

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
Agrónomo**

**Título: Efecto del manejo de la caña de azúcar sobre La
Resistencia a la penetración en un vertisol pélico**

Autor: Eduardo Pupo Quevedo

Tutores: Ms C. Juan Alejandro Villazón Gómez

Holguín 2021

RESUMEN

El trabajo se realizó en el año 2015 con el objetivo de determinar el efecto del manejo de los residuos de cosecha y de la fertilización sobre la resistencia a la penetración en un Vertisol Pélico plantado con caña de azúcar. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas con tres tratamientos, cuatro subtratamientos y cuatro repeticiones. Se determinó la resistencia a la penetración en seis capas de 5 cm de espesor hasta los 30 cm de profundidad. Posteriormente, de acuerdo a la cantidad de impactos por profundidad se categorizó el grado de compactación. Se fijaron también las labores de descompactación necesarias. El manejo de los residuos de cosecha tuvo un mayor efecto sobre la resistencia a la penetración que la fertilización. En la *Quema de residuos de cosecha*, la mayor resistencia a la penetración se encontró más cercana a la superficie y con un mayor espesor que en el caso de *Eliminación de residuos de cosecha*. Cuando se conservan los residuos, el incremento de la resistencia a la penetración tiende a estabilizarse por debajo de los 10 cm de profundidad. En *Conservación de residuos de cosecha* fertilizada orgánicamente es posible descompactar el suelo con cultivo tradicional. Pero combinada con las fertilizaciones *orgánico-mineral, mineral y sin fertilizar*, la presencia de los residuos de cosecha no es suficiente para proteger al suelo de la compactación, y son necesarias las mismas labores de descompactación que en *Quema de residuos de cosecha* y en *Eliminación de residuos de cosecha*.

Palabras claves: Compactación, Manejo de residuos de cosecha, Fertilización.

ABSTRACT

The work was carried out in the year 2015 with the objective of determining the effect of the sugarcane management of the straw mulch and of the fertilization on the resistance to penetration in a Vertisol Pélico planted with sugarcane. Was used an experimental design of divided plots with three treatments, four sub-treatments and four repetitions. The resistance to penetration was determined in six layers of 5 cm of thickness to 30 cm of depth. At a later time, according to the quantity of impacts for depth was categorized the degree of compaction. Was established the necessary works of descompaction. The management of the harvesting residues had a bigger effect on the resistance to penetration than fertilization. In *Burning of crop residues*, the bigger resistance to penetration was found more near to the surface and with a bigger thickness than in the case of *Elimination of crop residues*. When keep the harvesting residues, the increment of resistance penetration tends to become stabilized underneath 10 cm in depth. In *Conservation of crop residues* fertilized organically is possible the descompaction of soil with traditional cultivation. But combined with the fertilizations *organic mineral, mineral* and *without fertilizing*, the presence of the crop residues is not enough to preserve the soil from compaction, and the same works of descompaction are necessary than in *Burning of crop residues* and in *Elimination of crop residues*.

Keywords: Compaction, Crop residues management, Fertilization.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
Problema científico:.....	4
Hipótesis:	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
Caña de azúcar.....	5
Historia de la industria azucarera en Cuba	5
Plantaciones de caña de azúcar en Cuba.....	5
Variedades de caña de azúcar en Cuba	6
Cosecha de caña de azúcar en Cuba.....	6
Recolección de caña de azúcar en Cuba.....	7
Importancia de la caña de azúcar en Cuba	7
Campos de caña de azúcar en Cuba.....	7
Suelo Vertisol	8
Historia de los Vertisoles.....	8
Sistemas de Clasificación de los Vertisoles.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32

INTRODUCCIÓN

El laboreo intensivo debido al monocultivo de las áreas agrícolas provoca la degradación acelerada de los suelos (Cairo y Fundora, 2005; Amberger, 2006). Uno de los principales procesos degradativos es la compactación provocada por la actividad agrícola (Cuéllar *et al.*, 2002; Rodríguez *et al.*, 2010). Por lo cual, esta constituye uno de los máximos ejemplos de la pérdida de la fertilidad física (Ponce de León y Balmaseda, 1999). González *et al.* (2009) plantean que la compactación es provocada por la presión sobre el suelo, el peso sobre los sistemas de rodaje, el número de pases, la velocidad de desplazamiento, el patinaje y la realización de labores agrícolas en condiciones inapropiadas de humedad.

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). De esta forma, favorece la formación de capas que dificultan la penetración y proliferación de las raíces (Ponce de León y Balmaseda, 1999; Cuéllar *et al.*, 2002). Otros autores (Defossez y Richards, 2002) agregan que también puede causar considerable daños a la estructura de los suelos con la consiguiente afectación a los rendimientos agrícolas, a la laborabilidad del suelo y al medio ambiente.

Cuéllar *et al.* (2002); Clivate-McIntyre y McCoy (2006) plantean que su evaluación puede realizarse a través de equipos que miden la resistencia a la penetración; estos, como señala Jaramillo (2002), son conocidos como penetrómetros. Según Nacci y Plá (1992), la determinación de esta propiedad es muy sencilla y rápida. Constituye, además, un parámetro muy adecuado para obtener información de la dinámica espacio-temporal del estado físico del suelo.

La restauración de áreas degradadas, y el consiguiente incremento de los rendimientos agrícolas y la preservación de los recursos naturales, constituye el

mayor desafío para la producción de alimentos (Mota *et al.*, 2011). Así, la cobertura continua del suelo con material orgánico constituye uno de los criterios fundamentales a la hora de la intensificación sostenible de las producciones agrícolas (Friedrich, 2014).

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayores rendimientos en biomasa por área y unidad de tiempo (Cuéllar *et al.*, 2003). Según los datos aportados por Técnicaña (2007), en los Valles del Cauca y del Risaralda la caña de azúcar produce alrededor de 41 t ha⁻¹ de biomasa. Otros autores (Cuéllar *et al.*, 2003) plantean que, cuando se cosecha verde, la caña de azúcar aporta al suelo entre 7-10 t ha⁻¹ de biomasa. En países como Colombia (Torres y Villegas, 2000) y Sudáfrica (Meyer *et al.*, 2000) constantemente se realizan experimentos con el fin de monitorear el efecto de la cobertura de residuos de paja sobre la producción de la caña de azúcar y la fertilidad del suelo.

Los Vertisoles presentan una alta fertilidad inherente a sus altos contenido de arcilla (Yáñez *et al.*, 2018). Presentan, sin embargo, importantes limitaciones de orden físico (Marques *et al.*, 2014) y, debido a la inestabilidad de su estructura, se encuentra expuestos a los procesos de degradación por efecto de la lluvia, el tránsito de la maquinaria agrícola, técnicas de riego y drenaje no adecuadas y labranza incorrecta (Cairo *et al.*, 2008). Tienen a la compactación y mal drenaje como sus principales factores limitantes (De la Rosa *et al.*, 2013).

El estudio de la degradación física de los suelos, en condiciones edafoclimáticas específicas, resulta fundamental para el entendimiento de las potencialidades de los sistemas de manejo con respecto a las condiciones físicas de los suelos y para la adopción de prácticas para atenuar las limitaciones provocadas por su utilización (Prado *et al.*, 2002). La causa principal de degradación física de los suelos es la compactación (González *et al.*, 2009), que es el resultado del uso intensivo de maquinaria e implementos agrícolas (Prado *et al.*, 2002; Schjøning *et al.*, 2016; Guimarães *et al.*, 2019). Esta ocurre cuando, en la interface suelo-rueda, la resistencia del suelo a la compactación, a una profundidad dada, es menor que la presión de la maquinaria (Lima *et al.*, 2018).

Es influenciada por diferentes factores, tales como, la presión sobre el suelo, peso sobre los sistemas de rodaje, número de pases, velocidad de desplazamiento, patinaje y realización de labores en condiciones inadecuadas de humedad. La principal causa de compactación del suelo es el tránsito durante el tiempo que el suelo permanece a una humedad cercana a la humedad crítica de compactación (González *et al.*, 2009).

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). Las investigaciones sobre la compactación del suelo en Cuba, han estado dirigidas fundamentalmente al cultivo de la caña de azúcar, a las agrupaciones de suelos Ferralsoles y Vertisoles, y fueron desarrolladas en su mayoría en condiciones de campo (González *et al.*, 2009).

La presencia de capas de suelo compactadas puede significar un serio problema para el adecuado desarrollo de la mayoría de los cultivos (Adamchuk y Molin, 2006) al afectar, por la impedancia mecánica del suelo, su crecimiento radicular (Genro *et al.*, 2004). En el cultivo de la caña de azúcar, el adecuado desarrollo vegetativo de las plantas está influenciado, entre otros factores, por las labores mecanizadas (Bezerra *et al.*, 2019) y está aparejado a los bajos niveles de compactación del suelo (Arcoverde *et al.*, 2019).

De esta manera, la caracterización y localización de capas compactadas en el suelo resulta de gran importancia para la implementación de tecnologías agrotécnicas modernas (Iaia *et al.*, 2006). Uno de los indicadores de la compactación de los suelos es la resistencia a la penetración, que describe la resistencia física que ofrece el suelo a un objeto que intenta atravesarlo, como puede ser la raíz de una planta o un implemento agrícola (Genro *et al.*, 2004; Hosseini *et al.*, 2016). La resistencia a la penetración está influenciada por la densidad aparente y la humedad del suelo (Nasri *et al.*, 015).

Problema científico:

¿Cómo influye el manejo de los residuos de cosecha y de la fertilización sobre la resistencia a la penetración en un Vertisol Pélico plantado con caña de azúcar?

Hipótesis:

El adecuado manejo de los residuos de cosecha y de la fertilización disminuirá la resistencia a la penetración de un Vertisol Pélico plantado con caña de azúcar.

Objetivo general

Evaluar el efecto del manejo de los residuos de cosecha y de la fertilización sobre la resistencia a la penetración en un Vertisol Pélico.

Objetivos específicos

Determinar el impacto de las labores mecanizadas que se le realizan al cultivo de la caña de azúcar sobre un Vertisol Pélico.

Seleccionar una metodología adecuada para la descompactación de los Vertisoles Pélicos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Caña de azúcar

Historia de la industria azucarera en Cuba

Para saber a dónde va un país, primero hay que saber de dónde viene. Así que para conocer lo que hoy es la industria del azúcar en la perla de las Antillas es necesario saber la historia de la industria azucarera en Cuba. Y esta se remonta a finales del siglo XVI que se instala el primer trapiche en la Habana por parte de los colonos españoles.

