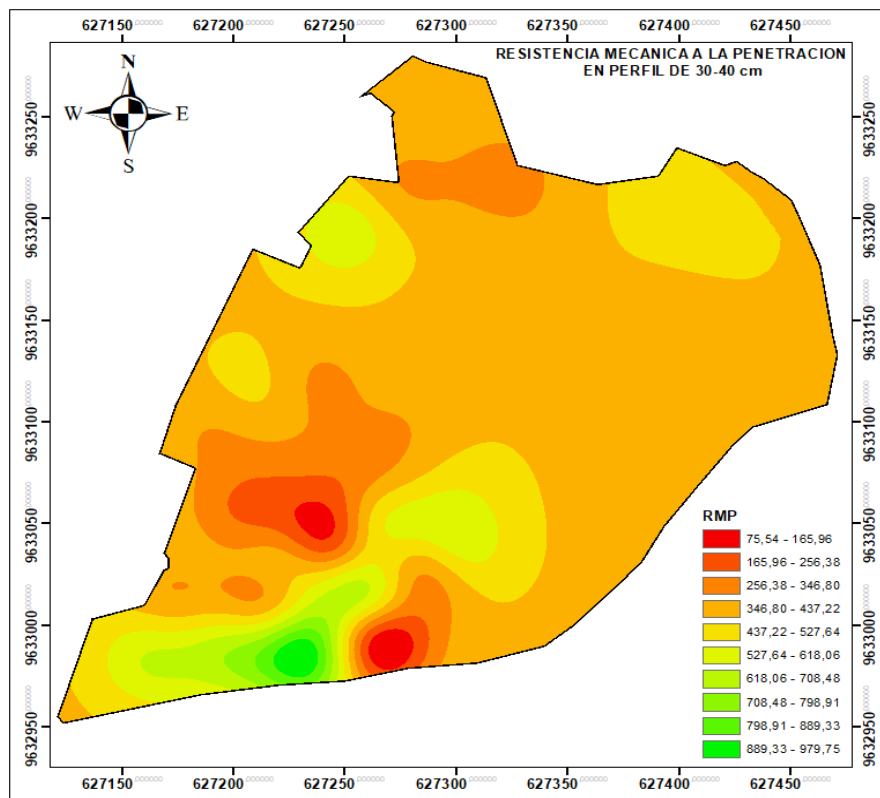


Figura 10. Distribución espacial de RMP en el estrato 30-40cm

La **Figura 11** presenta en el estrato final de 40-50cm de profundidad, distintas zonificaciones con alta variabilidad de la resistencia mecánica a la penetración, observándose al Sur del predio donde está situado el Testigo una RMP alta y junto a este se encuentra el Tratamiento 3 (Fertirriego+Fertilización Edáfica) que posee el mínimo valor 157.15 kPa de todo este nivel en estudio.

Se evidencia que el Tratamiento 3 mantiene valores bajos de RMP, en complemento con el rango de valores óptimos de D_a y P_t se consolidan como propiedades idóneas para el desarrollo radicular del cultivo de banano de acuerdo a Rojas & Resl, (2013) en los 45-60cm de profundidad del perfil de suelo se encuentra el 79 y 88% de raíces del cultivo, llegando a extender la cabellera radicular a más profundidad debido a excelentes condiciones de porosidad, aireación y estructura.

En las zonas que poseen una resistencia mecánica a la penetración elevada en complemento de valores inapropiados D_a y P_t se establecen como suelos duros en las que las raíces debido a este condicionamiento presentan forma delgada y ramificaciones muy finas; el crecimiento longitudinal radicular se ve afectado al encontrar obstáculos ante lo cual desvía su trayectoria, además de entorpecer la absorción de nutrientes.

