



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Agrónomo

**Título: VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA
A LA PENETRACIÓN EN UN VERTISOL CRÓMICO BAJO
DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES.**

Autor: Elisabet Espinosa Mojena

Tutora: MsC. Juan Alejandro Villazón Gómez

Curso: 2019- 2020

Pensamiento

“La tierra es la madre de la fortuna, salvarla es ir directamente a ella.”

José Martí

Agradecimientos

A todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo,

Gracias

Dedicatoria

A mi familia por apoyarme en todo momento.

Resumen

El trabajo se desarrolló en el año 2019, en la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Holguín con el objetivo de estudiar el efecto de diferentes coberturas vegetales sobre la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico. Se escogió un área de 2.028 ha con caña de azúcar, pasto natural y bosque secundario. Se establecieron irregularmente 47 puntos para determinar la resistencia a la penetración cada 10 cm hasta los 30 cm de profundidad. Se realizó un análisis exploratorio de datos, fueron ajustados los semivariogramas experimentales y mapeada la resistencia a la penetración. Se determinó la dependencia espacial. La resistencia a la penetración aumentó con la profundidad. La profundidad de 10-20 cm, mostró una mayor dispersión de los datos y la de 0-10 cm tuvo una mayor asimetría y una menor curtosis. Los semivariogramas experimentales fueron ajustados mediante modelos teóricos esféricos, excepto para la capa de 20-30 cm (gaussiano); en esta, según el grado de dependencia de Cambardella, existe una *moderada* dependencia espacial. Para el resto, es *fuerte*. El índice de dependencia espacial de Seidel y Olivera indica una *fuerte* dependencia espacial en todas las profundidades. De 0-10 cm, la resistencia a la penetración en caña de azúcar fue clasificada de *baja* a *moderada* y en las otras coberturas vegetales de *moderada* a *alta*. En las capas restantes, en caña de azúcar y pasto natural se clasificó de *moderada* a *alta*, y en el bosque secundario de *alta* a *muy alta*.

Palabras clave: Compactación, Distribución espacial, Krigeaje.

Abstract

The investigation was carried out in the UEB Cuba Sí 3, belonging to the Holguin Swine Company; with the objective of evaluating different doses of zeolite as a food additive in the productive behavior of pigs in the preweaning stage. For the experiment, 60 pigs were evaluated at weaning for 26 days, divided into three groups of 20 animals per treatment. A control group and groups 2 and 3 were given 3% and 5% zeolite respectively in the feed, once a day for 15 days. During the investigation, the average daily gain, the conversion of feed into meat and the final weight were evaluated. For the processing of the data, the statistical package InfoStat version 2015 of Di Rienzo was used. Simple variance analysis of variance was performed and where there were significant differences, the Duncan mean multiple comparisons test was applied for a significance level of $P > 0.05$. In the evaluated indicators there was a significant difference of the treated groups with respect to the control, with the inclusion of 5% of the best results. Economically, the treatment was feasible because a profit of \$ 40.57 and \$ 137.9 was achieved in treatments 2 and 3 respectively with respect to the control.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Problema científico.....	3
Hipótesis.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivo específico.....	3
II Revisión bibliográfica.....	4
II.1 Vertisoles.....	4
II.2 Factores limitantes.....	6
II.3 Compactación.....	7
II.3.1 Parámetros físicos <i>relacionados con la compactación del suelo</i>	9
II.3.1.1.- Estructura del suelo	9
II.3.1.2.- Textura	11
II.3.1.3.- Densidad del suelo	14
II.3.1.4.- Porosidad del suelo.....	14
II.4.- Resistencia a la penetración.....	16
II.5.- Variabilidad espacial.....	17
III - Materiales y métodos.....	21
IV – Resultado y discusión.....	24
V – Conclusiones.....	29
VI- Bibliografía.....	30

I.- INTRODUCCIÓN

El suelo constituye el soporte indispensable sobre el que se asientan todos los ecosistemas terrestres, sirve como asiento para la vegetación, a la que nutre y sostiene, sino también como soporte y medio de vida para los animales y microorganismos en el que se desenvuelven (USDA,1988).

El suelo tiene gran importancia por que interviene en el ciclo del agua y los ciclos de los elementos que lo conforman y en él tienen lugar gran parte de las transformaciones de la energía y de la materia de los ecosistemas. Su regeneración es muy lenta. El suelo se debe considerar como un recurso no renovable y cada vez más escaso, debido a que está sometido a constantes procesos de degradación y destrucción (Buol *et al.*, 1973).

Los Vertisoles se caracterizan por mostrar una capa de 25 cm o más, con el límite superior dentro de los primeros 100 cm de profundidad, caras de deslizamiento y agregados en forma de cuña, un 30% o más de arcillas entre la superficie del suelo mineral y los 18 cm de profundidad o en el horizonte Ap y en todos los horizontes entre los 18 y 50 cm y grietas que se abren y cierran periódicamente (Soil Survey Staff, 2010). Presentan, además, limitaciones de orden físico (Marques *et al.*, 2014) y, debido a la inestabilidad de su estructura, son propensos a degradarse por la acción de la lluvia, el tránsito de la maquinaria agrícola, técnicas de riego y drenaje no adecuadas y labranza incorrecta (Cairo *et al.*, 2008).

Alrededor del 32% de la superficie cultivada de Cuba está ocupada por Vertisoles, que se distribuyen a lo largo de todo el país. Estos son usados intensivamente para la producción de caña de azúcar (en regadío y secano), arroz (de regadío) y otros cultivos en menor escala (Cid *et al.*, 2016).

En Holguín, buena parte de los cultivos se encuentran establecidos en suelos propensos a compactarse, con un alto contenido de arcillas y difíciles de manejar por sus características. Sin embargo son suelos profundos y fértiles, a los que realizándoles un adecuado uso y manejo pueden incrementar los rendimientos en los cultivos y alcanzar su máximo potencial productivo (Núñez *et al.*, 2010).

De forma general, los Vertisoles tienen, como principales factores limitantes, a la compactación y mal drenaje. Además, la influencia de las precipitaciones estacionales anuales hace que sea necesaria la utilización de sistemas de manejo adecuados (De la Rosa *et al.*, 2013).

La compactación del suelo ocurre cuando la presión aplicada sobre el suelo reduce su porosidad (Lipiec *et al.*, 2003) y aumenta su resistencia mecánica a la penetración (Reyes, 2007). Afecta, de forma indirecta, la infiltración y la conductividad del agua, la temperatura y la aireación del suelo; llevándolo a la degradación y a la pérdida de la productividad (Silva *et al.*, 2000). La compactación puede ser establecida indirectamente a partir de determinadas propiedades físicas del suelo, entre ellas, la resistencia a la penetración (Hamza y Anderson, 2005).

La resistencia a la penetración es una variable de fácil determinación e interpretación, además de correlacionarse con otros atributos, por lo que constituye un indicador adecuado para la evaluación de la calidad física del suelo (Guimarães *et al.*, 2013). Existen diferentes procedimientos para medir la resistencia a la penetración, tanto in situ como en un laboratorio (Herrick y Jones, 2002). Pero usualmente se mide con un equipo conocido como penetrómetro (Dexter *et al.*, 2007) de forma directa en el campo (Herrick y Jones, 2002).

La caracterización de la variabilidad de las propiedades edáficas puede hacerse a través de la estadística clásica; la que, sin embargo, no ofrece información de la variabilidad espacial de las mismas. El conocimiento de la distribución de los valores de las propiedades del suelo en el espacio solo puede lograrse a través de las técnicas geoestadísticas (Acevedo *et al.*, 2015).

El uso de la geoestadística se ha incrementado notablemente en los últimos años para el análisis de la variabilidad de las propiedades del suelo (Resende *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2018) afectada por diferentes coberturas vegetales (Haruna y Nkongolo, 2015; Silva *et al.*, 2018), usos de la tierra (Silva *et al.*, 2018) y sistemas de manejo de los cultivos (Schlindwein y Anghinoni, 2000; Carvalho *et al.*, 2012; Acevedo *et al.*, 2015; Gadjia *et al.*, 2018).

Problema científico

¿En qué medida diferentes coberturas vegetales dentro de un sistema de producción agropecuario inducen cambios en la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico?

Hipótesis

Las diferentes coberturas vegetales en un sistema de producción agropecuario influyen sobre la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico.

Objetivo general

Determinar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en las diferentes coberturas vegetales en un sistema de producción agropecuario establecido en un Vertisol Crómico.

Objetivos específicos.

- ✓ Evaluar la resistencia a la penetración en las diferentes coberturas vegetales de un sistema de producción agropecuario.
- ✓ Determinar los parámetros estadísticos que describen los supuestos de normalidad de los datos.
- ✓ Caracterizar los parámetros geoestadísticos que describen el efecto de la cobertura vegetal en un sistema de producción agropecuario establecido en un Vertisol Crómico sobre la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración, así como, la predicción en los puntos no muestreados.

II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II.1.-Vertisoles

Los Vertisoles constituyen uno de los agrupamientos de suelos más importantes en la provincia Holguín debido a su amplia distribución. Los mismos son muy estudiados en la actualidad en cuanto a sus propiedades físicas.

En Cuba estos suelos fueron diagnosticados inicialmente como Gley Tropicales, posteriormente como Vertisoles, manteniéndose este nombre en la nueva versión desclasificación genética de los suelos (Hernández *et al.*, 2010).

En la Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, que combina los principios genéticos geográficos con los nuevos conceptos de horizontes y características de diagnóstico aparecen denominados como Vertisoles Crómicos (Hernández *et al.*, 1999). Su correlación con otras clasificaciones de suelos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.- Correlación aproximada de los Ferríticos Rojos Oscuros típicos con algunas clasificaciones nacionales e internacionales.