Para los finales del año 1762, se comienza a comerciar el producto de la caña de azúcar en Cuba. La corona española aprobó su apoyo a esta actividad, y se producían 6 mil toneladas anuales. Para comienzos del siglo XIX la producción ascendió a 94 mil toneladas. Introduciendo a Cuba en la era del azúcar. Desde entonces, este negocio fue fundamental en el aparato comercial cubano.

¿Quién introdujo la caña de azúcar en Cuba? se dice que Cristóbal Colon fue quien trajo la caña de azúcar a América. No obstante, se desconoce por medio de quien tuvo lugar la llegada de la caña de azúcar a Cuba. Solo se conoce que ya a finales del siglo XIV existía en la isla cubana. Al comienzo la tecnología implementada para su producción fue la esclavitud.

La producción de caña de azúcar en Cuba convirtió a la nación en un país mono cultivador y mono exportador. La gestión económica que trajo la producción azucarera trajo consigo la implementación del ferrocarril así como la creación de ingenios. Sin embargo, hoy en día son varias las fuentes por las que se mantiene la economía cubana.

Plantaciones de caña de azúcar en Cuba

Las plantaciones de caña de azúcar en Cuba ocupan gran parte del territorio de cultivo cubano. Desde hace mucho tiempo ha sido uno de los principales cultivos de la isla. Tanto para la producción nacional como para la exportación. El clima

cubano y sus fértiles tierras son un entorno propicio para la siembra de caña de azúcar en Cuba.

Desde hace algunos años las plantaciones de caña de azúcar en Cuba han diezmado. Se piensa que la producción azucarera alcanzó su cénit en la década de los 60, pero que está viendo su ocaso. Las causas son diversas, el mercado azucarero ha aumentado la competencia, y las políticas cubanas han mermado la producción. Además, el país se sostiene principalmente de los ingresos del sector turismo.

Variedades de caña de azúcar en Cuba

Cuba es reconocida a nivel mundial por ser productora de azúcar. Ninguna nación cuenta con tantas variedades del preciado y dulce recurso. En la actualidad hay 107 variedades de caña de azúcar en Cuba. La amplia diversidad de las plantaciones de caña de azúcar en Cuba logra multiplicar la adaptabilidad de las cosechas. Además, multiplica la producción.

Cuba cuenta con más de 560 mil hectáreas dedicadas a los campos de caña de azúcar en Cuba. En tiempos pasados la producción y procesamiento de caña de azúcar en Cuba fue el motor económico del país. Hoy se busca aprovechar la cantidad inmensa de variedades que existen para modernizar las viejas tecnologías de extracción para activar e impulsar de nuevo la exportación.

Cosecha de caña de azúcar en Cuba

La cosecha de caña de azúcar en Cuba comienza a finales del mes de noviembre. Es en este momento que hacen apertura la mayoría de los ingenios y comienzan la recolección gradual de la caña. Para el mes de febrero ya todos los ingenios están abiertos y la cosecha está en su pleno apogeo. Finalmente, en el mes de abril termina oficialmente la cosecha de caña de azúcar en Cuba.

Algunos ingenios continúan sus actividades de cosecha en el mes de mayo. Sobre todo cuando la producción es bastante alta. ¿Cuántos ingenios azucareros hay en Cuba? existen unos 156 ingenios o centrales azucareras. Algunas han sido

cerradas mientras que muchas mantienen sus actividades hasta el momento. La cosecha de la caña de azúcar en Cuba es el momento más ansiado del año.

Recolección de caña de azúcar en Cuba

La recolección de caña de azúcar en Cuba tiene un nombre común y popular: “la zafra”. La temporada de la zafra o cosecha de caña de azúcar en Cuba comienza desde noviembre a mayo. El año pasado se pudieron recolectar unos 1.8 millones de toneladas del dulce producto de la caña. Cuba tiene que luchar cada año con incontables situaciones que perjudican la producción.

Entre estas se encuentran el paso de tornados y la devastación de los campos de caña de azúcar en Cuba. Gran parte de lo que se recolecta de la caña de azúcar en Cuba se destina para la exportación al extranjero. El resto se utiliza para la producción de ron cubano y el consumo de los habitantes del país.

Importancia de la caña de azúcar en Cuba

La caña de azúcar en Cuba tiene un valor bastante apreciable. Por mucho tiempo fue la principal industria en toda Cuba. El motor principal que impulso la economía y el progreso de la nación. La importancia de la caña de azúcar en Cuba va de la mano con las etapas por las que ha pasado la nación. Otrora fue la actividad comercial más importante, hoy sigue siendo importante pero no como antes.

Hoy en día otras actividades comerciales son parte del motor que da impulso a la nación. La principal es el turismo, le acompaña la industria del tabaco y le siguen actividades como la minería de níquel. Luego está la producción masiva de productos farmacéuticos. Esto ha opacado el lugar que tenía en la antigüedad la caña de azúcar en Cuba, no obstante, la producción sigue en pie.

Campos de caña de azúcar en Cuba

Los campos de caña de azúcar en Cuba ocupan una enorme extensión de terreno. No obstante, ha experimentado una drástica reducción de la cantidad de campos destinados al cultivo de la caña de azúcar en Cuba. Aunque alguno de los campos de caña de azúcar se ven comprometidos con plagas mortíferas. Sin embargo, se ha implementado técnicas de erradicación de plagas.

Los trabajadores se hacen presentes en los campos de caña de azúcar cuando comienza la temporada de la zafra. El circuito de caña de azúcar en Cuba dura aproximadamente 7 meses del año, durante este tiempo la actividad es intensa en los campos cubanos. Luego de la temporada de la zafra los campesinos se dedican a otras actividades relacionadas.(Vease [Link](#))

Suelo Vertisol

Historia de los Vertisoles

En los días iniciales de la clasificación de suelos, los Vertisoles se agruparon dentro del Orden "Pedocals", los cuales cubrían el continuo de tierras negras, suelos castaños, grises y desérticos pardos. Esta secuencia de tierras negras representan suelos desarrollados en ambientes subhúmedos secos a áridos bajo vegetación de estepa. Los suelos son normalmente profundos, con alto contenido de bases y con horizontes superficiales de color oscuro. Sin embargo, algunos muestran acumulación de cal libre, a una profundidad la cual varía de acuerdo con la lluvia (ISSS–ISRIC–FAO, 1994).

Desde principios de 1898, los suelos negros cubren una parte sustancial de la India Peninsular atrayendo la atención de científicos, debido a sus características únicas e importancia para el uso agrícola. Más tarde, los suelos negros también se estudiaron en otras partes del mundo, como Sudán y Estados Unidos, específicamente en Texas (ISSS–ISRIC–FAO, 1994).

La variedad de nombres demuestra la amplia ocurrencia de estos suelos en el mundo y sus propiedades peculiares comunes que los hacen únicos. Previo a la adopción formal del término Vertisol, diferentes nombres se utilizaron alrededor del mundo para designar estos suelos de expansión–contracción, los cuales son importantes para la agricultura por su fertilidad natural alta y porque soportan una gran diversidad de cultivos, incluyendo hortalizas, granos y pastizales. Por consiguiente, los Vertisoles se llamaron de diferente forma según: color, uso, manejo y tipo de arcilla (Boul *et al.*, 1973; ISSS–ISRIC–FAO, 1994). Los primeros nombres que se le dan a estos suelos se mencionan a continuación.

Tschernosems. Glinka (1914) menciona que en los primeros tiempos estos suelos se clasificaron como Tschernosems por los edafólogos rusos quienes reportaron que su formación tenía lugar donde había gran humedad y temperatura óptima para provocar el intemperismo mineral y la formación de humus. Éstos se forman en climas semiáridos asociados a veranos calientes e inviernos fríos; se encuentran en forma frecuente en terrenos ligeramente ondulados o llanuras. La vegetación nativa era pastos de las estepas rusas (Glinka, 1914; De Sigmond, 1935).

Pedocals. Los Vertisoles se llamaron así en el primer sistema de clasificación de suelos de los Estados Unidos, el cual fue propuesto por Marbut en 1928 (De Sigmond, 1935). Este sistema tuvo gran influencia del trabajo ruso traducido por Glinka en 1914, el cual enfatiza el concepto de tipo de suelo. Presumiblemente, los Vertisoles estuvieron clasificados como Pedocals de zonas tropicales, en las categorías altas, y como suelos con perfiles de poco desarrollo, en categorías bajas, en el sistema de clasificación propuesto por Marbut. En este tiempo, la pedología era una ciencia joven y poco fue conocido acerca del fenómeno de expansión contracción de estos suelos (Coulombe *et al.*, 1996; 2000).

Rendzinas. El sistema de clasificación de suelos de los Estados Unidos fue propuesto por Baldwin *et al.* (1938) quienes enfatizan el concepto de zonalidad; ejemplo: zonal, intrazonal y azonales. Los Vertisoles estuvieron clasificados en el Orden de Intrazonales, Suborden de Calcimórficos y en el gran grupo de Rendzinas. Las Rendzinas se definieron como suelos oscuros derivados de materiales parentales de basaltos, calizas que presentan perfiles de 38 a 150 cm de profundidad (Oakes y Thorp, 1950; Coulombe *et al.*, 1996).

Los principales cambios para estos suelos fueron propuestos por Oakes y Thorp en 1950, concerniente a un nombre y una definición tentativa de estos suelos arcillosos de expansión–contracción. El término Rendzina se aplicó después a los suelos arcillosos profundos, como las tierras negras de Texas en Estados Unidos y Tamaulipas en México. Son arcillas oscuras profundas con temperaturas calientes (Oakes y Thorp, 1950).

Terrasols. Fue propuesto por Tavernier en 1954 de raíz griega, cuyo significado es "batir o revolver"; sin embargo, tuvo poca aceptación entre los científicos de la ciencia del suelo de la época (Oakes y Thorp, 1950; Boul *et al.*, 1973).