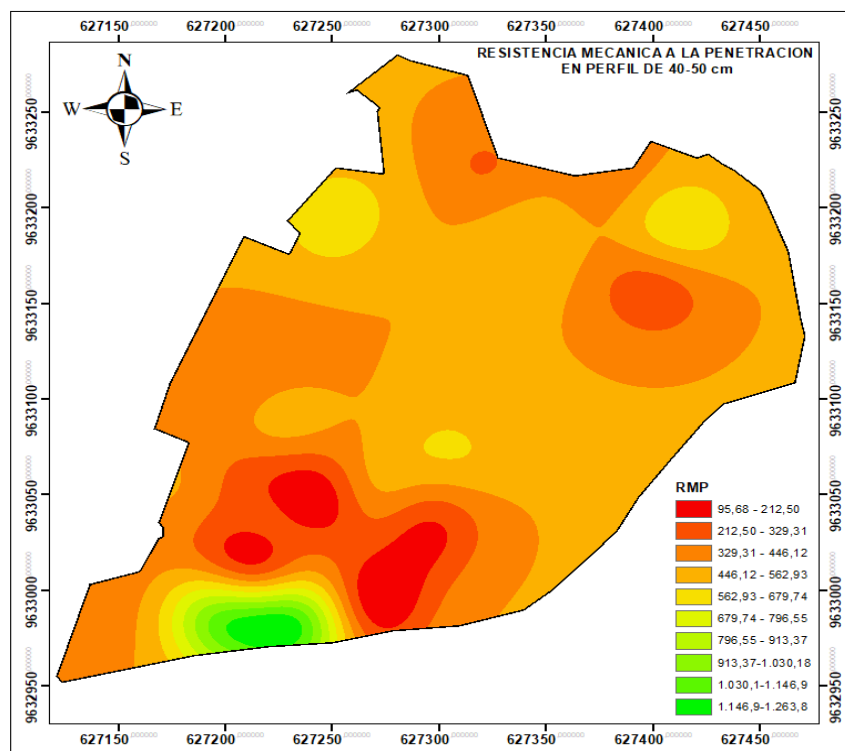


Figura 11. Distribución espacial de RMP en el estrato 40-50cm

5. CONCLUSIONES

- La resistencia mecánica a la penetración presentó en el estrato 0-10cm el promedio más bajo 292.32 kPa y su valor máximo 872.63 kPa medido en el estrato de 40-50cm de profundidad, esta variable evidenció el mayor coeficiente de variación 45.40% respecto a las demás.
- Las propiedades físicas densidad aparente y porosidad total presentan una alta correlación inversa -0.87, en conjunto con las mediciones de resistencia mecánica a la penetración, se constituyen en indicadores de compactación del suelo para cada estrato.
- La fertilización efectuada en el Tratamiento 3 (Fertilización edáfica+Fertirriego) evidenció que las propiedades físicas Resistencia mecánica a la penetración, Densidad aparente, Densidad real y Porosidad total presentaron valores ideales, ubicados dentro de los rangos óptimos para un eficiente desarrollo y profundización del sistema radicular.
- Los modelos teóricos Esférico y Gaussiano son los que más se ajustaron a las distintas profundidades de estudio de la Resistencia mecánica a la penetración puesto que presentaron un Coeficiente de determinación (R^2) y un coeficiente de Nash cercano o igual a 1 y un Error cuadrático medio (RMSE) de valores más bajos.

La distribución espacial permitió generar mapas temáticos mediante los cuales se establecieron zonas perfectamente diferenciadas de resistencia mecánica a la penetración en cada profundidad de estudio.