Clasificación	Nombre
Clasificación de los Suelos de Cuba (Hernández <i>et al.</i> , 2015)	Vertisol Crómico cálcico y gléyico
Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández <i>et al.</i> , 1999)	Vertisol Crómico cálcico o Vertisol Crómico gléyico
Primera Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Instituto de Suelos, 1973)	Gley Tropical típico suavemente gleyzado
Segunda Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández <i>et al.</i> , 1975)	Oscuro Plástico Gleyzoso gris amarillento
Clasificación de Bennett y Allison (Bennett y Allison, 1966)	Alto Cedro
Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010)	Haplustert Crómico ácuico o Haplustert Crómico gléyico
Word Reference Base for soil Resource (FAO, 2006)	Vertisol Crómico cálcico o Vertisol Crómico gléyico
Leyenda Revisada (FAO-UNESCO, 1989)	Vertisol Éutrico

Según (Zonn, 1974) los suelos vérticos constituyen un amplio grupo de suelos distribuidos en diferentes zonas del Planeta y unidos por un proceso específico de formación que responde al nombre de Vertisolización.

El nombre Vertisol deriva del latín *vertex* que significa mezclado. Son suelos que presentan un 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 50 cm. El contenido de arcilla puede ser hasta del 90%. Además, estos tienen cambios pronunciados en el volumen con la variación del contenido de humedad y evidencias de movimiento del suelo en las caras de deslizamiento (WRB, 2006).

Son suelos sialíticos con relaciones moleculares $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ del orden de 4 y con predominio del Mg sobre el Ca, tanto en la masa de suelo como en la fracción arcillosa. Los suelos están saturados en bases y el pH tiende a ser generalmente neutro o alcalino. Entre los cationes cambiables, en ocasiones, el magnesio iguala o supera al calcio, sobre todo en los horizontes inferiores de los suelos que toleraron con mayor intensidad el proceso de gleyzación. La materia orgánica se une muy estrechamente con la arcilla (complejo arcillo-húmico), dando una tonalidad entre gris oscura y negra a todo el perfil en los casos más representativos de este fenómeno, aunque en ocasiones puede ser pardo oscuro. (Corella *et al.*, 2002).

Estos suelos pueden retener alta cantidad de agua por fuerzas higroscópicas debido, entre otras causas, a los altos contenidos y grado de dispersión de las arcillas. Esto, a su vez, explica el por qué un porcentaje alto del agua retenida en el suelo no sea aprovechado por las plantas, lo que se manifiesta en los altos valores que alcanza el punto de marchitez, lo que también se corresponde con la composición de sus poros (Ortiz y Rivero, 2014).

En Cuba los suelos Vertisoles tienen origen predominantemente hidromórfico. En ellos el manto freático se encuentra a profundidad de 1,5 a 2,5 m (Zonn, 1974, Hernández *et al.*, 2015).

Los Vertisoles ocupan una extensión en nuestro país de 695 000 ha, presentándose en casi todas las provincias de Cuba, la de mayor extensión la provincia de Granma donde ocupan un área de 228 000 ha; y las de menor extensión Pinar del Río (700 ha),

Matanzas (12 500 ha) y la antigua provincia Habana (14 100 ha) (Hernández *et al.*, 2014).

Estos abarcan hasta el 32% de la superficie agrícola nacional; dedicándose, fundamentalmente, a caña de azúcar, arroz y pastos (Cid *et al.*, 2016).

II.2.- Factores limitantes

Uno de los problemas más graves que enfrenta la agricultura cubana es el referente a la degradación de los suelos y no prestarle la debida atención a los procesos que la ocasionan, los cuales comprometen seriamente el futuro del país. Enfrentamos hoy un reto en las aspiraciones por lograr establecer un sistema agrícola sostenible, capaz de solventar la creciente demanda alimentaria de la población: el reto consiste en detener los procesos que degradan los suelos (Instituto de Suelos, 2001; Vargas, 2008).

La degradación de suelos es un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la productividad de los ecosistemas. Los cambios producidos en el suelo por este proceso pueden llegar a ser irreversibles y tener consecuencias sociales, económicas, ecológicas y políticas negativas. El proceso de degradación se relaciona íntimamente con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna por el hombre (Alejo *et al.*, 2012) y sobreexplotación de nutrientes (FAO, 1995).

Este aspecto negativo a menudo viene provocado por prácticas agrícolas insostenible como por ejemplo un pastoreo excesivo, cultivo de cosechas másproclives a la erosión, unutilización continua de maquinaria pesada que destruye la estructura del suelo debido ala compactación, así como el empleo de sistemas de riego insostenibles que provocanla salinización y erosión de las áreas cultivadas(Blum, 2009).

En la provincia de Holguín el factor antrópico es el principal desencadenante de los procesos de degradación, debido fundamentalmente al mal manejo de los suelos, y pueden influir también los factores climáticos y genéticos (Corella *et al.*, 2002).

En las regiones tropicales la erosión hídrica constituye el proceso de degradación de suelos más importante. Su magnitud depende, en primer lugar, de la energía cinética de las precipitaciones y del agua de escorrentía. Igualmente, también incide el relieve, pues el grado y la longitud de la pendiente aceleran la velocidad del escurrimiento

superficial. Sobre esta forma de erosión influye, además, la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y arrastre de partículas y el uso y manejo del medio edáfico (Moreira, 2014).

Otro de los factores limitantes en los Vertisoles es la salinización, provocada por la acción antropogénica, la cual puede afectar seriamente terrenos de cultivos de buena productividad por efecto acumulativo de las sales durante la explotación agrícola de áreas susceptibles a la salinización, por la extracción excesiva de agua de los pozos en época de sequía y la práctica de aplicación de altas dosis de fertilizantes químicos en suelos de mal drenaje y con manto freático alto (Álvarez, 2002).

La compactación de suelos es uno de los factores de mayor incidencia en la degradación de suelos agrícolas caracterizándose por la reducción del tamaño, continuidad y cantidad de poros del suelo. Este tipo de degradación física puede originarse por dos vías: en forma natural debido a ciclos de humedecimiento y secado del suelo o artificialmente mediante la aplicación de cargas pesadas. Esta última fuente es la de mayor contribución a los procesos de compactación en los suelos altamente productivos y mecanizados, siendo consecuencia del tránsito de maquinaria, equipos e implementos agrícolas sobre la superficie del suelo (Pla y Nacci, 2001).

II.3.- Compactación

La compactación del suelo es la densificación o reducción del volumen del espacio poroso, lo cual está asociado a cambios en la estructura del suelo y usualmente al incremento de las tensiones, así como la reducción de la conductividad hidráulica, esta causa problemas en la producción de los cultivos. Existen dos tipos principales de compactación: la superficial que se produce a poca profundidad y es provocada fundamentalmente por el tráfico de las máquinas menos pesadas, como las empleadas en la mejora y acondicionamiento del terreno; la profunda que es causada por el tráfico de la maquinaria pesada, alcanzando profundidades hasta el nivel del subsuelo (Euskadi, 2008).

Henin *et al.* (1960), consideran que la compactación es el proceso de degradación de la estructura donde pueden formarse terrones densos que se sueldan para constituir capas compactas en el interior del suelo o en superficie.

También se conoce como compactación al proceso de aumento de la densidad aparente del suelo, como respuesta a la aplicación de una fuerza externa (Bowen, 1981).

La compactación está también asociada a la baja estabilidad estructural del suelo frente al agua, lo cual causa el adensamiento. Un suelo con estructura débil aumenta su cohesión entre partículas, lo que disminuye la independencia de cada agregado y microagregado, con lo cual se reduce el espacio poroso y se hace más susceptible a la compactación o adensamiento (Gavande, 1982).

Otros factores que influyen en la compactación de los suelos son: bajos contenidos de materia orgánica, suelos desprotegidos, altas concentraciones de sodio y de otros agentes dispersantes, historia antecedente de la humedad del suelo (Lal, 1996), el manejo de los suelos, los sistemas de cultivo y las condiciones climáticas (Voorhees, 1987).

La compactación del suelo es potencialmente la mayor amenaza para la productividad agrícola. A medida que se incrementa la compactación disminuye el espacio poroso, especialmente a nivel de los macroporos, los cuales están ocupados por el agua útil. La infiltración también se ve afectada pues disminuye la permeabilidad de la capa compactada. Cuando la compactación ocurre en la capa superficial se produce un incremento de la escorrentía disminuyendo la capacidad de filtración del agua (Lara *et al.*, 2011).

En particular, la compactación afecta negativamente tanto en forma directa como indirecta diversas propiedades del suelo como la estructura, la dinámica del agua y el aire así como procesos de oxidación-reducción y poblaciones de organismos, por citar solo algunos ejemplos. La compactación del suelo es una concentración de las partículas que constituyen la fracción sólida, lo que se traduce en una disminución del espacio poroso total y consecuentemente, en un aumento de la densidad aparente. Al ocurrir esto, también se restringe el desarrollo radical de los cultivos (Henríquez *et al.*, 2011).

Esta provoca la disminución de los rendimientos agrícolas, así como mayores requerimientos energéticos en labranzas y labores culturales, necesidades

deresiembras, mayores dosis y número de pasadas de agroquímicos, necesidades crecientes de fertilizantes e ineficiencia en el uso de la maquinaria (Botta *et al.*, 2002).

En la planta disminuye el crecimiento de la raíz y las posibilidades de obtención de nutrientes, agua y aire. El suelo exhibe escorrentía superficial, endurecimiento y mala aireación; lo cual condiciona el empobrecimiento de sus cualidades físicas, reduce el tiempo disponible para la realización de operaciones agrícolas, aumenta la resistencia al laboreo y disminuyen los rendimientos agrícolas. Considerándose el suelo compactado cuando el equilibrio entre las unidades estructurales se ha roto, es decir el volumen total de poros en relación al volumen total del suelo no es el adecuado para el crecimiento óptimo del cultivo (Sánchez, 1996).