Grumosoles. Nombre más completo para clasificar a los suelos arcillosos, el cual fue propuesto por Oakes y Thorp en 1950. El término Grumosol se utiliza para suelos arcillosos negros u oscuros, los cuales se desarrollan bajo una gran variedad de condiciones climáticas, pero usualmente con alternativa de estaciones húmedas y secas. Su característica principal proviene de que se desarrollan de material parental que produce un alto contenido de arcillas 2:1 (montmorillonita) en un área climática definida. En la estación seca, los suelos se contraen y aparecen grietas profundas, los cuales son arcillosos y tienen la estructura migajosa de la capa superficial. Este grupo es tipificado por arcillas negras y tienen todo o más de las siguientes características en combinación: 1) textura arcillosa; 2) no tienen horizonte eluvial e iluvial; 3) estructura granular moderada en la superficie de 15 a 50 cm, masiva en las capas inferiores del perfil; 4) reacción alcalina, con integrados neutros de otros grupos; 5) alto coeficiente de expansión en húmedo y contracción en seco; 6) microrrelieve gilgai; 7) consistencia extremadamente plástica; 8) complejo de intercambio saturado con calcio o calcio y magnesio; 9) minerales de arcilla en forma dominante del grupo de la montmorillonita; 10) materiales parentales principalmente calcáreos, altos en arcilla; 11) profundidad > 25, típicamente más de 76 cm; 12) color oscuro de croma bajo; 13) contenido de materia orgánica de medio a bajo, usualmente de 1 a 3% en la superficie del suelo, decrece en forma gradual con la profundidad; 14) el intemperismo no existe o es relativamente nulo; y 15) vegetación de arbustos y sabana. Esta caracterización fue tentativa, a la cual, posteriormente, se le hicieron modificaciones; además, se adicionó información detallada de los procesos pedogenéticos y la mineralogía de estos suelos (Oakes y Thorp, 1950; Buol *et al.*, 1973; Coulombe *et al.*, 1996).

Vertisoles. En 1956, Lehman de la Universidad de Gante, Bélgica, de la Sección de Idiomas Clásicos, propuso el nombre "Vertisol". Este nombre se propuso a la comunidad científica durante el 6º Congreso de la Sociedad Internacional de la

Ciencia del Suelo, celebrado en Estados Unidos, donde se aceptó el término "Vertisol"; éste se propuso para calificar a estos suelos que tienen características de expansión–contracción. El término proviene del latín *vertex*, el cual significa auto mezclarse y *sol*/suelo. Finalmente, éste se aceptó después de una amplia discusión para nombrar a los suelos arcillosos, los cuales ocupan una gran superficie sobre los continentes, porque tienen una alta fertilidad natural y porque son excelentes para la producción de granos, fibras y hortalizas. El nombre Vertisol fue seleccionado por el grupo de trabajo de Científicos de la Ciencia del Suelo reunidos en el 6º Congreso Internacional, sobre el nombre de "Terrasol" que también se propuso (Dudal y Eswaran, 1988).

El término Vertisol se adoptó después en la Séptima aproximación de la Taxonomía de suelos de 1960 como un Orden, para organizar los suelos arcillosos de expansión contracción. Esta clasificación fue la primera que organiza a los Vertisoles como un Orden de suelos con propiedades únicas (Soil Survey Staff, 1960; Coulombe *et al.*, 1996).

Sistemas de Clasificación de los Vertisoles

Posteriormente, los Vertisoles aparecieron en la Taxonomía de suelos de 1960 y 1975, los cuales eran clasificados como un Orden (Soil Survey Staff, 1960; 1975). Los principales sistemas de clasificación de suelos que se utilizan en el mundo son la Taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 2006) y el Sistema de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) o la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) (IUSS Working Group WRB, 2006).

Taxonomía de Suelos. La Taxonomía se considera un sistema de clasificación morfogenético que consiste en claves para clasificar a los suelos del mundo, la cual es publicada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y comienza en 1960. Ésta consta de seis categorías de mayor a menor que son: Orden, Suborden, Gran grupo, Subgrupo, Familia y Serie (Soil Survey Staff, 1999; 2006).

Taxonomía de Suelos de 1960 o Séptima aproximación. Los Vertisoles de este sistema sólo tenían dos Subórdenes que eran: Aquerts y Usters (Soil Survey Staff, 1960). La Séptima aproximación se publicó en 1960, en la cual la clasificación de los Vertisoles se basó en los conceptos de gilgai (cuando no estaba laborado), slickensides (superficies de deslizamiento) y grietas durante la estación seca. El concepto de gilgai es un término de los aborígenes australianos que expresaba el microrrelieve de los suelos, como micro-lomas y micro-depresiones.

Taxonomía de Suelos de 1975. Ésta realizó más cambios a la Séptima aproximación de 1960 y presentó los siguientes criterios para la definición de los Vertisoles: 1) no tienen contacto lítico o paralítico, horizonte petrocálcico o un duripán dentro de los 50 cm de profundidad; 2) tienen 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta los 50 cm de profundidad o más después de haber mezclado el suelo hasta 18 cm; 3) tienen en algún momento en la mayoría de los años grietas abiertas de 1 cm de ancho y se extienden desde la superficie hasta la matriz del suelo; y 4) tienen una o más de las siguientes propiedades: gilgai, caras de fricción entre 25 a 100 cm y agregados en forma de cuña entre los 25 cm y 100 cm con sus ejes longitudinales inclinados entre 10 y 60° de la horizontal. Los Subórdenes se basaban en los períodos en que las grietas estaban abiertas; aparecieron tres más y desapareció uno de la versión anterior: Xererts, Torrerts, Uderts y Usterts (Soil Survey Staff, 1975).

Taxonomía de Suelos de 1983. Con el propósito de mejorar la Taxonomía de suelos en 1981, por iniciativa del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos se creó el Comité Internacional de Clasificación de Vertisoles (ICOMERT), bajo la dirección de Juan Comerma, de la Universidad del Centro de Venezuela (Comerma, 1985), para el desarrollo de la clasificación de los Vertisoles, con los siguientes objetivos: 1) identificar los criterios ambiguos que ocasionaban definiciones imprecisas, agrupaciones equivocadas o identificación incompleta de suelos; 2) incorporar cambios en los Vertisoles, para su adecuación a zonas diferentes de las tropicales y subtropicales; 3) introducir criterios genéticos y prácticas para mejorar la clasificación; y 4) obtener las recomendaciones y los alcances de las mejoras,

para obtener una mejor clasificación de los Vertisoles. Los Subórdenes eran: Xererts, Torrerts, Uderts y Usterts (Soil Survey Staff, 1983).

Taxonomía de Suelos de 1985. De 1983 a 1985 se estudiaron Vertisoles de zonas áridas y semiáridas, donde los principales problemas identificados fueron: i) la pobre relación que existe entre el drenaje y la Taxonomía; ii) la necesidad de incluir familias de acidez y de reacción calcárea; iii) definir de forma diferente el régimen ácuico para estos suelos, con base en anegamiento, y, posteriormente, de un Suborden Aquert; y iv) conveniencia de considerar altos niveles de sodio, diferentes tipos de estructura y consistencia de los horizontes superficiales, de separar Vertisoles con y sin gilgai, con y sin horizontes argílicos y los delgados de los profundos (Comerma, 1985; Soil Survey Staff, 1985). Los principales argumentos y conclusiones en la búsqueda de una nueva definición y claves para los Vertisoles, por el grupo del ICOMER, fueron:

1. *Orden.* Se determinó eliminar la opción del gilgai en cuanto a ocurrencia de caras de fricción, dejar el mismo requerimiento de profundidad, así como el espesor mínimo de 50 cm; y, por último, agregar una clasificación sobre la abundancia e inclinación de caras de fricción y/o paralelepípedos;

2. *Suborden* Se introdujo el nuevo Suborden Aquert, considerando una modificación en la definición del régimen ácuico. En cuanto a la sección control, se sugirió saturación en la mayor parte de los primeros 50 cm por períodos de alrededor de 2–3 meses continuos o más. Se presentó la propuesta de un Suborden para climas monzónicos, los Monerts, basado en apertura y cierre de grietas una vez al año. Aunque abierto a discusión, hubo varias objeciones en cuanto a la exclusividad de la definición para climas con lluvias monzónicas;

3. *Grandes Grupos,* el principal cambio adoptado, aunque aún con cuestionamientos, fue el de la separación entre Vertisoles ácidos y no ácidos (Dítrico y Eútrico) en Aquerts, Usterts y Uderts. El uso de pH en vez de saturación con Al o de bases no está sustentado con suficientes datos, así como tampoco la exclusión de pH < 5 en Vertisoles ácidos cuando las sales son superiores a 4 dS m⁻¹. Los cambios en los Grandes Grupos fueron los siguientes:

a) el Gran Grupo Planaquert se suplantó, por objeciones en el nombre, por Epiaquert, pero este último requeriría modificaciones en la definición del régimen ácuico y en el uso de Epiaquic a nivel de Subgrupo; b) el Gran Grupo Orthustert se desechó al acordar no considerar el microrrelieve gilgai como requisito de muchos Vertisoles; c) el Gran Grupo de los Torrerts, luego de amplias discusiones sobre la conveniencia o no de incluir los niveles de Na (Soditorrerts) en esta categoría y después de estudiar varios casos en campo, se decidió dejar sólo los Salitorrerts, con un horizonte sálico y saturación temporal de agua en la parte superior del suelo, y los Haplo; los sódicos pasarían a Subgrupo por no existir evidencias claras sobre sus efectos en estos suelos; y d) los Aquerts como los Xererts se incluyó un Grupo con duripán que fueron: Duriaquerts y Durixererts;

4. *Subgrupos*, se decidió incluir en la propuesta varios nuevos nombres y/o cambios en la definición de otros. Entre los nuevos nombres están: Cromic, para separar los de colores claros, dejando los oscuros dentro del Typic; Leptic, para incluir aquéllos con marcas de Vertisoles dentro de 50 cm, pero no a 1 m o más; Sodic, con 15 de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) ó 13 de relación de absorción de sodio (RAS) dentro de 1 m; los Mazic y Grumic aún están en discusión. Los nombres usados con redefinición son: Aridic, Ustic, Udic y Xeric, definidos con base en el tiempo que las grietas permanecen abiertas y cuya longitud se estableció en función de variadas interpretaciones agronómicas; y

5. *Familias*, la división ya establecida entre las texturas fina y muy fina según clases mineralógicas, se decidió separar la calcárea y la no calcárea, la cual indudablemente no se aplicaría a los Grandes Grupos Dístricos.

Estas propuestas y claves se sometieron a discusión de todos los miembros de ICOMERT y de otras personas que desearan opinar con datos al respecto. Los Subórdenes eran: Xererts, Torrerts, Uderts y Usterts (Comerma, 1985; Soil Survey Staff, 1985).