6. RECOMENDACIONES

La medición de la resistencia mecánica a la penetración mediante el empleo del penetrómetro digital, en complemento del análisis de laboratorio de las propiedades físicas del suelo permitirá realizar un sistema integrado eficiente de labores culturales de fertilización, riego, y aplicación edáfica de insumos agrícolas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, B. (2018). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. AGAH0108* (Segunda edición ed.). IC editorial. Obtenido de <https://cutt.ly/RhgnLzb>
- Amadi, A., Sadiku, S., Abdullahi, M., & Danyaya, H. (2018). Case study of construction quality control monitoring and strength evaluation of a lateritic pavement using the dynamic cone penetrometer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(5), 530-539. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.07.001>
- Amaya, M. (2020). *Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia fdr, en el cultivo de banano*. Machala: Universidad Técnica de Machala. Obtenido de <https://cutt.ly/Vh8DnJn>
- Bagnall, D., Jones, E., Balke, S., & Morgan, C. (2020). An in situ method for quantifying tillage effects on soil structure using multistriple laser triangulation. *Geoderma*, 380(15), 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114642>
- Beckett, C., Bewsher, S., Guzzomi, A., Lehane, B., Fourie, A., & Riethmuller, G. (2018). Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. *Soil & Tillage Research*, 175(1), 150-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.009>
- Bejar, S., Cantú, I., Yáñez, M., & Luna, E. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(59), 31-50. doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Bordoli, J.M. 1998. Fertilización NP de trigo en siembra directa. Resultados de 1997. Pp 19-21. En Resumen de trabajos de la 6° Jornada Nacional de Siembra Directa. Octubre de 1998, Mercedes, Uruguay.
- Carmona Arce, M., & Carrion Rosales, H. (2015). Potencia de la prueba estadística de normalidad Jarque-Bera frente a las pruebas de Anderson-Darling, Jarque-Bera Robusta, Chi-Cuadrada, Chen-Shapiro y Shapiro-Wilk. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/94337>

- Carlesso, L., Beadle, A., Cook, S., Evans, J., Hartwell, G., Ritz, K., . . . Murray, P. (2019). Soil compaction effects on litter decomposition in an arable field: Implications for management of crop residues and headlands. *Applied Soil Ecology*, *134*(1), 31-37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.004>
- Carriel, J. (2020). *Efecto de la nutrición translaminar en el comportamiento agronómico del cultivo de banano (musa x paradisiaca var. williams) en el cantón Valencia*. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de <https://cutt.ly/5j0wIxT>
- Castro, G., & Chiquillo, H. (2016). Evaluación de tres alternativas de fertiriego en el establecimiento del cultivo de plátano (musa paradisiaca/harton cv) en el Yopal, Casanare. *Revista Ingeniería y Región*, *16*(2), 49-55. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.25054/22161325.1298>
- Chatterjee, A., Roychowdhury, S., Singh, N., Singh, S., & Hazra, T. (2020). Implementation and Simulation of IoT Controlled Moisture Sensor of Soil. *International Journal of Advanced Research in Science & Technology (IJARST)*, *6*(1), 42-47. doi:XX.ABCDE/IJARST
- Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil & Tillage Research*, *191*(1), 156-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>
- Colorado, J. (2010). *Desarrollo de una herramienta inyectora de fertilizante soluble para el cultivo de banano*. Medellín: Universidad EAFIT. Obtenido de <https://cutt.ly/ijofe45>
- Comisión Nacional Forestal. (2018). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales* (Quinta edición ed.). Comisión Nacional Forestal. doi:<https://cutt.ly/ZhWxOye>
- Cortez, J. W., Cavassini, V. H., Motomiya, A. V. de A., Orlando, R. C., & Valente, I. Q. M. (2018). Spatialization of soil resistance to penetration for localized management by precision agriculture tools. *Engineer*, *38*(5), 690–696.

- Cristóbal, E., Silva, A., Orlando, D., Patiño, T., Patricio, I., Crespo Sánchez, J., Daniel, A. S., Tenelanda, O., & Cuenca -Ecuador, P. (2014). *UNIVERSIDAD DE CUENCA Fundada en 1867*.
- Daniel, N., & Hernandez, P. (2012). *Universidad técnica de ambato facultad de ingeniería agronómica*.
- Darder, M., Castiglioni, M., Andriulo, A., & Sasal, M. (2019). Calibración de parámetros de un modelo de infiltración en la cuenca alta del arroyo Pergamino. *Ciencia del Suelo*, 37(1), 77-90. Obtenido de <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/Volumen37n1/8-%20378%20WEB.pdf>
- Duarte, H., & González, Á. (2020). Riego por goteo en cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum L.*), Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. *Revista científica La Calera*, 20(34), 35-40. doi:<https://doi.org/10.5377/calera.v20i34.9811>
- Domínguez Palacio, D., Pozo Gálvez, C., & León Sánchez, M. A. (2018). Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro. Bulk density and total porosity estimation through penetrometer. In *Cultivos Tropicales* (Vol. 39, Issue 4). <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Erazo Mesa Edwin, & Sandoval López Diego. (2015). Desarrollo de una herramienta geoestadística para elaborar mapas de variabilidad espacial de suelos. *Suelos Ecuatoriales*, 45(1), 36–40. <https://doi.org/ISSN 0562-5351>
- Elisei, J. (2017). Influencia de la humedad del suelo en la resistencia a la penetración vertical. *Revista de tecnología agropecuaria*, 10(33), 18-20. Obtenido de <https://cutt.ly/SjL02Uk>
- Fu, Y., Tian, Z., Amoozegar, A., & Heitman, J. (2019). Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. *Soil & Tillage Research*, 193(1), 114-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016>
- García, C. (2020). *Comportamiento agronómico del cultivo de maíz (Zea mays L.) sembrado en diferentes grados de compactación del suelo y dosis de fósforo en la*