En cuanto las raíces estará caracterizado por un mayor grado de debilitamiento, crecimiento torzudo, células de la epidermis distorsionadas y por células de la corteza alargadas radialmente (Materochera *et al.*, 1992).

Forsythe *et al.* (2005) mencionan varios parámetros físicos por los cuales es posible evaluar la compactación de un suelo, entre ellos la porosidad, la densidad aparente, la infiltración, y la resistencia a la penetración, donde este último presenta el mejor parámetro para determinar el grado de compactación.

II.3.1.- Parámetros físicos relacionados con la compactación del suelo

II.3.1.1.- Estructura del suelo

La estructura es la forma en que los elementos constitutivos del suelo tienden a unirse entre sí (Mela, 1970; Warkentin, 2008) para formar unidades mayores conocidas como agregados (Ponce de León y Balmaseda, 1999). Según Pelegrín *et al.* (1990) el estado de la estructura condiciona el tamaño y la distribución de los macroporos y, por ende, el movimiento y retención del agua.

Una buena estructura en el horizonte A evita el sellado de los poros y el encostramiento superficial, posibilita la germinación de las semillas y permite la infiltración del agua. Al aumentar la infiltración disminuye, junto con la escorrentía, la erosión hídrica, lo que trae consigo el aumento de las reservas de agua. Con respecto al espacio poroso

permite la circulación del agua, aire y nutrientes, eleva la conductividad hidráulica y favorece la actividad de la microfauna y mesofauna del suelo, además facilita la penetración de las raíces. Disminuye la compactación del suelo, lo que alivia el laboreo, favorece la disminución de la densidad del suelo y mejora el desarrollo radicular (Jordan, 2006).

Tipos de estructura

La estructura del suelo se clasifica de acuerdo a su morfología, el tamaño y el grado de fragmentación (Hernández *et al.*, 2010). Según su morfología, los suelos se clasifican en: sin estructura, con estructura o con la estructura destruida en lodos. En el primer caso mencionado la misma puede ser de grano simple, típico de suelos con un alto porcentaje de arena; o masiva, cuando los agregados se unen entre sí, sin líneas de separación bien establecidas, debido a pequeñas cantidades de arcillas o materiales orgánicos. Las margas arenosas, arenas margas y polvo margoso son ejemplos comunes de suelos sin estructura masiva (Cairo y Fundora, 2005).

En los suelos con estructura esta puede ser cúbica en bloques angulares y subangulares, nuciforme, granular o grumosa; prismática, la cual puede ser prismatizada y también columnar. Por último tenemos la estructura enlosada, que puede ser estratificada o laminar. De acuerdo al tamaño se clasifican en terrón, cuando es de forma irregular y grande; grumo, cuando es menor de 10 mm, redondeado, poroso y rico en materia orgánica; al ser menores de 0.2 mm se conocen como gránulos. El grado de fragmentación se cataloga como gruesa y es característica de suelos con altos contenidos de arcillas 2:1. En los suelos de fragmentación media predominan las arcillas 2:1, con influencia del calcio y la cohesión debilitada por la materia orgánica. En los suelos donde predominan las arcillas 1:1 o arcillas hidróxidos, en las que el hierro tiene un papel fundamental, la fragmentación es fina (Hernández *et al.*, 2010).

Las estructuras granular y migajosa forman agregados pequeños, esferoidales, que no se ajustan con los terrones adyacentes y se localizan en el horizonte A. En términos relativos, la primera es menos porosa que la segunda. Cuando los agregados forman placas y sus dimensiones verticales son menores que las horizontales,

superponiéndose hasta dificultar la infiltración del agua en el suelo, se denomina laminar (Meyer *et al.*, 2011). Esta estructura aparece, en áreas bajo bosque o suelos arcillosos, en el horizonte A2.

La estructura blocosa se manifiesta cuando los agregados están limitados por otros agregados cuyas caras bien definidas forman el molde de estos; los bloques subangulares tiene las aristas más redondeadas. Las estructuras en forma de bloques se localizan en el horizonte B. Los agregados que tienen una estructura prismática son similares a columnas y al igual que en el caso de los bloques, las paredes de los otros agregados forman el molde y también se localizan en el horizonte B (Aguilera y Martínez, 1996). La estructura columnar se caracteriza por tener sus dimensiones verticales mayores que las horizontales (Meyer *et al.*, 2011). Las columnas están separadas por grietas verticales y generalmente resquebrajadas por grietas horizontales las caras de las columnas son redondeadas. Son características del horizonte B de los suelos con problemas de sodicidad (Aguilera y Martínez, 1996).

II.3.1.2.- Textura

La textura está dada por la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de la parte mineral un suelo (Mela, 1970; Ponce de León y Balmaseda, 1999; Hernández *et al.*, 2006). La fracción granulométrica que más abunda es la que determina el tipo de textura y de ella dependen la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la capacidad de intercambio catiónico y la absorción de nutrientes (Aguilera y Martínez, 1996).

Se dice que una textura es adecuada cuando permite el óptimo desarrollo vegetal. De esta manera, Rucks *et al.* (2004) plantean que un suelo tiene una buena textura cuando la relación entre los diferentes tamaños de partículas le permiten a las plantas fijar las raíces y realizar la nutrición. Estos autores señalan que de acuerdo al tamaño existen tres grupos principales: arena, limo y arcilla.

La arena está constituida por partículas minerales sólidas de tamaño comprendido entre 2.00-0.02 mm (Ponce de León y Balmaseda, 1999). Es la fracción más grande del suelo, compuesta principalmente por granos de cuarzo más o menos meteorizados (Rucks *et al.*, 2004). La arena no tiene capacidad de agregación; además, una gran

proporción de arena en el suelo da lugar a poros numerosos y relativamente grandes. Los principales minerales que la constituyen son el cuarzo, los feldspatos, las plagioclasas, entre otros. Los granos de esta fracción son visibles y se pueden observar individualmente (Casanova et al., 2004). Su capacidad de intercambio catiónico es baja. Su principal función es la composición de la matriz del suelo.

El limo agrupa las partículas de un tamaño comprendido entre 0.02 y 0.002 mm. La cualidad más notable es su apariencia suave, sedosa en estado húmedo y polvosa en estado seco (Jaramillo, 2002). Su composición química es semejante a la de la arena (Casanova et al., 2004), y al igual que esta, no tiene capacidad de agregación. No sufre expansión ni contracción y su capacidad de intercambio catiónico es baja.

La arcilla es la fracción más pequeña, su tamaño es inferior a 0.002 mm (Meyer et al., 2011) y posee propiedades físicas y químicas especiales, entre las que se encuentran una mayor superficie específica, poder absorbente, plasticidad y cohesión.

En ella predominan los minerales secundarios como la caolinita, illita, montmorillonita y vermiculita (Rucks et al., 2004); pues, según Jordan (2006), mientras que las fracciones mayores son el producto de la disgregación física de la roca madre, la arcilla proviene de la alteración química del material originario. Esta es la causa de las diferencias mineralógicas entre las mismas. Las arcillas, además, tienen la capacidad de flocularse, por lo que no se comportan como partículas individuales en el suelo.

Clasificación textural de los suelos

La designación de un suelo, en la que se tiene en cuenta su textura, se denomina clase textural, y está determinada por la proporción de la masa de cada una de las tres texturas (Hillel, 1998). Cada una de las cuales se comporta de forma diferente, y su influencia en el tipo de clase textural no depende totalmente de su proporción en el suelo. En el caso de la arcilla su incidencia es mucho mayor que la del limo o la arena, por lo que en pequeñas cantidades se hace sentir de inmediato.

La textura arcillosa se encuentra en suelos plásticos, con condiciones difíciles de laborabilidad. Debe poseer más de un 40% de arcillas. Las fracciones de arena y limo deben estar por debajo del 45 y el 40%, respectivamente (Soil Survey Staff, 1993). Al realizar la preparación de tierra en condiciones de humedad excesiva se forman

grandes terrones, que impiden la adecuada germinación de las plantas. Al contrario, en condiciones de sequía son muy compactos, con una alta consistencia, y se destruye la estructura. En condiciones de humedad alternante, la capa pulverulenta que queda, se convierte en una costra densa y compacta superficial. También pueden formarse por el efecto del paso de la maquinaria agrícola, capas muy compactas por debajo de la profundidad de labor, conocidas como “piso de arado”, que dificultan la infiltración del agua y el desarrollo de las raíces.

En los suelos con una textura limosa, es frecuente que ocurra el apelmazamiento de los mismos, lo que provoca dificultades en la circulación del aire y del agua. Son suelos con una mala estructura, en los que son frecuentes la aparición de encostramientos superficiales. Jordan (2006) señala que estos suelos no son muy frecuentes, y que se limitan a zonas de acumulación de material transportados por procesos aluviales. Según el Soil Survey Staff (1993) el contenido de limo debe ser superior al 80%.

Por otro lado, cuando en la superficie predomina la textura arenosa, los suelos son ligeros, con una escasa plasticidad y poca consistencia (Ponce de León y Balmaseda, 1999), por lo que no existen las dificultades en la preparación de tierra propias de los suelos pesados. Se caracterizan por presentar una buena aireación, debido al tamaño y la abundancia de los macroporos, lo que también favorece la velocidad de infiltración (Casanova, 1994). En los suelos arenosos la proporción de las fracciones debe ser del 85% o más para la arena (Soil Survey Staff, 1993).

Los suelos de textura franca tienen las propiedades favorables de las clases anteriores, sin sufrir por sus características negativas (poca tenacidad, compacidad y estructuración, baja retención de humedad y lenta circulación del agua y el aire), por lo que esta sería la textura ideal para los suelos (Cairo y Fundora, 2005).