Taxonomía de Suelos de 1992. Las versiones de 1987 y 1990 no presentaron ningún cambio con respecto a los criterios de identificación de Vertisoles. La versión de 1992 sufrió cambios importantes en cuanto a los criterios, los cuales

fueron propuestos por el ICOMERT, el cual seguía trabajando con la finalidad de proponer adecuaciones y hacer más precisos los criterios de definición de los Vertisoles que se presentan en todo el mundo. Es aquí donde los criterios de clasificación de estos suelos se hacen más precisos. Los Subórdenes eran: Xererts, Torrerts, Uderts y Usterts (Soil Survey Staff, 1992; Ortiz y Gutiérrez, 1995).

Taxonomía de Suelos de 1994 y 1996. Las versiones del Soil Survey Staff (1994; 1996) reflejan un conocimiento mayor de los Vertisoles. En éstas, se le dio mucha importancia a su formación. Se confirmó que las superficies de deslizamiento son la mayor expresión del desarrollo de la estructura pedal vértica. Se comprendió el mecanismo que desarrolla progresivamente esta estructura.

Los nuevos criterios introducidos fueron: 1) otros horizontes de diagnóstico podrían estar debajo de la zona de slickensides que fueron: cálcico, gypsico y sálico; 2) si se acidifican ligeramente los horizontes de la superficie, se comienza a mover la arcilla y puede formarse un horizonte argílico delgado; y 3) estos horizontes fueron designados por los científicos de la Ciencia del suelo como: A1, Bw1, Bw2, Bss1, Bss2 y C1k; donde, se reconoce el hecho que los slickensides y los paralelepípedos son rasgos pedales. Esta versión tiene los Subórdenes: Xererts, Torrerts, Uderts y Usterts (Soil Survey Staff, 1994; 1996).

Taxonomía de Suelos de 1999. La versión de 1998 no presenta cambios, y reconoce que el fenómeno de expansión–contracción del suelo es el responsable de la génesis y comportamiento de los Vertisoles; sin embargo, éste es tan complejo y dinámico, que no ha sido completamente entendido. La presencia de slickensides es la que diferencia a los Vertisoles de otros suelos. Su alto contenido de arcilla, las grietas que se abren y cierran, los agregados en forma de cuña y la formación de slickensides, son los marcadores morfogenéticos que, cuando están juntos, indican las propiedades de diagnóstico. Además, la extensibilidad lineal (LE) es otro parámetro que se toma en cuenta; el suelo probablemente corresponde a un integrado vértico de otros Órdenes (Soil Survey Staff, 1999).

A partir de esta versión se incrementan dos Subórdenes Aquerts y Cryerts; los que tenían eran: 1) Aquerts, ocurren en las llanuras costeras en asociación con Inceptisoles e Histosoles, los cuales se presentan en áreas donde el manto freático es bajo durante prolongados períodos durante el año y el suelo no estaría lo bastante seco para formar grietas. Sin embargo, se reconocen remanentes de grietas rellenas en el perfil; 2) Cryerts, ocurren en las latitudes del norte. Algunos de estos Vertisoles fríos se clasificaron previamente como Usterts, ligándolos a familias cryicas. Algunas de estos suelos muestran también los rasgos de los procesos de cryoturbación en la superficie del suelo; 3) Xererts son Vertisoles con un régimen de la humedad del suelo Xérico. Se extienden en California y en Turquía. Típicamente, las grietas están abiertas en meses del verano y cerradas durante los meses del invierno lluviosos. Estos suelos exhiben algunas de las grietas más anchas y más profundas, y slickensides pronunciados debido al amplio contraste en las condiciones de humedad del suelo entre las estaciones. Muchos de los suelos tienen horizontes gypsicos y cálcicos, y, en California, muchos suelos presentan un duripán; 4) Torrerts, generalmente ocurren en las franjas de los desiertos. El régimen de humedad en tales áreas es predominantemente arídico. Los horizontes cálcico, sálico y gypsicos son comunes en tales suelos. Las grietas que se abren después de un temporal, se rellenan en general con arena arrastrada por el viento; 5) Usterts, ocupan el área más grande. Estos se extienden en los trópicos y regiones semi-áridas y se hallan en áreas de la India, Sudán y Etiopía. Su contraparte moderada corresponde a otras zonas templadas de Estados Unidos, México, Australia, Uruguay y Argentina. Muchos de estos suelos tienen un horizonte cálcico y algunos tienen un horizonte gypsicos; y 6) Uderts, están principalmente en los trópicos, donde en general se usan para el cultivo de arroz. Tales suelos se presentan en las Llanuras de Bangkok, región del Muda del Oeste de Malasia, en las llanuras costeras de Sumatra Oriental y, en Argentina, están presentes en la Provincia de Río (Soil Survey Staff, 1999; Coulombe *et al.*, 2000).

Taxonomía de Suelos de 2003. Esta publicación del Soil Survey Staff (2003) se adhirió al Suborden de los Aquerts, el Gran Grupo de los Sulfaquerts (antes

Salaquerts), y sus respectivos Subgrupos Salic, Sulfic y Typic. Los Subórdenes que se tenían en esta versión fueron: Aquerts, Cryerts, Xererts, Torrerts, Usterts y Uderts.

Taxonomía de Suelos de 2006. Es la publicación más actualizada del Soil Survey Staff (2006) y, por lo tanto, la más completa; en esta última versión no se realizaron cambios a nivel de Gran Grupo y Subgrupo. Los Subórdenes que se tienen en ésta son: Aquerts, Cryerts, Xererts, Torrerts, Usterts y Uderts.

Sistema FAO

El sistema de clasificación de los Suelos de la FAO o WRB consta de dos categorías que son la Unidad y Subunidad. Este sistema de clasificación se inicia en 1970 con la publicación de la Leyenda del Mapa de suelos del Mundo (FAO–UNESCO, 1974). La WRB tiene los objetivos siguientes: 1) desarrollar un sistema internacional aceptable para delinear el recurso suelo, el cual pueda vincularse y relacionarse con las clasificaciones nacionales, usando la Leyenda Revisada de FAO como estructura básica; 2) proporcionar una base científica sólida a esta estructura para que también pueda servir en diferentes aplicaciones, en áreas con agricultura, geología, hidrología y ecología; 3) reconocer dentro de la estructura, importantes relaciones espaciales de suelos y horizontes del suelo como se caracterizan por topo y cronosecuencia; y 4) enfatizar la caracterización morfológica de suelos más que seguir una aproximación analítica, basada puramente en el laboratorio (ISSISRIC–FAO, 1994; FAO–ISRIC y SICS, 1999; IUSS Working Group WRB, 2006).

La WRB está diseñada como un medio de comunicación sencillo entre científicos para identificar, caracterizar y nombrar tipos principales de suelos; además, sirve como un campo común entre personas con un interés en los recursos naturales y de la tierra; finalmente, es una herramienta para identificar estructuras pedológicas y su significado (FAO–ISRIC y SICS, 1999; IUSS Working Group WRB, 2006).

Leyenda FAO–UNESCO de 1974 clasificó los Vertisoles como suelos que después de haber mezclado los 20 cm superiores tienen 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad no menor de 50 cm; desarrollan grietas

de la superficie hacia abajo, las cuales, en algún período, tienen cuando menos 1 cm de ancho y una profundidad de 50 cm; presenta una o más de las siguientes características: microrrelieve, caras de fricción y agregados en forma de cuña (FAO–UNESCO, 1974). Los Vertisoles del Sistema FAO/UNESCO, el cual fue la primera aproximación, contaban solamente con dos Subunidades que eran: 1) Pélicos, con una intensidad de color en húmedo menor de 1.5 dominante en la matriz del suelo en los primeros 30 cm; y 2) Crómicos, otros tipos de Vertisoles (FAO–UNESCO, 1974).

Leyenda Revisada de la FAO de 1988. Los Vertisoles de esta versión tienen las siguientes subunidades: Eútrico, Dístrico, Cálcico y Gypsico (FAO–UNESCO–ISRIC, 1988).

La WRB de 1994. Los Vertisoles tienen un horizonte vértico que empieza entre 25 y 75 cm de la superficie. Las Subunidades que se tienen son: Tiónico, Sáfico, Sódico, Gypsico, Cálcico, Dístrico, Crómico y Háplico (ISSS–ISRIC–FAO, 1994).

La WRB de 1999. Los Vertisoles presentan las siguientes características: 1) tienen un horizonte vértico dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo; 2) luego que los 20 cm superiores han sido mezclados, 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 100 cm o más o hasta una capa contrastante (contacto lítico o paralítico, horizonte petrocálcico, petrodúrico o petrogypsico, discontinuidad litológica, etc.) entre 50 y 100 cm; y 3) grietas que se abren y se cierran periódicamente (FAO–ISRIC y SICS, 1999).

Los Vertisoles en esta versión presentaban las siguientes Subunidades: Tiónico, Sáfico, Nítrico, Gypsico, Dúrico, Cálcico, Álico Gypsírico, Pélico, Grúmico, Mázico, Crómico, Mezotrófico, Hiposódico, Eútrico y Háplico (FAO–ISRIC y SICS, 1999).

La IUSS Working Group WRB de 2006 tiene los mismos tres parámetros para la definición de los Vertisoles que la versión de 1999. Las Subunidades que presenta esta versión son: Grúmico, Mázico, Hipocálcico, Eútrico, Tiónico, Sáfico, Gléico, Sódico, Estángico, Mólico, Gypsico, Dúrico, Cálcico y Háplico (IUSS Working Group WRB, 2006).

Propiedades químicas y manejo

La fertilidad química de los Vertisoles ha sido estudiada en cambios de uso del suelo y en diversos manejos agronómicos; aunque la mayor parte de estas investigaciones han sido realizadas comparando diferentes sistemas de labranza y sólo contemplando algunas propiedades como materia orgánica (MO) y pH.

Con el cambio de uso de suelo, por ejemplo, de una selva a un cultivo de caña de azúcar o para realizar prácticas de agostadero se ha reportado una disminución drástica en el contenido de MO y pérdida de la estructura (Rosales y Figueroa, 19857). Medinilla et al. (2014) encontraron una reducción en el contenido de MO de 3% y degradación de agregados de origen biológico en tan solo un año. Estos cambios son atribuidos a la naturaleza, volumen y grado de humificación de la materia orgánica (Oleschko et al., 1996).