zona de Baba. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo. Obtenido de <https://cutt.ly/uj16ieS>

García, E., Gutiérrez, F., Ramírez, J., González, A., Pérez, D., & Serrato, R. (2020). Evaluación de la intensidad del tráfico de tractores e implementos en un suelo agrícola. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 753-766. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7498395>

García, H., Sequeira, J., & Álvarez, C. (2020). Manejo y características de los suelos agrícolas de colonia Providencia, Nueva Guinea, 2017. *Revista Universitaria del Caribe*, 24(1), 78-97. doi:<https://doi.org/10.5377/ruc.v24i01.9913>

García, I., & Vidal, M. (2020). Impactos críticos del penetrómetro como criterio para estimar la compactación del suelo y decidir labores en caña de azúcar. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(1), 29-38. Obtenido de <https://ceema.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/379/359>

Gía, E. (2014). *Formas de herculizado en el cultivo de banano*. Universidad Técnica de Machala. Obtenido de <https://cutt.ly/cjyjKM>s

Glab, T., Szewczyk, W., Gondek, K., Mierzwa, M., Palmowska, J., & Necka, K. (2020). Optimization of turfgrass fertigation rate and frequency. *Agricultural Water Management*, 234(1), 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106107>

Gómez, A., & Hoyos, W. (2020). *Evaluación de la calidad de un suelo sometido a diferentes usos*. Villavicencio: Universidad de Los Llanos. Obtenido de <https://cutt.ly/sj17LqZ>

Guerrero, S. (2016). *Características morfológicas de cultivares de musáceas establecidos en la finca experimental "La María"*. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de <https://cutt.ly/LjygBby>

Gutiérrez Rodríguez Francisco, González Huerta Andrés, Franco Mora Omar, & Saldivar Iglesias Pedro. (2012). Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un vertisol. México-Ciudad de México Terra Latinoam Vol.30 No.1 Chapingo Ene./Mar., 30(1), 1-7.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000100001

Hargreaves, P., Baker, K., Graceson, A., Bonnett, S., Ball, B., & Cloy, J. (2019). Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. *European Journal of Agronomy*, 109, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125916>

Hernandez Jimenez Alberto, Perez Jimenez Juan, & Bosch Infante Dalmacio. (2019, March). La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015. *Cultrop* Vol.40 No.1 La Habana Ene.-Mar. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000100015

Hernández Díaz, M. I., & Chailloux Laffita, M. (2014). Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en la época de primavera-verano. *Cultivos*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000400014

Hidalgo, A. (2016). *Determinación de las características físico-químicas del suelo y su importancia para la nutrición del cultivo de banano (Musa AAA) variedad Cavendish*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Obtenido de <https://cutt.ly/AjojBH7>

Jiménez, C. (2019). *Mejoramiento de la eficiencia de riego mediante un sistema presurizado por aspersion para el complejo deportivo San Juan Masias de la ciudad de Lambayeque*. Lambayeque. Obtenido de <https://cutt.ly/gj14e3z>

Kafkafi, U., & Tarchitzky, J. (2012). *Fertirrigación. Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua* (Primera edición ed.). París: Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes e Instituto Internacional de la Potasa. Obtenido de https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2012_ifa_fertigation_spanish.pdf