II.3.1.3.- Densidad del suelo

Salgado (2001) plantea que la densidad de la fase sólida o real (D_s) representa la masa de las partículas por unidad de volumen de sólidos. Mientras que la densidad del suelo o aparente (D_a) se refiere a la masa de suelo seco por una unidad de volumen de suelo.

La densidad del suelo puede verse afectada por la textura, la estructura, la compactación, el laboreo y la materia orgánica (Cairo y Fundora, 2005). La compactación del suelo provoca el aumento de la densidad del suelo, de la resistencia mecánica y disminuye la porosidad del mismo (Taboada y Micucci, 2009; Villamil et al., 2000). Otros autores (Defosse y Richards, 2002) agregan que también puede causar considerables daños a la estructura de los suelos con la consiguiente afectación a los rendimientos agrícolas, a la laborabilidad del suelo y al medio ambiente.

Con respecto a la densidad del suelo, la Dirección General de Suelos y Fertilizantes (1984) plantea que puede clasificarse como muy baja cuando está por debajo de 1.00 Mg m^{-3} ; baja cuando oscila entre $1.00-1.20 \text{ Mg m}^{-3}$; mediana entre 1.20 y 1.45 Mg m^{-3} ; alta, dentro de un rango de 1.45 y 1.60 Mg m^{-3} y muy alta cuando supera los 1.60 Mg m^{-3} . Estos mismos autores plantean que, en el caso de la densidad de la fase sólida, los minerales secundarios presentan valores muy superiores a los encontrados en la materia orgánica, donde la Dfs es de 1.37 Mg m^{-3} ; mientras que en la caolinita, la goetita y la hematita, los rangos oscilan entre $2.0-2.5$, $3.3-4.3$ y $4.9-5.3 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente.

II.3.1.4.- Porosidad del suelo

La porosidad total es la porción del volumen total del suelo que se encuentra ocupada por los poros (Salgado, 2001). Dentro del espacio poroso se pueden distinguir los macroporos y microporos. Los macroporos no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y son los responsables del drenaje y la cantidad de aire contenido en el suelo. La macroporosidad constituye también la mayor parte del espacio en el que crece el sistema radical. Los microporos son los que retienen agua, parte de la cual es disponible para las plantas. La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de macroporos y microporos. Las características del espacio poroso, dependen de la textura y la estructura del suelo (Rucks *et al.*, 2004). El tamaño de los poros influye en los distintos procesos edáficos como son la infiltración, el almacenamiento de agua, el drenaje, el intercambio gaseoso y la resistencia al desarrollo radicular (Castiglioni *et al.*, 2010).

Una alta porosidad resulta enormemente favorable para las plantas, pues facilita el enraizamiento, ayuda a la conservación del agua y posibilita un mejor intercambio entre las raíces y el suelo. Para que el suelo tenga una buena aireación y retención de agua, la porosidad debe encontrarse entre el 40-60%. Por debajo de este rango pueden asfixiarse las raíces. Por encima del límite máximo se dificulta el contacto entre las raíces de las plantas y el suelo.

En condiciones naturales de estructura del suelo, la macroporosidad es mayor que en áreas sometidas a la influencia antrópica, pues las diferentes labores agrícolas provocan una notable disminución de la porosidad de aireación con efectos negativos para el volumen de aire del suelo (Spera *et al.*, 2004).

La macroporosidad, o porosidad ocupada por el aire, está formada por los poros más grandes que, como su nombre lo indica, están ocupados frecuentemente por aire. A menudo se presentan en forma de grietas que separan los agregados e incluso penetran en los mismos. Su importancia depende sobre todo de la estructura del suelo, del nivel de agrietamiento y, en cierta medida, de la textura. Es más elevada en suelos arenosos. La microporosidad o porosidad ocupada por el agua depende también de la estructura, pero sobre todo de la textura y de la actividad biológica. Es mayor en suelos arcillosos y en aquellos donde existe una microfauna numerosa y activa (Cairo y Fundora, 2005).

La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Mientras más gruesas son las partículas, mayores son los espacios entre ellas. Por ello, es normal que los suelos arenosos presenten poros gruesos y los suelos limosos y arcillosos, poros muy numerosos, pero de pequeño tamaño. La influencia de la estructura es tan evidente que a menudo se utiliza el valor de la porosidad para dar una idea de la estructura del suelo; además los agentes que destruyen la estructura, como por ejemplo el apisonado, disminuyen la porosidad. En los suelos cuya actividad biológica es intensa se observa con frecuencia, al lado de las huellas del recorrido de las lombrices, un gran número de galerías muy finas, debidas a la labor de los artrópodos. Cuando este tipo de poros resulta predominante se dice que el suelo tiene una porosidad tubular (Cairo y Fundora, 2005).

La porosidad total puede evaluarse como muy alta cuando es mayor del 63%, alta cuando oscila entre 55-63%, mediana al encontrarse entre el 45-55%, baja al variar entre el 40-45% y muy baja cuando está por debajo del 40% (Dirección General de Suelos y Fertilizantes, 1984).

II.4.- Resistencia a la penetración

La compactación se refleja también en un aumento de la resistencia mecánica o dureza del suelo, la cual es posible medirla con un penetrómetro. Este aparato mide la combinación de falla tangencial, compactación y flujo plástico (Henríquez *et al.*, 2011).

Este método se ha utilizado en muchos ensayos de compactación, se basa en el corte del suelo a lo largo de una superficie, determinada por la geometría del aparato o bien en ensayos de penetración, que resultan más fáciles de realizar. El penetrómetro registra lecturas a medida que profundiza en el suelo, por ello el resultado es un conjunto de medidas de resistencia para cada profundidad, expresada como fuerza por unidad de área en kilopascal (KPa) o megapascal (MPa) (Toledo y Millán, 2016).

La resistencia a la penetración es un parámetro directamente relacionado con la compactación, que es resultado del aumento en densidad y disminución de la porosidad lo que implica un deterioro de la estructura que limita el crecimiento de las plantas y el rendimiento del cultivo (Campos *et al.*, 2015).

Para medir la resistencia a la penetración se deben tener en cuenta el contenido de humedad, la velocidad de secado, el manejo y las propiedades intrínsecas del suelo. Según (Ellies y MacDona, 1988) las pérdidas de agua originan un acercamiento entre las partículas del suelo, el cual será mayor cuando más lento es el secado, y consecuentemente se aumenta la resistencia mecánica a la penetración (Valdés *et al.*, 2011).

II.5.- Variabilidad espacial

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes que, a su vez, están controlados por los factores de formación (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo). Estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles (Jaramillo, 2011).

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso agropecuario, y aquellas propiedades que más se pueden ver afectadas por el manejo del suelo son las que presentan la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz *et al.*, 2000; Jaramillo *et al.*, 2012).

(Upchurch y Edmonds, 1992) sostienen que la variabilidad presenta dos componentes fundamentales: uno Aleatorio y otro Sistemático, teniendo en cuenta la fuente de error que produce la variación. La variabilidad sistemática es aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles, mientras que la variabilidad aleatoria, o debida al azar, es la que no puede relacionarse con causas conocidas.

La variabilidad espacial se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo de la ubicación y/o del espaciamiento entre las muestras utilizadas para caracterizarlas, es decir, que el valor que toma la variable en un sitio depende de la distancia y/o de la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino (Jaramillo, 2006).

Las variaciones espaciales del suelo se pueden estudiar a través de técnicas geoestadísticas que permitirán elaborar mapas y así delimitar áreas de manejo diferencial. “Los suelos son cuerpos variables aún en cortas distancias, esta variabilidad es producto de las interacciones entre factores y procesos formadores de suelos” (Andriotti, 2010). Se ha estudiado la variabilidad de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan la productividad de los cultivos, reportándose asociaciones entre ellas y el rendimiento, aunque dichas asociaciones dependen del rango de variación del parámetro y del rango en que éste afecta al rendimiento, lo que permite medir y manejar la variabilidad espacial para aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

Cuando el valor que toma una propiedad en un sitio depende de la distancia y/o de la dirección en la cual se ubica con respecto a otro sitio vecino, se tiene una variable con dependencia espacial. (Journel y Huijbregts, 1978) llaman a estas propiedades que tienen dependencia espacial “variables regionalizadas”. Estas variables regionalizadas

son una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido y tienen, según (Webster y Oliver, 2007), algún grado de autocorrelación. Para el estudio de este tipo de variables se tiene un grupo de herramientas estadísticas conocido con el nombre genérico de “Geoestadística” o “Estadística Espacial”.

La Geoestadística, se define como una ciencia aplicada que estudia las variables distribuidas espacialmente, parte de una muestra representativa del fenómeno en estudio. Se basa en el hecho que los datos se correlacionan espacialmente, es decir, un dato se relaciona con otros cercanos, pero a medida que se alejan del mismo la dependencia espacial disminuye (González, 2003).

En el campo de las geociencias es común encontrar variables distribuidas espacialmente. Para el estudio de estas variables son usados diversos procedimientos geoestadísticos de estimación o simulación. Esto es, a partir de un conjunto de muestras tomadas en localizaciones del dominio en que se manifiesta un fenómeno a estudiar y consideradas representativas de su realidad, que por lo general es siempre desconocida, estos procedimientos permiten la descripción o caracterización de las variables con dos fines diferentes, primero, proporcionar valores estimados en localizaciones de interés y segundo, generar valores que en conjunto presenten iguales características de dispersión que los datos originales (Cuador, 2002).

La semivarianza es una medida de la similitud que existe entre observaciones situadas a una determinada distancia mientras más similares sean las observaciones, menor la semivarianza (Ovalles, 1991).

Para el análisis de semivarianza, el grupo de datos debe tener una distribución normal y estacionalidad de segundo orden (Trangmar *et al.*, 1985) o, por lo menos, presentar simetría en la distribución y cumplir con la hipótesis intrínseca que sólo es violada cuando hay una tendencia obvia en la variable regionalizada (Upchurch y Edmonds, 1992; Webster, 2008).