García-Silva et al. (2006) mencionan que los decrementos en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) se deben al escaso desarrollo de la estructura de los Vertisoles, en donde el C al ser liberado de los agregados queda fácilmente disponible para los microorganismos del suelo. Estudios posteriores en este mismo sitio, indican que el contenido de ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF), así como su relación (AH/AF) disminuye en Vertisoles con labranza convencional en comparación con los sometidos a manejo agronómico donde se gestionan los residuos de cosechas o se emplea la siembra directa. El proceso responsable es la lixiviación y afecta no sólo al C sino también a elementos móviles como el nitrógeno (García-Silva et al., 2005; 2006). En el caso del pH, P, K y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se ha mencionado que no sufren modificaciones a través de los años con los sistemas de labranza (Ribón et al., 2003).

Las prácticas agronómicas recomendadas para restablecer la fertilidad química en la mayoría de los suelos agrícolas con problemas de compactación como los Vertisoles son el subsoleo e incorporación de diferentes fuentes de MO (Coulombe et al., 2000). El subsoleo es utilizado para evitar la acumulación de MO sólo en la superficie y optimizar la fertilización con N en el caso de un pastizal y el cultivo de caña (Sánchez-Vera et al., 2003). Otros autores recomiendan la mínima

alteración del suelo (agricultura de conservación), para que la biomasa microbiana y nutrimentos como el N inorgánico y P extractable se puedan concentrar en la superficie del suelo (0-10 cm), y de esa manera promover mejores condiciones para la captura de carbono (Salinas-García et al., 2001, 2002).

Varias investigaciones han demostrado que, con la reducción de la labranza, la actividad biológica mejora la estructura del suelo y se presenta mayor tasa de recambio de nutrimentos, lo que hace al sistema más dinámico, sobre todo después de 10 años con este manejo (Fregoso Tirado et al., 2008). Asimismo, los procesos de salinización son detenidos o aminorados y la saturación del suelo se reduce (Covarrubias, 19855). Ramírez-Barrientos et al. (2006) indican que aquellas características que presentan detrimento en labranza cero, como la porosidad y la retención de humedad, no afectan demasiado el desarrollo de los cultivos y los rendimientos son cercanos a los obtenidos con labranza convencional. De la misma manera, se indica que con la adición de estiércol bovino, practicando labranza mínima o cero (Castellanos, 19854) o con la incorporación de residuos vegetales, se incrementan los contenidos de Nt, MO, P, Ca, Mg y CIC (Rosales y Figueroa, 19857; Lee-Rodríguez y Núñez 19853; Oleschko et al., 1996; Sánchez-Hernández et al., 2003, 2006; Ramírez-Barrientos et al., 2006).

En algunas ocasiones no hay cambios en las variables químicas por la incorporación de MO, debido a la nula descomposición del rastrojo de cosecha que no permite cambios en las variables Nt, P-Olsen y pH (Sánchez-Hernández et al., 2003). En ese sentido, es importante la incorporación de los residuos de cosecha, irrigación o modificación en el régimen de humedad del suelo e investigación en la actividad biológica para determinar la tasa de captura de C (Gutiérrez Castorena et al., 2015).

Fertilización y manejo

Gran parte de la investigación acerca de la fertilización en Vertisoles se ha realizado en cultivos de caña de azúcar, gracias a los esfuerzos de un grupo de investigación multidisciplinario en el Campus Tabasco, del Colegio de

Postgraduados. Salgado-García et al. (2000) propusieron una dosis óptima de fertilización para la caña de azúcar de 160-80-80 kg ha⁻¹ (N-P-K) que se aplica en bandas y después recomiendan enterrar el fertilizante para incrementar los rendimientos. Si se realiza esta última práctica, la eficiencia de recuperación del N es de 20%, superior a la obtenida mediante la aplicación superficial; además, es necesario que la fertilización se realice a los tres meses después de la siembra (Salgado-García et al., 2001). Esta tendencia también fue observada en sorgo en donde se recomienda fraccionar las dosis de fertilizante para aumentar la eficiencia del N (Espinosa et al., 2002). En otros trabajos, Salgado-García et al. (2003) demostraron que al agregar 160-35-67 kg ha⁻¹ (N-P-K), aplicado como una mezcla de sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄, superfosfato triple (10Ca (H₂PO₄)₂-H₂O-2HF) y KCl, enterrado tres meses después del rebrote, se producen los mayores incrementos en el rendimiento de la caña de azúcar en comparación con el testigo en los Vertisoles.

Palma-López et al. (2002) propusieron un sistema integrado de fertilización (N, P, y K) para el ingenio azucarero Azucarmex, Tabasco. Utilizaron un modelo conceptual fundamentado en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo, el suministro que hace de éste el suelo y la eficiencia del fertilizante. Las dosis de fertilización obtenidas debieron ser ajustadas para generar una recomendación viable para la caña de azúcar en cada clase de suelo (Fluvisol, Vertisol, Cambisol, Luvisol y Leptosol), donde los Vertisoles son la unidad de suelo que ocupa mayor área (36.9% del total del ingenio). En este caso particular la dosis recomendada fue de 34, 0, 105 kg ha⁻¹ NPK, debido a que los Vertisoles tienen la capacidad para restablecer sus propiedades químicas; sin embargo, las propiedades físicas pueden ser modificadas impidiendo el enraizamiento de la caña de azúcar, pero este fenómeno puede ser revertido con el subsoleo. Los autores indican que las dosis recomendadas por el modelo pueden lograr sus máximos rendimientos si el resto de las labores de cultivo (resiembra, drenaje y variedades empleadas) se realizan en tiempo.

La fertilización con N y la implementación de sistemas de cero labranza con rotación de cultivos tienen el potencial de incrementar el secuestro de SOC y

mantener altos rendimientos de cultivos como sorgo, trigo, maíz y caña de azúcar en los Vertisoles irrigados del centro de México. También las cantidades de C incrementan sus concentraciones dependiendo de la cantidad de N agregado; este efecto se ve magnificado cuando se emplea la labranza de conservación y rotación de cultivos (Follett et al., 2005). La fertilización con P en Vertisoles está relacionada con la humedad del suelo, al aumentar la tensión entre la matriz del suelo y las moléculas de agua. Ocurre después un déficit de P, y las plantas sufren estrés afectando algunos parámetros como altura, diámetro y peso de hojas (Rivera-Hernández et al., 2009; 2010).

Existen, aunque en menor cantidad, algunos esfuerzos por investigar la dinámica de otros nutrientes en la fertilización de Vertisoles. El K⁺ ha sido quizá uno de los nutrientes más estudiados en estos suelos, debido a su alta capacidad amortiguadora que limita su disponibilidad (Bolio-López et al., 2008). Este elemento abunda de manera natural en algunos suelos principalmente cuando se forman a partir de rocas ígneas; sin embargo, es necesario agregar fertilizantes potásicos para aumentar los rendimientos de cosecha tanto en manejo convencional (Zuñiga-Estrada et al., 2010) como el fertirriego (Vidal-Martínez et al., 2006) sobre todo en suelos derivados de otro tipo de materiales parentales (rocas sedimentarias o metamórficas). Lozano García et al. (2011) recomiendan utilizar labranza mínima como una forma de liberar más K⁺ a la solución del suelo en la capa arable.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en un experimento plantado con caña de azúcar sobre un Vertisol Pélico (Hernández *et al.*, 2015), ubicado en áreas del Bloque Experimental de Cristino Naranjo, perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Holguín. La cosecha se realizó a la cepa caña planta, de la variedad C8612, con una combinada cañera KTP-2 con subremolque. Los muestreos se realizaron, después del manejo de los residuos de cosecha correspondiente en cada caso.

Fue utilizado un diseño experimental de parcela dividida. Los tratamientos y subtratamientos, fertilizados con una misma dosis de fondo (50 kg ha^{-1} de P_2O_5 y 120 kg ha^{-1} de K_2O), son:

Tabla 1.- Conformación de los tratamientos y subtratamientos.

Subtratamientos	Tratamientos		
	A (Quema de residuos de cosecha)	B (Eliminación de residuos de cosecha)	C (Conservación de residuos de cosecha)
I	Fertilización orgánica ($30 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cachaza)		
II	Fertilización orgánico-mineral ($18 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cachaza + $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrógeno)		
III	Fertilización mineral ($100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrógeno)		
IV	Sin fertilizar (Dosis de fondo)		

Se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (Stolf, 1983), con la masa impactadora regulada a 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 *et al.* (1991):

Donde:

N es la cantidad de impactos por dm.

Estos resultados fueron expresados en intervalos constantes de profundidad (5 cm), para lo cual se utilizó en una de hoja de cálculo de Microsoft Excel 2010, la metodología propuesta por Stolf *et al.* (2014).

Para la clasificación del grado de compactación se tuvieron en cuenta la cantidad de impactos por profundidad y se utilizaron las categorías: Friable (F), Poco Compactado (PC), Medianamente Compactado (MC), Compactado (C) y Altamente Compactado (AC). Posteriormente, el suelo se clasificó como seco, y de acuerdo a la cantidad de impactos en las profundidades de 0-20 y de 20-30 cm se seleccionó una tecnología de cultivo, según la metodología propuesta por García *et al.* (2013), que tiene en cuenta el error, el número de impactos en el límite de resistencia crítica de 3 000 kPa y los impactos críticos no corregidos por tipo de suelo y categorías de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra que la influencia del manejo de los residuos de cosecha sobre la resistencia a la penetración es más acentuada que el efecto de la fertilización, y que en todas las variantes estudiadas, la resistencia a la penetración tiende a incrementarse a medida que se profundiza en el suelo. En el caso de la *Quema de residuos de cosecha* (QRC), se encontró que el aumento de la compactación se produce cercano a la superficie, pues la capa con mayor compactación apareció entre los 10-20 cm de profundidad.

En lo que respecta a la *Eliminación de residuos de cosecha* (ERC), los subtratamientos también tuvieron una tendencia al incremento de la resistencia a la penetración hacia el interior del perfil del suelo. Sin embargo, este aumento se manifestó a mayor profundidad que en la *Quema de residuos de cosecha*, al aparecer la mayor compactación en la capa de 15-20 cm. De la misma forma, los subtratamientos tuvieron un comportamiento más homogéneo que en la QRC.