- Karlin, M., Salazar, J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S., & Accietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 37(2), 196-208. doi:<https://cutt.ly/9hE4Ngi>
- Lee, J., Yeob, S., Hong, W., & Byun, Y. (2019). Assessing subgrade strength using an instrumented dynamic cone penetrometer. *Soils and Foundations*, 59(1), 930-941. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.005>
- Li, H., den Bulcke, J., Wang, X., Gebremikael, M., Hagan, J., De Neve, S., & Sleutel, S. (2020). Soil texture strongly controls exogenous organic matter mineralization indirectly via moisture upon progressive drying — Evidence from incubation experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 151(1), 1-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108051>
- Li, H., den Bulcke, J., Xiaolin, W., Gebremikael, M., Hagan, J., de Neve, S., & Sleutel, S. (2020). Soil texture strongly controls exogenous organic matter mineralization indirectly via moisture upon progressive drying — Evidence from incubation experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 151(1), 1-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108051>
- López, M., & Estrada, H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrocencias*, 8(1), 3-11. Obtenido de <https://cutt.ly/6h8D60h>
- Lozano, S., Olazo, J., Pérez, M., Castañeda, E., Díaz, G., & Santiago, G. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 57-66. doi:<https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>
- Martínez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 38(1133–3677), 315–332. https://www.rcumariacristina.com/wp-content/uploads/2010/12/11-ElenaMartinez_1.pdf
- Mazuela, P., & de la Riva, F. (2013). *Manual de fertirriego* (Primera edición ed.). Arica: Universidad de Tarapacá. Obtenido de <http://sb.uta.cl/libros/30846%20manual%20fertirriego%20web.pdf>

- Viciedo, D. O., Hernández, A., Rodríguez, M., Lizcano, R., Calero, A., & Peña, K. (2018). Effects of land-use change on Nitisols properties in a tropical climate. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(3), 8601–8608. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v71n3.67786>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). *Insignia de los suelos*. Estocolmo: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i3855s.pdf>
- Ortíz, E. (2019). *Efecto de cuatro láminas de riego por goteo superficial y sub superficial en el rendimiento del cultivo maíz morado (zea mays l.) en el Centro de Investigación y Experimentación – Unasam, Cañasbamba – Yungay, 2017*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Obtenido de <https://cutt.ly/Mjok3Q9>
- Palacio, D. D., Gálvez, C. P., & Sánchez, M. A. L. (2018). ESTIMACION DE LA DENSIDAD VOLUMETRICA Y POROSIDAD TOTAL USANDO EL PENETROMETRO/Bulk density and total porosity estimation through penetrometer. *Cultivos Tropicales*, 39, 34+.
- Panigrahi, N., Thompson, A., Zubeizu, S., & Knox, J. (2021). Identifying opportunities to improve management of water stress in banana production. *Scientia Horticulturae*, 276(1), 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109735>
- Peñañiel, J. (2020). *Importancia de la fertilización edáfica a base de potasio sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo de banano (Musa × paradisiaca)*. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo. Obtenido de <https://cutt.ly/Lj0qQFJ>
- Porta, J., López, M., & Poch, R. (2019). *Edafología Uso y protección de suelos*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Quintero, D. (2019). *Innovación de una técnica de programación de labores de riego con base en pronósticos meteorológicos y modelación de cultivo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://cutt.ly/Jj18hNm>