La semivarianza determina la variación de una propiedad física determinada entre pares de observaciones y se grafica mediante un semivariograma. Una vez generado, se procede a interpolar mediante el kriging puntual, generando valores en áreas cercanas al punto de muestreo (Becerra *et al.*, 2005).

El semivariograma (o simplemente variograma) es una gráfica que relaciona los valores promedios de la semivarianza con el espaciamiento presente entre las muestras que se toman para hacer el estudio. Cuando una propiedad tiene dependencia espacial, la semivarianza aumenta, a medida que aumenta la distancia entre muestras y la semivarianza puede llegar a estabilizarse a una determinada distancia, situación en la que se tiene un semivariograma limitado. Cuando la semivarianza aumenta monótonamente con la distancia y no se estabiliza dentro del rango de distancias utilizadas para el muestreo, se tiene un semivariograma no transicional (Webster y Oliver, 2007).

A los semivariogramas experimentales se les pueden ajustar varios modelos teóricos. (Webster y Oliver, 2007) y (Gallardo y Maestre, 2008) describen una buena cantidad de ellos: lineal, circular, esférico, pentaesférico, exponencial, gaussiano, etc. Los que se ajustan con mayor frecuencia a las propiedades del suelo que presentan dependencia espacial son el esférico y el exponencial, y según recomendación de (Webster y Oliver, 2007), deben preferirse sobre los demás.

Según (Jaramillo, 2012) el conocimiento de la dependencia espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere sobre él, tiene varias aplicaciones prácticas como:

- Elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.
- Hacer control de calidad de mapas de suelos.
- Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales en ensayos de campo.
- Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.
- Mejorar la interpretación de resultados de investigación.
- Ayudar en el manejo intensivo de los suelos.

De las aplicaciones anteriores, la más utilizada es la de elaborar mapas de isolíneas que muestren la distribución espacial de alguna variable, mediante la técnica del kriging, la cual es una técnica que permite hacer interpolaciones óptimas y no sesgadas de variables regionalizadas en sitios no muestreados, utilizando las propiedades estructurales de un semivariograma y un conjunto de datos iniciales. Este método tiene

la ventaja, sobre otros métodos de interpolación, de que a cada valor interpolado se le calcula el error con que ha sido estimado, lo que da una medida de la precisión con que se hace la interpolación. Este error también se puede cartografiar, pudiéndose establecer en qué lugares son más y en cuales menos fiables las estimaciones hechas (Webster y Oliver, 2007). Se han diseñado varios métodos para hacer el kriging cuya aplicación depende del tipo de datos de que se disponga (Goovaerts, 1998, 1999; Webster y Oliver, 2007; Hengl, 2009)

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en áreas del Bloque Experimental de Guaro, perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) de Holguín, en un suelo Vertisol Crómico cálcico y gléyico (Hernández *et al.*, 2015) bajo tres coberturas vegetales: caña de azúcar (caña planta), pasto natural (explotado de forma intermitente) y bosque secundario (con un estrato herbáceo bien desarrollado e intervenido como zona de pastoreo transicional por el ganado vacuno). La zona presenta una precipitación media anual de 1074.9 mm y una temperatura media mensual de 25.3 °C.

Se escogió un área en la que se encontraban colindantes las tres coberturas vegetales mencionadas y se muestrearon 47 puntos distribuidos irregularmente (Figura 1), comprendidos dentro de un rectángulo orientado de norte a sur, con una superficie de 2.028 ha.

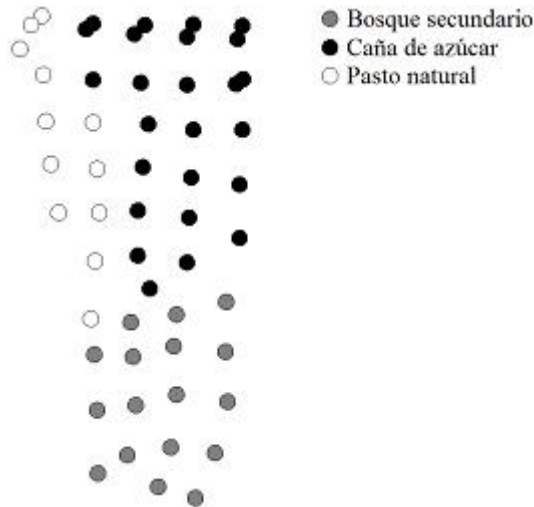


Figura 1.- Distribución de los puntos de muestreo para la resistencia a la penetración.

Para la determinación de la resistencia a la penetración (RP) se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (Stolf et al., 1983), con la masa impactadora de 4 kg regulada a una altura de 0.40 m. La transformación de la cantidad de impactos por dm a megapascales (MPa) se realizó a través de la expresión matemática planteada por Stolf (1991):

$$RP(MPa) = 0,547 + 0,675 * N \tag{1}$$

Donde RP es resistencia a la penetración y N es la cantidad de impactos por dm. Estos resultados fueron expresados en intervalos constantes (10 cm), hasta los 30 cm de profundidad.

Se determinó la semivarianza en función de la distancia y se realizó el ajuste del semivariograma experimental mediante los modelos teóricos adecuados. El semivariograma experimental $\gamma(h)$ es:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_p(h)} \sum_{i=1}^{N_p(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{2}$$

Donde $N_p(h)$ es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia (deben ser más de 50), $Z(x_i)$ es el valor de la variable en el sitio x_i y $Z(x_i + h)$ es el valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia h del sitio x_i . Una vez

establecidos los modelos teóricos, se verificó el grado de dependencia espacial mediante los índices siguientes:

$$GD(\%) = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad (3)$$

Propuesto por Cambardella *et al.* (1994), en el que GD es el grado de dependencia, C0 es el efecto pepita y C1 es la variabilidad estructural. El grado de dependencia tiene la siguiente clasificación: fuerte dependencia espacial ($GD \leq 25\%$), moderada dependencia espacial ($25 < GD \leq 75\%$) y débil dependencia espacial ($GD > 75\%$).

$$IDE(\%) = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad (4)$$

Planteado por (Biondi *et al.*, 1994), en el que IDE es el índice de dependencia espacial, C1 es la variabilidad estructural y C0 es el efecto pepita. De acuerdo a la clasificación propuesta para el GD por (Cambardella *et al.*, 1994), (Seidel y Oliveira, 2016) plantean para el IDE de Biondi *et al.* (1994) las siguientes categorías: fuerte dependencia espacial ($IDE > 75\%$), moderada dependencia espacial ($25 < IDE \leq 75\%$) y débil dependencia espacial ($IDE \leq 25\%$).

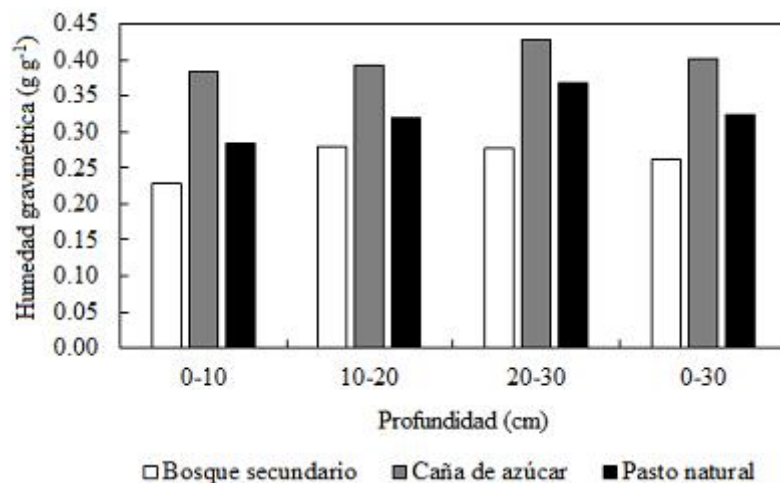


Figura 2.- Comportamiento de la humedad gravimétrica bajo las tres coberturas vegetales.

Para el análisis exploratorio de los datos se utilizó el software Statistica 8. Los semivariogramas y el krigeaje se realizaron mediante el Surfer 8. Para interpretar los

valores de resistencia a la penetración se utilizó la categorización propuesta por Arshad et al. (1996): extremadamente baja, < 0.01 MPa; muy baja, 0.01-0.1 MPa; baja, 0.1-1 MPa; moderada, 1-2 MPa; alta, 2-4 MPa; muy alta, 4-8 MPa; extremadamente alta, > 8 MPa.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 muestra las principales medidas de posición, dispersión y forma de la resistencia a la penetración por profundidades, determinada en el Vertisol crómico bajo diferentes coberturas vegetales. El comportamiento de la media muestra que existe un incremento de la resistencia a la penetración en la medida que aumenta la profundidad, y que este incremento es más notable al pasar de la capa superficial hacia el horizonte de 10-20 cm.

Pinzón et al. (2016), al estudiar la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos en un área del departamento de Boyacá (Colombia) bajo diferentes coberturas vegetales, encontraron que la resistencia a la penetración aumentaba con el incremento de la profundidad. También (Becerra *et al.*, 2005), al evaluar un Haplustert Pélico en el valle del Cauca (Colombia) encontraron que la compactación (densidad aparente y resistencia a la penetración) aumentaba con la profundidad.

De la misma forma, (Williams y Reyes, 2014) al estudiar los procesos de compactación en un Vertisol bajo cuatro condiciones de manejo en la llanura de Coro, estado de Falcón (Venezuela) observaron, de forma general, altos valores de densidad aparente (1.43-1.65 Mg m⁻³) y de resistencia a la penetración (2.57-4.03 MPa) y el incremento de las estas después de los 15 cm de profundidad; además de una acentuación del proceso de degradación mencionado en las áreas de antiguos potreros y las altamente intervenidas.