En la *Conservación de los residuos de cosecha* (CRC) la tendencia de la resistencia a la penetración a aumentar con la profundidad fue menos marcada que en los dos tratamientos anteriores; sobre todo, donde se combinó este tipo de manejo de los residuos con la *Fertilización orgánica*.

Ortiz *et al.* (2012) plantean que, al cosechar la caña de azúcar verde, los residuos que se dejan en el campo se incorporan como materia orgánica al suelo; los mismos disminuyen los efectos de la erosión y mejoran la textura del suelo. Además, contribuyen a incrementar la retención de humedad en el suelo, con el consiguiente incremento de los rendimientos agrícolas, sobre todo en regiones donde el promedio de precipitaciones anuales es bajo.

También Gutiérrez *et al.* (2014), al estudiar la compactación mecánica en Vertisoles, encontraron que existe una relación entre el incremento de la materia orgánica y la disminución de la compactación. Esta relación inversamente proporcional está dada por el efecto que provoca sobre el suelo el uso de acondicionadores físicos que permiten mantener y mejorar las condiciones adecuadas para el desarrollo radicular de los cultivos.

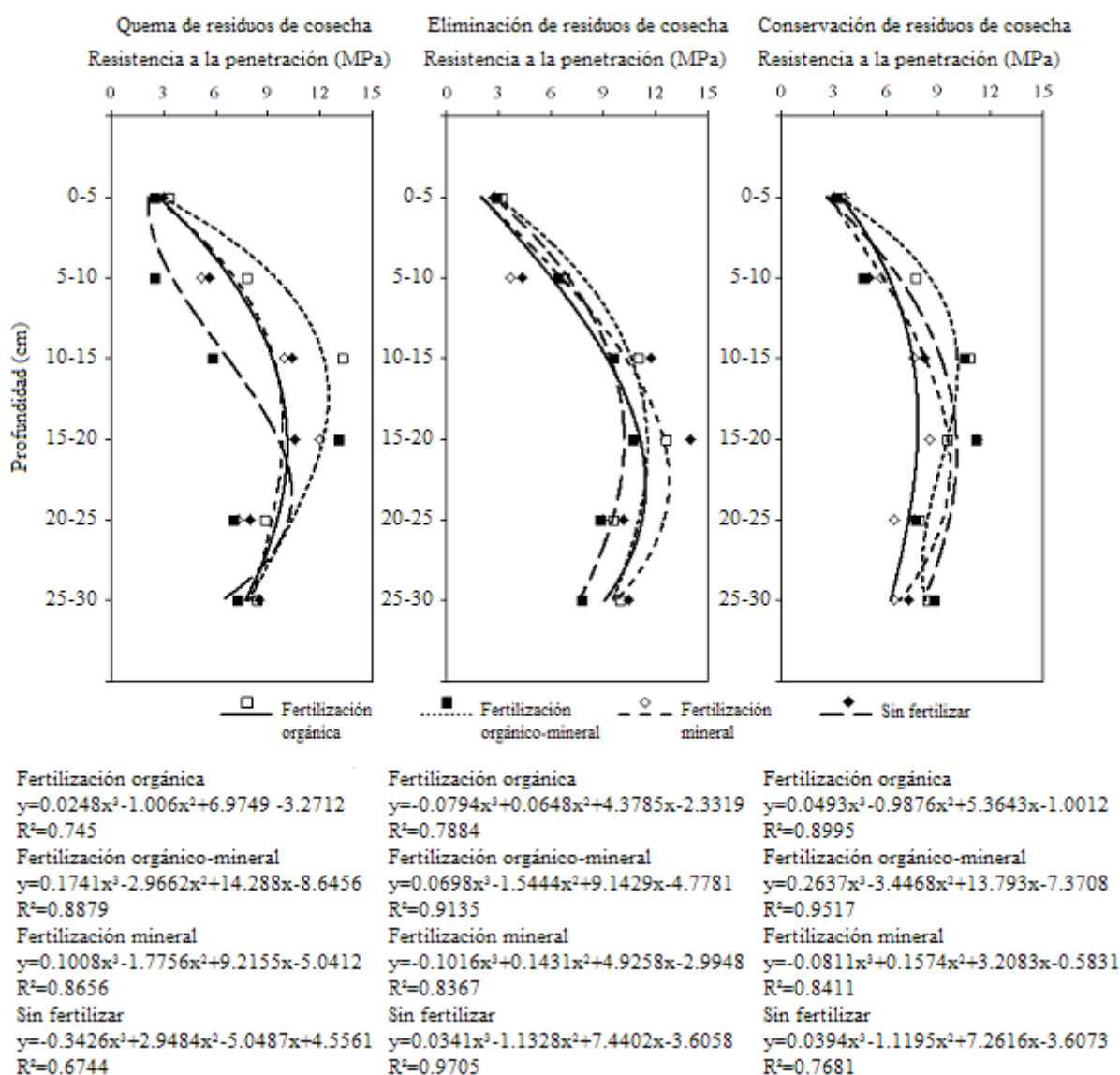


Figura 1.- Comportamiento de la resistencia a la penetración según el manejo del cultivo de la caña de azúcar.

Toledo *et al.* (2008) al estimar la producción de biomasa en agroecosistemas cañeros, sugieren que la presencia de los residuos de cosecha dejados en el campo ($16-30 \text{ t ha}^{-1}$) favorece el incremento de los rendimientos agrícolas y señalan que entre los factores de influencia directa se encuentra la preservación de la humedad del suelo. Sin embargo, en los agroecosistemas donde se realiza

la quema los rendimientos agrícolas resultan menores y, mediante una ecuación de regresión, determinaron que el aporte de residuos de cosecha era mucho menor (15-18 t ha⁻¹).

Puede apreciarse también que la *Fertilización orgánico-mineral* en los tres tratamientos arroja los valores más altos de compactación en las primeras profundidades. Lo cual puede estar dado por el hecho de que las cantidades de cachaza incorporadas al suelo no son suficientes para atemperar el efecto del tránsito de la maquinaria agrícola.

Además, en un experimento de larga duración de caña de azúcar, plantada sobre un Vertisol, Graham *et al.* (2002) encontraron que la estabilidad de los agregados se incrementa con el aumento de los residuos de cosecha, pero la misma disminuye debido a las aplicaciones de fertilizantes.

La Tabla 2 muestra que en ninguna de las variantes de manejo de la caña de azúcar se encontraron capas no compactadas o con bajos niveles de compactación y que pudieran ser clasificadas como friables (F) o poco compactadas (PC).

Tabla 2.- Categorías de compactación según el manejo de los residuos de cosecha y el tipo de fertilización.

Horizontes (cm)	Manejo de los residuos de cosecha					
	Quema de residuos de cosecha	Elimina ción de residuos de cosecha	Conserva ción de residuos de cosecha	Quema de residuos de cosecha	Elimina ción de residuos de cosecha	Conserva ción de residuos de cosecha
	Fertilización orgánica			Fertilización orgánico-mineral		
0-5	MC	MC	MC	MC	MC	MC
5-10	MC	MC	MC	C	MC	C
10-15	AC	AC	C	AC	AC	AC
15-20	AC	AC	C	AC	AC	C
20-25	MC	C	MC	C	C	C
25-30	C	C	MC	C	C	C
	Fertilización mineral			Sin fertilizar		
0-5	MC	MC	MC	MC	MC	MC
5-10	MC	MC	MC	MC	MC	MC
10-15	AC	AC	C	MC	C	AC
15-20	AC	AC	AC	AC	AC	AC
20-25	C	AC	C	MC	C	C
25-30	C	AC	C	C	C	C

MC: Medianamente Compactado; C: Compactado; AC: Altamente Compactado.

En todos los casos se determinó que existía una capa superficial medianamente compactada (MC) en los primeros 10 cm del perfil del suelo, excepto en la QRC y CRC combinadas con *Fertilización orgánico-mineral*, donde esta capa superficial medianamente compactada solo alcanzó los 5 cm de espesor, sobreyacente sobre un horizonte compactado (C). Un comportamiento diferente también mostró la *Quema de residuos de cosecha* sin ningún tipo de fertilización, donde la capa medianamente compactada alcanzó un espesor hasta los 15 cm de profundidad.

En todas las variantes de la QRC se encontraron capas subsuperficiales altamente compactadas (AC). Estos horizontes se localizaron, generalmente, entre los 10-20 cm de profundidad; excepto donde no se aplicó ningún fertilizante a dicho manejo de residuos de cosecha, en el que la capa altamente compactada se encontró entre los 15-20 cm de profundidad.

En el caso de la *Eliminación de los residuos de cosecha*, también se encontró un horizonte altamente compactado subsuperficial a una profundidad de 10-20 cm donde se fertilizó con cachaza y con cachaza más nitrógeno. Sin embargo, donde no se fertilizó, dicha capa solo se manifestó a los 15-20 cm de profundidad. La capa altamente compactada de mayor espesor se observó en la variante donde se utilizó *Fertilización mineral*, pues la potencia de la misma llegó desde los 10 hasta los 30 cm de profundidad. Excepto en esta última variante, en todos los casos de la ERC, se observó que las capas altamente compactadas sobreyacen en un horizonte compactado que aparece entre los 20-30 cm de profundidad.

En el tratamiento *Conservación de residuos de cosecha con Fertilización orgánica*, se encontró una capa subsuperficial compactada (C) entre los 10-20 cm de profundidad, sobreyacente en un horizonte medianamente compactado desde los 20 hasta los 30 cm de profundidad. En el resto de las variantes de fertilización aplicadas al manejo de los residuos, se observaron horizontes subsuperficiales altamente compactados. En el caso de *Fertilización orgánico-mineral*, esta categoría de compactación se manifestó en la capa de 10-15 cm, mientras que en *Fertilización mineral* se observó a mayor profundidad (15-20 cm). En el caso de la *Conservación de residuos de cosecha*, la capa altamente compactada mostró un mayor espesor, al aparecer desde los 10 hasta los 20 cm de profundidad. Excepto en *Fertilización orgánica*, en la CRC, combinada con los demás tipos de fertilización, todas las capas altamente compactadas sobreyacen en un horizonte compactado de espesor variable.

La Tabla 3 muestra que para todas las variantes de la *Quema de residuos de cosecha* y la *Eliminación de residuos de cosecha*, se recomienda realizar el cultivo profundo para la descompactación del suelo en todas las variantes de fertilización. En el caso de la *Conservación de residuos de cosecha* cuando se fertiliza con cachaza, es suficiente el cultivo tradicional. Sin embargo, en los subtratamientos *Fertilización orgánico-mineral*, *Fertilización mineral* y *Sin fertilizar*, se recomienda, a pesar de la presencia de los residuos de cosecha en el campo, el cultivo profundo para descompactar el suelo.