- Rajakaruna, N., & Boyd, R. (2019). *Encyclopedia of Ecology* (Segunda edición ed.). Auburn: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11159-5>
- Ramos, E., Martínez, A., García, A., & Hernández, G. (2020). Correlación entre densidad y resistencia mecánica del suelo obtenida con sondas de diferentes geometrías. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(3), 28-36. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v29n3/2071-0054-rcta-29-03-28.pdf>
- Ramírez-López, L., Reina-Sánchez, A., & Camacho-Tamayo, J. H. (2008). Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colômbia. In *Engenharia Agrícola* (Vol. 28, Issue 1, pp. 55–63). <https://doi.org/10.1590/s0100-69162008000100006>
- Rey Montoya, T. S., Paredes, F. A., & Dalurzo, H. C. (2017). Propiedades físicas de un argiudol ácuico bajo diferentes sistemas de manejo. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/3944>
- Rivera, J., Carfagno, P., & Eiza, M. (2017). Efecto de la inclusión de cultivos de cobertura sobre la porosidad de un suelo hapludol del oeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias*, 8(1), 31-45. doi:<https://cutt.ly/ehE30wo>
- Rodríguez, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Roma: Organización de las naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Obtenido de <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Rojas, L., Cajiao, A., & Rivera, k. (2018). Estudio y análisis presuntivo de la fertilidad microbiana del suelo de un cultivo de maíz (*Zea mays*) en Pamplona, Norte de Santander. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 16(1), 3-12. Obtenido de <https://cutt.ly/DhgYAz9>
- Rojas, M. L., & Resl, M. R. (2013). Efectos de la disminución de la aireación del suelo en los rendimientos del cultivo de banano (*musa acuminata*) mediante Sistemas de Información Geográfica. Quito, 2013. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2386>

- Rose, D. A. (2005). Lal, R. & Shukla, M.K. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, New York, 2004. x 716 pp. US\$95, hardback. ISBN 0-8247-5324-0. In *European Journal of Soil Science* (Vol. 56, Issue 5, pp. 683–684). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.0756c.x>
- Sánchez, J., & Mira, J. (2013). *Principios para la nutrición del cultivo de banano* (Primera edición ed.). Medellín: Asociación de Bananeros de Colombia. Obtenido de <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12593>
- Schnaid, F., Lourenço, D., & Odebrecht, E. (2017). Interpretation of static and dynamic penetration tests in coarse-grained soils. *Géotechnique Letters*, 7(1), 1-6. doi:<http://dx.doi.org/10.1680/jgele.16.00170>
- Shekhar, V., Stockle, D., Thellmann, M., & Vermeer, J. (2019). *Current Topics in Developmental Biology* (Vol. 131). Zurich: University of Zurich. doi:<https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2018.11.011>
- Singh, M., Trivedi, A., & Kumar, S. (2020). Influence of Geosynthetic Reinforcement on Unpaved Roads Based on CBR, and Static and Dynamic Cone Penetration Tests. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(13), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1007/s40891-020-00196-0>
- Sun, J., Li, W., Li, C., Chang, W., Zhang, S., Zeng, Y., Zeng, C., & Peng, M. (2020). Effect of Different Rates of Nitrogen Fertilization on Crop Yield, Soil Properties and Leaf Physiological Attributes in Banana Under Subtropical Regions of China. *Frontiers in Plant Science*, 11, 613760.
- Toledo, M. (2016). *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de honduras*. Tegucigalpa: Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria. Obtenido de <https://cutt.ly/0jH8ro8>
- Tuzzin, M., Debiasi, H., Franchini, J., Antunes, A., Levien, R., Leitner, d., & Schnepf, A. (2020). Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil & Tillage Research*, 200(1), 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>

- Villalobos, F., Quemada, M., & Delgado, A. (2016). Fertigation. En F. Villalobos, & E. Fereres, *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (págs. 407 - 424). Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_27
- Villaseñor, D. (2016). *Fundamentos y procedimientos para análisis*. Machala: Universidad Técnica de Machala. Obtenido de <https://cutt.ly/0jYsduV>
- Warrick AW, Nielsen DR. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hileel D, editor. Applications of soil physics. Nueva York: Academic Press. pp. 319-344
- Wang, C., & Fox, P. (2020). Analytical Solutions for Heat Transfer in Saturated Soil with Effective Porosity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(9), 1-11. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002324)
- Yang, M., Wang, G., Lazim, R., Shen, X., & Anagnostou, E. (2021). Impact of planting time soil moisture on cereal crop yield in the Upper Blue Nile Basin: A novel insight towards agricultural water management. *Agricultural Water Management*, 243(1), 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106430>
- Zambrano, L., & Yerro, A. (2020). Numerical simulation of a free fall penetrometer deployment using the material point method. *Soils and Foundations*, 60(3), 668-682. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.04.002>
- Zhang, W., Gao, W., Ren, T., & Whalley, R. (2020). A novel approach to estimate soil penetrometer resistance from water content, bulk density, and shear wave velocity: A laboratory study on a loamy sand soil. *Geoderma*, 368(1), 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114276>