Tabla 2.- Análisis exploratorio de datos de resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico bajo diferentes coberturas vegetales.

Prof. (cm)	Media	Me diana	Error estándar	Míni mo	Máxi mo	Va rian za	Desv. estándar	C. V. (%)	Asi me tría	Curto sis
0-10	1.554	1.447	0.083	0.902	2.910	0.324	0.569	36.63	0.677	-0.71
10-20	2.135	1.865	0.129	0.979	4.260	0.787	0.887	41.55	0.580	-0.69
20-30	2.275	1.970	0.112	1.338	4.260	0.592	0.769	33.82	0.816	-0.37

0-30	1.988	1.897	0.097	1.158	3.360	0.444	0.666	33.51	0.484	-0.91
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Prof.: Profundidad; Desv. Estándar: Desviación estándar; C. V.: Coeficiente de variación.

La cercanía entre la mediana y la media indica que no existen observaciones extremas de resistencia a la penetración que provoquen el desplazamiento de la media. Mientras que, los valores de resistencia a la penetración mínimos y máximos aumentan con la profundidad. Encontrándose la mayor diferencia (rango) entre los mismos en la profundidad de 10-20 cm.

Los resultados obtenidos con la varianza y la desviación estándar muestran que en la profundidad de 10-20 cm existe una mayor dispersión de los valores de resistencia a la penetración observados con respecto a la media de la muestra. En el caso del coeficiente de variación muestra que en la profundidad de 10-20 cm existe una mayor dispersión de los datos alrededor de la media y que la probabilidad de encontrar un valor de resistencia a la penetración cercano a esta es menor que en el resto de las capas.

En el caso de los estadígrafos de forma, los valores de la simetría (a partir del coeficiente de asimetría de Fisher), superiores a 0, indican que la deformación horizontal de los valores de la variable respecto al valor central de la media es asimétrica positiva a la derecha. Mientras que los valores de la curtosis señalan que la distribución de los valores de resistencia a la penetración es menos apuntada que la distribución normal (curtosis platicúrtica).

La Tabla 3 muestra los valores del efecto pepita, de la meseta y el alcance que se obtuvieron al ajustar los semivariogramas experimentales mediante los modelos teóricos adecuados; así como los índices de dependencia espacial. El efecto pepita muestra que la semivarianza independiente de la distancia de muestreo aumenta con la profundidad, sobre todo en la capa de 20-30 cm. En todos los casos la varianza se torna constante (meseta) a partir de distancias (alcance) cercanas entre sí.

Las profundidades de 0-10 y de 10-20 cm fueron ajustadas al modelo esférico con un alcance de 90 y 80 m, respectivamente. La capa de 0-30 cm, también se ajustó con un

modelo esférico, con un alcance de 85 m. En el caso de la profundidad de 20-30 cm, el modelo gaussiano de ajuste tuvo un alcance de 80 m.

Con respecto a los índices de dependencia espacial, se aprecia que para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, según Cambardella et al. (1994), existe una fuerte dependencia espacial. Mientras que para la capa de 20-30 cm la dependencia espacial es moderada. Para la profundidad de 0-30 cm la dependencia espacial se clasificó como fuerte.

(Vásquez *et al.*, 2010) en un Entisol del suborden Psamments, de origen aluvial, poco evolucionado y de textura gruesa, encontraron que la resistencia a la penetración tenía, a partir del índice de Cambardella, una dependencia espacial moderada.

Tabla 3.- Parámetros de los modelos teóricos e índices de dependencia espacial.

Prof. (cm)	Modelo	Efecto pepita	Meseta	Alcan ce (m)	Índices de Dependencia Espacial		
					Cambar della	Biondi	Seidel y Oliveira
0-10	Esférico	0.001	0.22	90	0.45	99.55	61.08
10-20	Esférico	0.005	0.62	80	0.81	99.19	54.11
20-30	Gaussiano	0.28	0.45	80	62.22	37.78	20.61
0-30	Esférico	0.04	0.40	85	10.00	90.00	52.16

Prof.: Profundidad

Según los índices de dependencia espacial propuestos por Seidel y Oliveira (2014), para el modelo teórico esférico, entre los valores de resistencia a la penetración para las profundidades de 0-10, de 10-20 y de 0-30 cm existe una *fuerte* dependencia espacial. En la misma categoría de *fuerte*, para el modelo gaussiano, se clasifica la dependencia espacial de la resistencia a la penetración en la profundidad de 20-30 cm.

La Figura 3 muestra la distribución espacial de la resistencia a la penetración en el Vertisol Crómico bajo diferentes coberturas vegetales. En la profundidad de 0-10 cm la menor resistencia a la penetración se encontró en caña de azúcar, con valores entre 0.902-1.697 MPa, clasificándose la resistencia a la penetración en las categorías de *baja* y *moderada*, con una *RP* promedio de 1.119 MPa (*moderada*).

Se observó un incremento de la compactación en el bosque secundario, con un rango de 1.161-2.235 MPa (*moderada* a *alta*) y una resistencia a la penetración promedio de

1.712 MPa (*moderada*). En la franja ocupada por el pasto natural se encontraron los mayores valores de resistencia a la penetración, que oscilaron entre 1.161-2.910 MPa (de *moderada* a *alta*), con un promedio de 2.229 MPa, para clasificarse como *alta*.

En la profundidad de 10-20 cm se observó un incremento de la resistencia a la penetración, sobre todo en el extremo suroeste del área, donde el bosque secundario limita con el pasto natural y una cañada por la que circula una corriente de agua durante la época de lluvias. En el bosque secundario la resistencia a la penetración fue de entre 2.347-4.035 MPa (de *alta* a *muy alta*), con un valor promedio de 3.106 MPa (*alta*). Mientras que en pasto natural se encontró una resistencia a la penetración de entre 1.733-4.260 MPa (de *moderada* a *muy alta*), con una *RP* promedio de 2.518 MPa (*alta*).

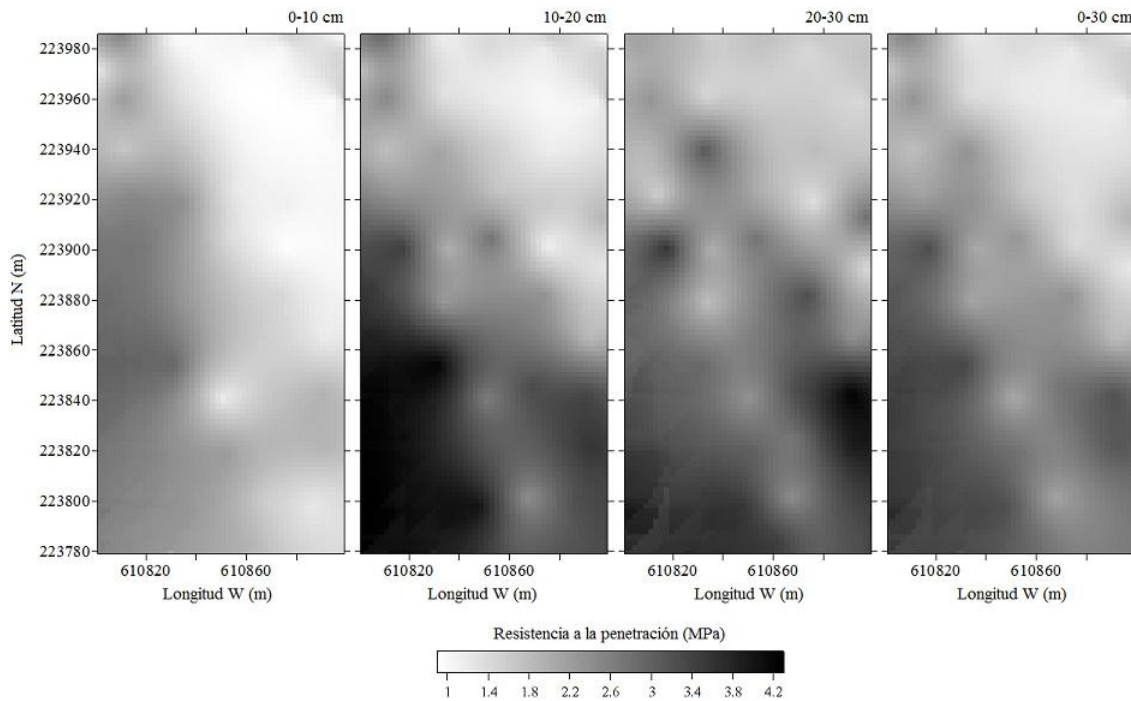


Figura 3.- Mapas de la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración por profundidades.

La resistencia a la penetración en caña de azúcar mostró un incremento hasta valores que oscilaron en un rango de 0.979-2.741 MPa (de *moderada* a *alta*), con un promedio de 1.430 MPa (*moderada*). El aumento de la compactación fue más notable en las partes contiguas al pasto natural y al bosque secundario.

En la profundidad de 20-30 cm desaparece la capa compactada encontrada en la profundidad sobre yacente en el área del bosque secundario limítrofe con el pasto natural. No obstante, el primer tipo de cobertura vegetal mencionado mantiene una compactación superior, con valores de resistencia a la penetración que se encuentran comprendidos entre 2.347-4.260 MPa (de *alta* a *muy alta*) y una RP promedio de 3.210 MPa (*muy alta*).

Mientras que en el pasto natural se observó una disminución de los valores mínimo y máximo de resistencia a la penetración, para encontrarse propiedad física entre 1.560-3.585 MPa (de *moderada* a *alta*). La RP promedio en este tipo de cobertura vegetal fue de 2,295 MPa, clasificándose como *alta*. En los sitios ocupados por el cultivo de la caña de azúcar se observó un incremento de la resistencia a la penetración en caña de azúcar con valores de entre 1.404-2.797 MPa (de *moderada* a *alta*). En este tipo de cobertura vegetal la resistencia a la penetración promedio fue de 1.776 MPa (*moderada*).