Tabla 3.- Labores necesarias para la descompactación del suelo.

Fertilización	Manejo de los residuos de cosecha		
	Quema de residuos de cosecha	Eliminación de residuos de cosecha	Conservación de residuos de cosecha
Orgánica	Cultivo profundo	Cultivo profundo	Cultivo tradicional
Orgánico-mineral	Cultivo profundo	Cultivo profundo	Cultivo profundo
Mineral	Cultivo profundo	Cultivo profundo	Cultivo profundo
Sin fertilizar	Cultivo profundo	Cultivo profundo	Cultivo profundo

Carvalho *et al.* (2013) al evaluar el comportamiento de la biomasa de la caña de azúcar en tres localidades brasileñas, plantean que la parte aérea de la planta constituye la principal fuente de residuos de cosecha incorporados al suelo, por lo menos en cantidades dos veces mayor que los que puede aportar el sistema radicular de la misma.

CONCLUSIONES

El manejo de los residuos de cosecha tiene un mayor efecto sobre la resistencia a la penetración que la fertilización. En *Quema de residuos de cosecha*, la mayor resistencia a la penetración se manifiesta entre los 10-20 cm de profundidad, más cercana a la superficie y con un mayor espesor que en el caso de *Eliminación de residuos de cosecha* donde la mayor resistencia a la penetración aparece en la capa de 15-20 cm. Cuando se conservan los residuos, el incremento de la resistencia a la penetración tiende a estabilizarse por debajo de los 10 cm de profundidad.

En *Conservación de residuos de cosecha* fertilizada con cachaza es posible descompactar el suelo con cultivo tradicional. Mientras que, combinada con los subtratamientos *Fertilización orgánico-mineral*, *Fertilización mineral* y *Sin fertilizar*, la presencia de los residuos de cosecha en el campo no basta para proteger al suelo del proceso de compactación, por lo que son necesarias las mismas labores de descompactación que en *Quema de residuos de cosecha* y en *Eliminación de residuos de cosecha*.

BIBLIOGRAFÍA

- [El suelo es un VERTISOL]. (s.f). Recuperado de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/FAO/Vertisol.htm>
- Acevedo, D. C.; Hernández Acosta, E.; Maldonado Torres, R.; 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.
- Adamchuk, V. I.; Molin, J. P. 2006. Hastes instrumentadas para a mensuração da resistência mecânica do solo. *Engenharia Agrícola*, 26 (1): 161-169.
- Amberger, A. 2006. Soil fertility and plant nutrition in the tropics and subtropics. International Fertilizer Industry Association & International Potash Institute. Paris, 96 pp.
- Arcoverde, S. N. S.; Souza, C. M. A. de; Nagahama, H. de J.; Mauad, M.; Armando, E. J.; Cortez, J. W. 2019. Growth and sugarcane cultivars productivity under no-tillage and reduced tillage system. *Ceres*, 66 (3): 168-177.
- Arshad, M. A.; Lowery, B.; 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, págs. 123-144.*
- Baldwin, M., C. E. Kellogg, and J. Thorp. 1938. Soil classification. pp. 979–1001. In: *Soil and man. Yearbook of Agriculture. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.*
- Betancourt Rodríguez, Y.; Cruz Díaz, M.; Pérez Santos, D.; Izquierdo Daniel, J.; Machado Sánchez, O. 2017. Agrotechnique evaluation of a cuban tow in a Vertisol Pelic typical Soil. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26 (1): 23-31.
- Bezerra, R. R.; Silva, Ê. F. de F. e; Siqueira, G. M.; Dantas, D. da C.; Almeida, B. G. de; Silva, A. O. da. 2019. Least limiting water range in Spodosol and initial growth of sugarcane under soil bulk densities and salinities. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23 (11): 833-839.

- Biondi, F.; Myers, D. E.; Avery Ch. C. 1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 24 (7):1354-1368.
- Bolio-López, G. I., S. Salgado-García, D. J. Palma-López, L. C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada y J. D. Etchevers B. 2008. Dinámica del potasio en Vertisoles y Fluvisoles cultivados con caña de azúcar *Terra Latinoamericana* 26: 253-263.
- Boul, S. W., F. D. Hole, and R. J. McCracken. 1973. Soil genesis and classification. The Iowa State University Press. Ames, IA, USA.
- Cairo Cairo, P. y Fundora Herrera, O. 2005. Edafología. Editorial Félix Varela. La Habana, 382 pp.
- 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.; 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.; Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58:1501-1511.
- Caña de azúcar en Cuba.(2018, julio 13). Recuperado de <https://blog.vacuba.com/economia/cana-de-azucar-en-cuba/>
- Carvalho, J. L. N., Otto, R., Coutinho Junqueira Franco, H. y Ocheuze Trivelin, P. C. 2013. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. *Scientia Agricola*, 70 (5): 336-344.
- Cid Lazo, G.; Herrera Puebla, J.; Sierra, L. O.; López Seijas, T. 2004a. Gestión del agua en el manejo integral de los Vertisuelos bajo diferentes agroecosistemas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 13 (3): 1-5.
- Cid Lazo, G.; López Seijas, T.; González Robaina, F. 2006. Parámetros fundamentales para la caracterización hidropedológica general de los suelos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 15 (4): 42-47.

- Clivate-McIntyre, A. A. y MacCoy, E. L. 2006. Fractional brownian description of aggregate surfaces within undisturbed soil samples using penetration resistance measurements. *Soil and Tillage Research*, 88: 144-152.
- Comerma, J. A. 1985. Propuestas para la Taxonomía de Vertisoles. *Agronomía Tropical* 34: 205–212. [Links] Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 1996. Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57: 289–375.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. E269–E286. In: M. E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. 269-286. In: M. E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. New York, NY, USA.
- Cuéllar, I., de León, M., Gómez, A., Piñón, Dolores, Villegas, R. y Santana, I. 2003. Caña de azúcar. Paradigma de sostenibilidad. Ediciones Publinica. La Habana, 175 pp.
- De la Rosa Andino, A. A.; Herrera Suárez, M.; González Cueto, O.; Benítez Leyva, L. V.; Calzada Pompa, I.; 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.
- De Sigmond, A. A. J. 1935. Los principios de la ciencia del suelo. Tomo II. Sistemática y cartografía. Trad. del inglés por D. Ojeda Ortega. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Defosse, P. y Richard, G. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Tillage Researchs*, 67: 41-64.
- Dudal, R. and H. Eswaran. 1988. Distribution, properties and classification of Vertisols. pp. 1–22. In: L. Wilding and R. Puentes (eds.). *Vertisols: their distribution, properties, classification and management*. Technical monograph 18. Texas A & M Printing Center. College Station, TX, USA.

- Espinosa F., J., E. Carrillo A., D. J. Palma L., J. J. Peña C. y S. Salgado G. 2002. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en sorgo con la técnica isotópica ^{15}N , en un Vertisol con drenaje subsuperficial. *Terra* 20: 129-139.
- FAO–ISRIC y SICS (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación–Referencia Internacional de Suelos y Centro de Información y Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo). 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. FAO. Roma, Italia.
- FAO–UNESCO (Food and Agriculture Organization–United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 1974. Soil Map of the World 1:1 000 000. Vol. I. Legend. UNESCO. Paris, France.
- FAO–UNESCO–ISRIC (Food and Agriculture Organization–United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization–International Soil Reference and Information Centre). 1988. Soil Map of the World. Revised Legend. World Soil Resources Report 60. FAO. Rome, Italy.
- Fernández, J. y Furlani, V. L. 1983. Recomendação para uso do penetrómetro de impacto medelo IAA/planasucar-Stolf. *Revista Açúcar, Alcohol e Subprodutos*, 1 (3): 235-241.
- Follett, R. F., J. Z. Castellanos, and E. D. Buenger. 2005. Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 83: 148-158. doi. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.02.013>.
- Fregoso Tirado, L. F. 2008. Cambios en las características químicas y microbiológicas de un Vertisol inducidos por sistemas de labranza de conservación. *Terra Latinoamericana* 26: 161-170.
- Friedrich, Th. 2014. La seguridad alimentaria: retos actuales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48 (4): 319-322.
- García Ruiz, I., Sánchez Ortiz, Maritza, Betancourt Rodríguez, J., Vidal Díaz, M. L., Ruiz Traba, J. y Reyes Peñate, Annerys. 2013. Metodología para evaluar la compactación de los suelos con penetrómetro de impacto en condiciones de

cosecha mecanizada de la caña de azúcar. Instituto de Investigaciones de la Caña de azúcar. La Habana, 21 pp.

García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón, J. F. Gallardo Lancho y P. Paneque Rondón. 2005. Efecto de la siembra directa en las reservas orgánicas de un Vertisol de Guanajuato, México. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 14: 38-44.

García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón y J. F. Gallardo Lancho. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. *Terra Latinoamericana* 24: 241-251.

Genro Jr., S. A.; D. J. Reinert, D. J.; Reichert, J. M. 2004. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 477-484.

Glinka, K. D. 1914. Los Grandes Grupos de suelos del mundo y su desarrollo. Trad. del alemán al inglés por C. F. Marbut. Trad. del inglés al español por D. Ojeda Ortega. Chapingo, Estado de México.

González Cueto, O., Iglesias Coronel, C. E. y Herrera Suárez, M. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18 (2): 57-63.

González Cueto, O.; Iglesias Coronel, C. E.; Herrera Suárez, M. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18 (2): 57-63.

Graham, M. H., Haynes, R. J. y Meyer, J. H. 2002. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *European Journal of Soil Science*, 53: 589-598.

Guimarães Jr., W. da S.; Maria, I. C. de, Araujo Jr., C. F.; Lima, C. C. de; Vitti, A. C.; Figueiredo, G. C.; Dechen, S. C. F. 2019. Soil compaction on traffic lane due to soil

tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. *Scientia Agricola*, 76 (6): 509-517.

Gutiérrez Rodríguez, F., Vaca García, V. M., Pérez López, Delfina de Jesús, Franco Mora, O., Rubí Arriaga, M., Castañeda Vildózola, A. y Morales Rosales, E. J. 2014. Compactación mecánica en suelos Vertisoles. *Ciencias Agrícolas Informa*, 23 (2): 7-21.