ANEXOS



Anexo 1. Toma de muestras de suelo



Anexo 2. Realización de calicata y toma de muestra mediante cilindro



Anexo 3. Toma de datos con el penetrómetro



Anexo 4. Secado de muestras en estufa



Anexo 5. Determinación de densidad aparente



Anexo 6. Determinación de densidad real

RESISTENCIA MECANICA A LA PENETRACION									
0-10		10-20		20-30		30-40		40-50	
Reales	Predichos	Reales	Predichos	Reales	Predichos	Reales	Predichos	Reales	Predichos
496,40	494,58	648,00	643,46	582,25	579,88	341,25	343,60	510,00	513,16
317,00	316,35	454,75	455,37	530,75	526,82	589,50	590,44	634,00	633,52
298,00	302,14	279,25	283,65	437,75	437,85	296,50	296,33	324,00	324,53
352,80	353,56	293,25	293,72	403,00	403,66	382,25	382,59	544,50	545,05
328,00	328,45	506,75	499,98	331,00	333,30	399,75	398,23	427,50	429,77
353,00	352,33	406,50	406,94	338,00	338,31	479,00	478,68	413,50	413,28
328,20	329,07	365,25	364,34	368,50	370,64	517,25	515,58	634,00	628,75
358,40	358,98	327,25	326,76	472,25	471,24	365,25	363,51	290,00	284,73
457,80	452,63	406,75	407,88	306,50	308,64	423,75	423,78	455,00	454,85
135,00	136,62	489,50	488,02	327,50	327,99	334,50	335,74	393,00	393,40
184,60	187,17	479,50	479,37	344,75	347,61	444,50	443,76	351,50	351,39
256,40	255,70	493,00	490,77	434,25	433,87	348,25	346,15	351,50	352,24
253,80	250,94	365,50	364,22	365,50	366,32	323,75	321,74	483,00	479,60
151,80	151,63	472,00	469,06	303,25	304,42	344,50	342,91	469,00	468,55
149,00	151,83	314,00	313,96	313,75	315,72	331,00	329,67	399,50	393,24
284,20	275,51	354,75	349,09	334,50	335,46	400,50	392,23	282,50	274,50
231,80	231,87	320,50	321,32	441,50	443,58	527,25	530,76	551,50	548,19
272,80	269,12	337,00	335,25	538,00	530,69	544,50	536,26	234,00	229,72
99,20	100,46	268,75	266,00	258,50	256,49	224,25	227,76	255,00	257,25
157,20	157,92	237,75	242,05	227,50	230,31	300,50	304,94	365,00	367,41
140,60	149,68	265,50	280,40	262,00	267,57	358,25	360,24	324,00	324,72
231,60	226,82	241,25	242,85	255,00	255,38	403,25	406,70	241,50	239,93
154,40	155,25	255,00	254,89	344,50	344,24	224,00	222,55	165,50	164,59
157,40	156,19	286,00	289,12	331,00	332,21	382,25	384,20	213,50	213,14
104,80	116,82	406,75	399,01	389,50	384,58	531,00	528,21	227,50	232,42
259,20	276,47	300,00	299,09	310,00	312,05	272,25	270,61	227,50	239,61
151,40	171,51	306,75	317,68	330,75	339,26	403,25	402,94	268,50	275,74
609,40	612,46	974,75	973,81	577,75	579,06	375,25	379,03	448,00	450,88
722,40	724,16	897,00	897,01	629,50	622,11	629,50	629,80	489,50	484,40
793,80	797,47	836,75	838,27	758,75	754,55	707,00	709,10	1052,00	1059,72
1041,60	1036,87	251,50	261,62	341,25	346,50	940,25	948,49	1086,50	1103,55

Anexo 7. Valores reales y predichos de cada profundidad de estudio.