De forma general, en la profundidad de 0-30 cm, se aprecia que la menor compactación aparece en caña de azúcar, con una resistencia a la penetración de entre 1.158-2.291 MPa (de *moderada* a *alta*), con un promedio de 1.442 MPa (*moderada*). La compactación aumenta hacia los sitios donde se encuentra el pasto natural, con una oscilación de entre 1.582-3.360 MPa (de *moderada* a *alta*) y 2.347 MPa como promedio (*alta*). Los valores de resistencia a la penetración mínimo y máximo más altos se encontraron en el bosque secundario (2.047-3.247 MPa, *alta*), con 2.676 MPa (*alta*) como promedio. En este tipo de cobertura vegetal, la compactación se acentuó, sobre todo, en el extremo suroeste.

V.- CONCLUSIONES

La resistencia a la penetración aumentó con la profundidad, al mostrar valores de 1.554, 2.135 y 2.275 MPa para las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente; con 1.988 MPa para la capa de 0-30 cm. Sin embargo, la capa de 10-20 cm, mostró una mayor dispersión de los valores observados con respecto a la media de la muestra. La profundidad de 0-10 cm tiene una mayor asimetría positiva hacia la derecha y un menor apuntamiento de los valores de resistencia a la penetración observados con respecto a una distribución normal.

Los semivariogramas experimentales fueron ajustados mediante modelos teóricos esféricos (0-10, 10-20 y de 0-30 cm) y gaussiano (20-30 cm). En esta última profundidad, según el grado de dependencia de Cambardella, existe una *moderada* dependencia espacial entre las variables regionalizadas. Para el resto de las capas la dependencia espacial es *fuerte*. Los índices de dependencia espacial de Seidel y Olivera indican una *fuerte* dependencia espacial en todas las profundidades.

En la profundidad de 0-10 cm, la compactación fue menor en los sitios plantados con caña de azúcar con una resistencia a la penetración clasificada de *baja a moderada*, en el bosque secundario y en el pasto natural de *moderada a alta*. En las capas de 10-20 y de 20-30 cm, en caña de azúcar y pasto natural la resistencia a la penetración se clasificó de *moderada a alta*, mientras que en el bosque secundario fue de *alta a muy alta*.

VI.- BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, D. C., Hernández Acosta, E., Maldonado Torres, R. y Álvarez Sánchez, M. E. (2015). Variabilidad espacial del carbono en un suelo después de 10 años de retiro e incorporación de residuos de cosecha. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 199-208.
- Aguilera Contreras, M. y Martínez Elizondo, R. (1996). Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, 256 pp.
- Alejo, G., Salazar, F., García, J., Arrietta, B., Jiménez, Victor y Sánchez, A. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Launillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15: 323-8
- Álvarez, J. (2002). Caracterización y manejo de los principales factores edáficos limitantes de la agro productividad de los suelos. Universidad Camilo Cienfuegos, Facultad de Agronomía, Matanzas, Cuba. 31 p.
- Andriotti, J.L.S. (2010). Fundamentos de Estadística e Geoestadística. São Leopoldo: Editora Unisinos. 165 p.
- Arshad, M. A. Lowery, B. y Grossman, B. (1996). Physical test for monitoring soil quality. *En: Doran, J. W. & Jones, A. J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America, Madison, WI.*123-44 p.
- Becerra, C. Madero, E. Herrera, O. y Amézquita, E. (2005). Caracterización espacial de la compactación en terrenos agrícolas de CIAT, Colombia. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 8(16), 33-7.
- Bennett, H. H. y Allison, R. V. 1966. Los suelos de Cuba. Edición Revolucionaria. La Habana, 375 p.
- Biondi, F.; Myers, D. E.; Avery Ch. C. 1994. Geostatistically modeling st em size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(7), 1354-68.

- Blum W. (2009). Soil degradation - concepts for bridging between science, politics and decision making. Proceedings of the 1st International conference of Soil Degradation, 2009, Febr 17-19; Riga, Latvia. p. 12.
- Bowen, H. (1981). Alleviating mechanical impedance. In: Modifying the root environment to reduce crop stress. in: H. M. Arkin G.F. & Taylor, eds (Ed.), American Society of Agricultural Engineers-ASAE, USA.
- Buol, S.W., Hole, F.D. y McCracken, R.J. (1973). Soil Genesis and Classification: Ames, The Iowa State University Press, 415 p.
- Cairo Cairo, P. y Fundora Herrera, O. (2005). Edafología. Editorial Félix Varela, 2da Edición, 1ra reimpresión. La Habana, 477 p.
- Cairo Cairo, P., Machado de Armas, J., Díaz Martín, B., Colás Sánchez, A., Reyes Hernández, A., Torres Artilles, P., Dávila Cruz, A., Rodríguez López, O., Abreu Moré, I. y Jiménez Carrazana, R. (2008). Evaluación de la degradación de los suelos de la región central de Cuba. *Centro Agrícola*, 35(1), 17-21.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F. y Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58, 1501-11.
- Campos, S., López, Juan., Cadena, Martín., Reynolds, Marco., Cuervo, Neftali y Ramírez, Gabriela. (2015). Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración del suelo. *Terra Latinoamericana*. 33:120.
- Carvalho, L. A. de; Meurer, I.; Silva Junior, C. A. da; Centurion, J. F. 2012. Spatial variability of soil physical properties in two management systems in sugarcane crop. *Engenharia Agrícola*, 32 (1): 60-68.
- Casanova Pinto, M., Vera Elizondo, W., Luzio Leighton, W. y Salazar Guerrero, O. 2004. Edafología. Guía de clases prácticas. Universidad de Chile. Santiago, 75 pp.
- Castiglioni, M., Mazzoni, Daniela, Chagas, C., Palacín, E., Santanatoglia, O. y Massobrio, M. 2010. Distribución de poros en una ladera de Pampa ondulada cultivada con siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 28(2): 243-248.

- Cid, G., Herrera, Julián., López, Teresa y González, Felicita. (2016). Resultados de algunas investigaciones en suelos Vérticos de Cuba. *Ingeniería Agrícola* 6:51-56
- COM. (2006). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending.
- Corella, T., Andérez, M., Taboada, M. M y Taboada, M. T.(2002). Principales aspectos edafológicos de la provincia de Holguín (Cuba). Uso y manejo de los suelos. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña* 27:103-115.
- Cuador, J. (2002). Elementos de Geoestadística, Departamento de Informática, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba. pp. 52.
- De la Rosa Andino, A. A., Herrera Suárez, M., González Cueto, O., Benítez Leyva, L. V., Calzada Pompa, I. y García Pedraza, L. (2013). Evaluación de la validez del modelo constitutivo Drucker Prager Extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un Vertisol de la región central de Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(1), 27-35.
- Defosse, P. y Richard, G. (2002). Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage Research*, 67, 41-64.
- Dexter, A. R., Czyż, E. A. y Gałę, O. P. (2007). A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 93: 412-419.
- Dirección General de Suelos y Fertilizantes. 1984. Manual de interpretación de los suelos. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 136 pp.
- Euskadi (2008): Red de portales de la Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Compactación del suelo [en línea].
- FAO. (1995). Comercio internacional, medio ambiente y desarrollo agrícola sostenible. En: El estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación., Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación., Roma, Italia.

- FAO. (2006). World Reference Base for soil resources. A framework to international classification, correlation and communication. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, 128 p.
- FAO-UNESCO. (1989). Soil map of the world, Revised Legend. FAO, Roma/ISRIC, Wageningen, 138 p.
- Forsythe, W., Sancho, F y Villatoro, M. (2005). Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):175-185.
- Gajda, A. M.; Czyż, E. A.; Dexter, A. R.; Furtak, K. M.; Grządziel, J.; Stanek-Tarkowska, J. 2018. Effects of different soil management practices on soil properties and microbial diversity. *International Agrophysics*, 32: 81-91.
- Gallardo, A. y F. T. Maestre. (2008), Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. En: Maestre, F. T.; A. Escudero y A. Bonet (Ed.). Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: Métodos y aplicaciones. Universidad Rey Juan Carlos. Editorial Dykinson S.L. Madrid. p. 215-272.
- Gavande, A. (1982). Física de suelos, principios y aplicaciones, México.
- González, O., Iglesias, C. y Herrera, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18, 57-63.
- González, T. y Díaz, M. (2003). Módulo de geoestadística para Excel: aplicación a pesca. En: VI Congreso Gallego de Estadística e Investigación de Operaciones. Disponible en Internet: <http://eioweb.uvigo.es/visgapeio/8>
- Goovaerts, P. (1998), Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of the microbiological and physic-chemical soil properties. *Biology and fertility of the Soils*, 27(4), 315-34.
- Goovaerts, P. (1999), Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives. *Geoderma*, 89 (1-2): 1-45.