Gutiérrez-Castorena, E. V., M. C. Gutiérrez-Castorena, and C. A. Ortiz-Solorio. 2015. Carbon capture and pedogenetic processes by change of moisture regime and conventional tillage in Aridisols. *Soil Tillage Res.* 150: 114-123. doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.02.001>.

Hernández Jiménez, A., Pérez Jiménez, J. M., Bosch Infante, D. y Castro Speck, N. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. San José de Las Lajas, 91 pp.

Hernández Jiménez, A., Pérez Jiménez, J. M.; Bosch Infante, D.; Castro Speck, N. 2019. La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015. *Cultivos Tropicales*, 40 (1): a15-e15.

Hernández Jiménez, A.; Pérez Jiménez, J. M.; Bosch Infante, D.; Castro Speck, N. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. INCA Ediciones, San José de Las Lajas. 91 pp.

Hosseini, M.; Movahedi Naeini, S. A. M.; Dehghani, A. A.; Khaledian, Y. 2016. Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regression methods. *Soil & Tillage Research*, 157: 32-42.

Iaia, A. M.; Maia, J. C. S.; Kim, M. E. 2006. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10 (2): 523-530.

ISSS–ISRIC–FAO (International Society of Soil Science–Information Soil Reference and Information Centre–Food and Agriculture Organization). 1994. World Reference Base for Soil Resources. FAO. Rome, Italy.

- IUSS Working Group WRB. IUSS–ISRIC and FAO (International Union of Soil Sciences–Information Soil Reference and Information Centre and Food and Agriculture Organization). 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. 2nd ed. World Soil Resources Report 103. FAO. Rome, Italy.
- Jaramillo, D. F. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, 613 pp.
- Lozano-García, B., L. Parras-Alcántara y J. L. Muriel-Fernández. 2011. Soil tillage effects on monovalent cations (Na⁺ and K⁺) in vertisols soil solution. *Catena* 84: 61-69.
- Maltauro, T. C.; Guedes, L. P.C.; Uribe-Opazo, M. A. 2019. Reduction of sample size in the analysis of spatial variability of non-stationary soil chemical attributes. *Engenharia Agrícola*, 39 (special issue): 56-65.
- Marques, F. A.; Souza, R. A. da S.; Souza, J. E. S. de; Lima, J. F. W. F.; Souza Júnior, V. S. de. 2014. Caracterização de Vertissolos da ilha de Fernando de Noronha, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38:1051-1065
- Meyer, J. H., van Antwerpen, R., Graham, M. H. y Haynes, R. J. 2000. Long-term effects of trash retention on cane yield and soil fertility using results from a 60 year old trial at mount edgecombe. *Agronomy Workshop Abstracts. ISST*.
- Molin, J. P.; Magalhães, R. P.; Faulin, G. D. C. 2006. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. *Engenharia Agrícola*, 26 (2): 442-452.
- Mota, V. A., Santos, L. D. T., Alonso, J., Santos Jr., A., Machado, V. D., Santos, M. V. y Leite, G. L. D. 2011. Producción de biomasa herbácea en el establecimiento de un sistema de integración agricultura-ganadería-bosque con dos variantes para el control de malezas. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45 (3): 1-7.
- Murakami, J. H., Brugnaro, C., Silva, L. G., Ferreira da Silva, L. C. y Correia Margarido, L. A. 2014. Penetrômetro de impacto stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 38 (3): 774-782.

- Nacci, Silvana y Plá Sentis, I. 1992. Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país. *Agronomía Tropical*, 42 (1-2): 115-132.
- Nasri, B.; Fouché, O.; Torri, D. 2015. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. *Catena*, 131: 99-108.
- Oakes, H. and J. Thorp. 1950. Dark-clay soils of warm regions variously called Rendzina, black cotton soils, Regur, and Tirs. pp. 136–149. In: J. V. Drew, R. B. Grossman, and H. W. Smith (eds.). Selected papers in soil formation and classification. SSSA Special Publication Series 1. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Oleschko, C., J. D. Etchevers, and A. Hernández. 1996. Structure and pedofeatures of Guanajuato (México) Vertisol under different cropping systems. *Soil Tillage Res.* 37: 15-36.
- Oleschko, K., J. D. Etchevers B., and L. Osorio J. 1993. Pedological features as indicators of the tillage effectiveness in Vertisols. *Soil Tillage Res.* 26: 11-31.
- Ortiz Laurel, H., Salgado García, S., Castelán Estrada, M. y Córdova Sánchez, S. 2012. Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Publicación especial (4): 767-773.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez C. 1995. Clasificación de Vertisoles en la Taxonomía de Suelos Versión 1992. pp. 231–236. In: J. F. Ruiz Figueroa (ed.). Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable. 2a Reunión Nacional sobre Suelos Arcillosos del 10 al 14 de Noviembre de 1994. Mérida, Yucatán, México.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., J. J. Obrador O., A. Trujillo N., L. del C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruíz B. y M. A. Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.

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.

Porta Casanellas, J., M. López–Acevedo Reguerín y C. Roquero de Laburu. 2003. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. 3a ed. Mundi–Prensa. México, D. F.

Prado, R. de M.; Roque, C. G.; Souza, Z. M. de. 2002. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 37 (12): 1795-1801.

PRODUCCIÓN DE CAÑA (s.f.) Recuperado de <https://www.azcuba.cu/es/producci%C3%B3n-de-ca%C3%B1a#93>

Ramírez-Barrientos, C. E., B. Figueroa-Sandoval, V. Ordaz-Chaparro y V. H. Volke-Haller. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol Terra Latinoamericana 24: 109-118.

Ribón C., M. A., S. Salgado García, D. J. Palma López y L. C. Lagunes Espinoza. 2003. Propiedades químicas y físicas de un Vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia* 28: 154-159.

Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, L. A. Aceves Navarro, and E. García-López. 2009. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 96: 1285-1292.

Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, and L. A. Aceves-Navarro. 2010. Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 97: 1365-1374. doi. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.001>.

Rodríguez, I., Pérez, H., Cruz, O. y Vera, A. 2010. Establecimiento de prácticas de manejo para evitar la degradación de los suelos dedicados a caña de azúcar en la

UBPC Tuinucú. *CD-ROM Memorias del XVII Congreso Científico Internacional del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*. San José de las Lajas.

Rosales, R. y J. M. Figueroa Vargas. 1985. Diferentes prácticas de labranza para rye grass en suelos arcillosos del Valle de Mexicali. Distrito de riego 014. SARH. Primera reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Del 2 al 5 de octubre de 1985. Celaya, Gto. Memorias. UACH, Suelos. Chapingo, México.

Salgado G., S., E. R. Núñez, J.J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.

Salgado G., S., R. Núñez E., J. J. Peña C., J. D. Etchevers B., D. J. Palma L. y M. R. Soto H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.

Salgado G., S., R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2003. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia* 28: 576-580.

Salinas-García, J. R., A. D. Báez-González, M. Tiscareño-López, and E. Rosales-Robles. 2001. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 59: 67-79. doi. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00187-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00187-2).

Sánchez-Hernández, R., D. J. Palma López, J. J. Obrador Olán y U. López Noverola. 2003. Efecto de los rastrojos sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Vertisol y rendimientos de caña de azúcar (*saccharum officinarum* L.) en Tabasco, México. *Interciencia (Venezuela)* 28: 404-407.

Sánchez-Vera, G., J. J. Obrador Olán, D. J. Palma López y S. Salgado García. 2003. Densidad aparente en un Vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia* 28: 347-351.

Schjøning, P.; Lamandé, M.; Munkholm, L. J.; Lyngvig, H. S.; Nielsen, J. A. 2016. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to

- differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils. *Soil & Tillage Research*, 163: 298-308.
- 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.
- Soil Survey Staff, 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. US Department of Agriculture–Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA
- Soil Survey Staff. 1960. Soil classification. A comprehensive system. 7th Approximation. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook 436. Soil Conservation Service–US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Soil Survey Staff. 1983. Keys to Soil Taxonomy. Cornell University. Ithaca, NY, USA.
- Soil Survey Staff. 1985. Keys to Soil Taxonomy. 2nd ed. Cornell University. Ithaca, NY, USA.
- Soil Survey Staff. 1992. Keys to Soil Taxonomy. SMSS Technical Monograph 19. 5th ed. Pocahontas Press. Blacksburg, VI, USA.
- Soil Survey Staff. 1994. Keys to Soil Taxonomy. 6th ed. US Department of Agriculture–Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Soil Survey Staff. 1996. Keys to Soil Taxonomy. 7th ed. US Department of Agriculture–Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. US Department of Agriculture–Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Soil Survey Staff. 2003. Keys to Soil Taxonomy. 9th ed. US Department of Agriculture–Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA

- Stolf, R. 1991. Teoria 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. 1991. Teoria 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 Açúcar, Alcool e Subprodutos*, 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.
- Tecnicaña. 2007. Mecanización de la cosecha de caña de azúcar. *Tecnicaña*, 11 (19): 31-32.
- Toledo, E., Cabrera, J. A., Leyva, A. y Pohlan, H. A. J. 2008. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroecosistemas de caña de azúcar. *Cultivos Tropicales*, 29 (3): 17-21.
- Torres, J. y Villegas, F. 2000. Long-term experiments on green cane trash management. *Agronomy Workshop Abstracts. ISST*.
- Vidal-Martínez, J. L., R. Núñez E., I. Lazcano F., J. D. Echevers B. y R. Carrillo G. 2006. Nutrición potásica del brócoli (*Brassica oleracea*) con manejo convencional y fertirrigación en un Vertisol en invernadero. *Agrociencia* 40: 1-11.
- Villegas, R., de León, M. y Pérez, H. 2002. Manual de fertilización de la caña de azúcar en Cuba. Ediciones Publinica. La Habana, 127 pp.
- Yáñez Díaz, M. I.; Cantú Silva, I.; González Rodríguez, H. 2018. Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un Vertisol. *Terra Latinoamericana*, 36: 369-379.

Zúñiga-Estrada, L., J. J. Martínez-Hernández, G. A. Baca-Castillo, A. Martínez-Garza, J. L. Tirado-Torres, J. Kohashi-Shibata y J. Cruz-Díaz. 2010. Efecto de la fertilización con potasio en un Vertisol sobre la relación cantidad/intensidad (Q/I). *Terra Latinoamericana* 28: 319-32.