- Guimarães, R. M. L., Ball, B. C., Tormena, C. A., Giarola, N. F. B. y Silva, A. P. 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil and Tillage Research*, 127, 92-99.
- Hamza, M. A. y Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82, 121-145.
- Haruna, S. I. y Nkongolo, N. V. (2015). Effects of tillage, rotation and cover crop on the physical properties of a silt-loam soil. *International Agrophysics*, 29, 137-145.
- Hengl, T. (2009), A Practical Guide to Geostatistical Mapping. 2nd. Ed. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 271 p.
- Henin, S., Feodoroff, A., Gras, R. y Monnier, G. (1960). Le profil cultural: Principes de physique du sol. Paris, Masson, 320 p.
- Hernández Jiménez, A., Ascanio García, M. O., Morales Díaz, Marisol, Bojórquez Serrano, J. I., García Calderón, Norma E. y García Paredes, J. D. (2006). Fundamentos sobre la formación del suelo, los cambios globales y su manejo. Universidad Autónoma de Nayarit. Tepic, 171 p.
- Hernández Jiménez, A., Bojórquez Serrano, J. I., Morell Planes, F., Cabrera Rodríguez, A., Ascanio García, M. O., García Paredes, J. D. y Madueño Molina, A. (2010). Fundamentos de la estructura de los suelos tropicales. Universidad Autónoma de Nayarit. Tepic, 79 p.
- Hernández Jiménez, A., Pérez Jiménez, J. M., Ascanio García, O., Ortega, F., Ávila, L., Cárdenas, A. y Marrero, A. (1975). II Clasificación Genética de los suelos de Cuba. *Revista de la Agricultura*, 8(1), 47-69.
- Hernández Jiménez, A., Pérez Jiménez, J. M., Bosch Infante, D. y Castro Speck, N. (2015). Clasificación de los suelos de Cuba. INCA Ediciones, San José de Las Lajas. 91 p.
- Hernández Jiménez, A., Pérez Jiménez, J. M., Bosch Infante, D., Rivero Ramos, L. y Camacho Díaz, E. (1999). Nueva Versión de Clasificación Genética de los suelos de Cuba. AGRINFOR, Ministerio de la Agricultura. La Habana, 64 p.

- Hernández, A., Llanes, Violeta., López, Dagoberto y Rodríguez, Jesús. (2014). Características de Vertisoles en áreas periféricas de La Habana. *Cultivos Tropicales*, 35, 68-74
- Herrick, J. E. y Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 1320-1324.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, 771 p.
- Instituto de Suelos, (2001). Programa Nacional de Conservación y Mejoramientos de Suelos. AGRINFOR, la Habana., 5-7, 11, 19,31-32 p.
- Instituto de Suelos. (1973). Génesis y clasificación de los suelos de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba, 315 p.
- Jaramillo, D. F. (2011), El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 553 p.
- Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, 613 pp.
- Jaramillo, D. F. (2006). Efecto de la variabilidad sistemática de la producción de frijol en experimentos de fertilización. Segunda siembra. *Rev Fac Nal Agr Medellín*. 59(1), 3147-65.
- Jaramillo, D. F. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 1 (1): 73-87.
- Jaramillo, D. F., S. Sadeghian y L. A. Lince. (2012), Agricultura de precision en el manejo de la fertilización
- Jordan López, A. (2006). Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla. Sevilla, 143 pp.
- Jordan López, A. (2006). Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla. Sevilla, 143 pp.
- Journel, A. G. y Huijbregts, Ch. J. (1978), *Mining geostatistics*. Academic Press. Londres. 598 p.

- Lara Coba, D., Herrera Suárez, M. y Iglesias Coronel, C. E. (2011). Sensoramiento continuo de la compactación del suelo: revisión y análisis. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3), 35-40.
- Marques, F. A., Souza, R. A. da S., Souza, J. E. S. de, Lima, J. F. W. F. y Souza Júnior, V. S. de. (2014). Caracterização de Vertissolos da ilha de Fernando de Noronha, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1051-65
- Materechera, S., Dexter, A., y Alston, A. (1991). Penetration of very strong soils by seedlings roots of different plan species. *Plant and Soil*, 135, 32-41
- Meyer, J., Rein, P., Turner, P. y Mathias, Kathryn. 2011. Good management practices manual for cane sugar industry. International Finance Corporation. Johannesburgo, 696 pp.
- Moreira, B. (2014) Erosão hídrica pós-plantioem florestas de eucalipto nabacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul... *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38:1565-1575.
- Núñez, Ramón., López, Vilma., Ricardo, Sandro y Paz, Antonio. (2010). Estudio de la resistencia de penetración de un suelo Vertisol con el uso del penetrómetro de impacto en la localidad de "Antonio Maceo". Cacocum. Holguín. Cuba. *Ciencias Holguín*, pp.3.
- Ortiz, C. y Rivero L. (2014). Propiedades físicas e hidrofísicas de Vertisoles en Cuba relacionadas con su régimen hídrico: porosidad y retención de agua. *Granma Ciencia*, 18(2).
- Ovalles, F. (1992), Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales. Serie B. Maracay. 44 p.
- Ovalles, V., F, A. (1991). Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela, para el establecimiento en lotes comerciales en el estado Cojedes. En: *Agronomía Tropical*. Vol. 41, no. 1; p. 5-22.
- Paz González, A.; S. R. Vieira and M. Taboada. (2000), the effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97: 273-292.

- Pelegrín, F., Moreno, F., Martín Aranda, J. y Camps, M. 1990. Evolución de la resistencia a la penetración en un suelo de la provincia de Sevilla (España), sometido a diferentes sistemas de laboreo. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo. La Habana, Cuba.
- Pinzón Gómez, L. P.; Álvarez Herrera, J. G.; Mesa Amezquita, A. 2016. Study of the spatial variability of moisture and compaction in soils with different plant covers. *Agronomía Colombiana*, 34 (3): 355-363.
- Pla, I. y Nacci, S. (2001). Impacts of mechanization on surface erosion on mass movements in vineyards of the Anoia-Alt Penedes Area (Catalonia, Spain). In:
- Ponce de León, D. y Balmaseda C. 1999. El recurso suelo en el cultivo de la caña de azúcar. Instituto Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar. La Habana, 115 pp.
- Resende, J. M. do A.; Marques Júnior, J.; Martins Filho, M. V.; Dantas, J. S.; Silva Siqueira, D. S.; Teixeira, D. de B. 2014. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 1077-1090.
- Reyes, W. 2007. Evaluación de condiciones y riesgos de compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. *Croaztía*, 8 (1 y 2): 63-72.
- Rucks, L., García, F., Kaplan, A., Ponce de León, J. y Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de agronomía, Universidad de la República. Montevideo, 68 pp.
- Salgado, E. 2001. Relación suelo-planta-agua. Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso, 25 pp.
- Schindwein, J. A.; Anghinoni, I. 2000. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidad de e amostragem do solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24: 85-91.
- Seidel, E. J.; Oliveira, M. S. 2014. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 699-705.

- Seidel, E. J.; Oliveira, M. S. 2016. A classification for geostatistical index of spatial dependence. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40: 1-10.
- Silva, R. A.; Siqueira, G. M.; Costa, M. K. L.; Guedes Filho, O.; Silva, E. F. F. 2018. Spatial variability of soil fauna under different land use and managements. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42: 1-18.
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. 2000. Suscetibilidade à compactação de un Latossolo Vermelho-Escuro e de un Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24: 239-249.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual. Handbook 18. United State Department of Agriculture. Washington, D.C, 437 pp.
- Soil Survey Staff. 2010. Key to Soil Taxonomy. 11th Edition. United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C, 346 p.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. USDA, Washington D. C. 338 pp.
- Spera, S. T., Santos H. P., Fontaneli, R. S. y Tomm, G. O. 2004. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 533-542.
- Stolf, R. 1991. Teoría e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15: 229-235.
- Stolf, R.; Fernández, J.; Furlani, V. L. 1983. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto medelo IAA/planasucar-Stolf. *Revista Azúcar, Alcohol e Subproductos*, 1 (3): 235-241.
- Taboada, M. A. y Micucci, S. N. 2009. Respuesta de las propiedades físicas de tres suelos de la Pampa deprimida al pastoreo rotativo. *Ciencia del Suelo*, 27(2): 147-157.
- Toledo, V y Millán, Zuly. (2016). Construcción y calibración de un penetrómetro de impacto para medir los efectos del senderismo. *Ciencia, Docencia y Tecnología*. 27:485.

- Trangmar, B.B.; R. S. Yost and G. Wehara. (1985), Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy*, 28: 45-94.
- Upchurch, D. R. and W. J. Edmonds. (1992), Statistical procedures for specific objectives. In: *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special publication No. 28. 2^a Ed. SSSA. Madison. pp: 49-71.
- USDA, 1988 soil taxonomy: Washington, D.C., U.S. Department of agricultura, soil conservation service, handbook 436, U.S. Gocernment printg office, 754p.
- Valdés, Nidia., González, Luis y E, Adrián. (2011). Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales. *Acta Agronómica* 60:258-268.
- Vargas, S. 2008. Rediseño, manejo y evolución de un agro ecosistema de pastizal con enfoque integrado para la producción de leche bovina. Tesis presentada en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Veterinarias. Universidad Central Las Villas, Santa Clara, Cuba. 162 p
- Vásquez Polo, J. R.; Baena García, D.; Menjivar Flores, J. C. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica*, 59 (4): 449-456.
- Villamil, M. B., Amiotti, N. M. y Peinemann, N. 2000. Disminución del espesor del horizonte A por sobrepastoreo animal en la región sur del Caldenal. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CD-ROM). Mar del Plata, Argentina.
- Voorhees, W.D. (1987). Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. *Soil Tillage Res.* 10:29-38.
- Warkentin, B. P. 2008. Soil structure: A story from tilth to habitat. *Advances in Agronomy*, 97: 240-269.
- Webster, R. (2008), Chapter 1. Soil science and geostatistics. In: *Soil geography and geostatistics*. Krasilnikov, P. et al. Eds. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxenbourg. pp: 1-11.

Webster, R. and M. Oliver. (2007), *Geostatistics for environmental scientists*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. England. 315 p.

Williams J.; Reyes R. 2014. Procesos de compactación en un suelo Vertisol bajo cuatro condiciones de manejo en la llanura de Coro, estado Falcón, Venezuela. *Bioagro*, 26 (1): 39-48.

WRB. (2006). World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication, in: W. S. R. Report (Ed.), IUSS-ISRIC and FAO (International Union of Soil Sciences-Information Soil Reference and Information Centre and Food and Agriculture Organization). Rome, Italy.

Zonn, C.B. 1974. *Formación del suelo: Suelos tropicales y subtropicales*.

