

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Tesis presentada en opción al título académico de Master en Ingeniería
Agrícola

**EFFECTOS DE LA COSECHA MECANIZADA SOBRE LAS PLANTACIONES
DE CAÑA DE AZÚCAR EN SUELOS ARCILLOSOS PESADOS**

Autor: Eduardo Rafael Saucedo Levi

Tutores:

Dr. C. Elvis López Bravo

Dr. C. Yoel Betancourt Rodríguez

Santa Clara, 2018

Dedicatoria

Alcanzar nuestras más ansiadas metas, convierte los sueños en realidad, las utopías en hechos palpables.

Llegar a este nivel de desarrollo exige de fuentes inspiradoras que impulsen nuestros pasos, por tanto quiero dedicar la presente tesis de maestría:

** A mis padres Olayda y Eduardo, las personas que más quiero y amo en el mundo.*

** Al Dr. C. Elvis López Bravo y Yoel Betancourt mis tutores que ha sido capaces de trasmitirme sus conocimientos y apoyo incondicional en todo momento.*

** A mi familia, amigos y compañeros de trabajo.*

Agradecimientos

Expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a:

** Mis tutores, Dr. C. Elvis López Bravo y Yoel Betancourt por aportarme sus conocimientos y experiencia en la correcta realización del presente trabajo.*

** Quiero agradecer a la revolución por darme la oportunidad de realizar mis estudios y continuar formándome como un profesional para aportar mis conocimientos al desarrollo del país.*

** Todos los profesores que con tanta paciencia y dedicación contribuyen a la superación y el mejoramiento humano.*

** Los compañeros de la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar en Sagua la Grande quienes colaboraron e hicieron posible la revisión, organización y edición de esta investigación.*

Pensamiento

La tierra produce sin cesar, si los que viven en ella quieren librarse de miseria, cultívenla de forma tal que en toda época produzca más de lo necesario para vivir.

José Martí

Resumen

Con el objetivo de determinar el efecto sobre el suelo del paso del sistema de máquinas para la cosecha de caña de azúcar, en condiciones de alta humedad se realizó el presente trabajo. La investigación tuvo lugar en áreas de tres unidades de producción de caña, de la UEB Héctor Rodríguez, en la costa Norte de Villa Clara, con la participación de la cosechadora CASE IH 8 800 y el autobasculante tirado por los tractores Belarus 1523 y Maxxum CASE 150. Se determinaron las principales características de los suelos predominantes y las malezas encontradas, así como las variaciones del microrrelieve del suelo, la densidad aparente, los valores de humedad y de resistencia a la penetración en las zonas evaluadas. Los resultados demostraron afectaciones debido al tráfico de los equipos durante la cosecha, destacándose el agregado tractor-autobasculante que afecta considerablemente el microrrelieve por desplazarse sobre el cantero. Se encontraron valores de densidad aparente característicos de los suelos arcillosos pesados, y elevados niveles de humedad, alcanzando hasta un 64.0%, provocando serios problemas de traficabilidad para los agregados tractor-autobasculante y ocasionando reiterados atascaderos. Se determinó un incremento elevado de la compactación con respecto a la profundidad, posterior a la cosecha, en el centro del surco y más ligero en el centro del espacio entre hileras. También se definió un ancho de vía aceptable, recomendándose adecuar los remolques autobasculantes y evaluar la estabilidad del equipo a partir de la reducción del ancho de vía propuesto.

Abstract

In order to determine the effect on the soil system step machines for harvesting sugar cane in high humidity conditions, the following diploma work was performed. The research took place in areas of three units for production of sugar cane, the UEB Hector Rodriguez, on the north coast of Villa Clara, with the participation of the harvester CASE IH 8,800 and cantilever pulled by Belarus 1523 and Maxxum tractors CASE 150. The main characteristics of the predominant soils and weeds found and variations of soil profile were determined, the dry bulk density, moisture values and compaction in the areas evaluated. The results showed significant affectations due to traffic during harvesting equipment, highlighting the tractor-cantilever added that significantly affects the topographic profile scroll over the stonemason and affect the headwaters of the grooves for the turn and inadequate equipment parking. Characteristic values of apparent density of heavy clay soil and high humidity, reaching up to 64.0%, causing serious problems of trafficability for tractor-cantilever aggregates and causing repeated miry were found. Increases in compaction was also determined with respect to depth, after harvesting, in the center groove and lighter in the center of the ridge. It was recommended to adapt the cantilever trailers, swerve and avoid parking machinery inside the field.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	6
1.1 Sistemas mecanizados empleados en la cosecha cañera.....	9
1.2 Propiedades de los suelos agrícolas.....	17
1.3 Factores que influyen en la degradación de los suelos cañeros	19
1.3.1 Variaciones de la humedad	19
1.3.2 Irregularidades en el perfilado del suelo	21
1.3.3 Variaciones de la densidad aparente.....	23
1.3.4 La compactación de los suelos.....	25
CAPÍTULO II	28
MATERIALES Y MÉTODOS	28
2.1 Metodología para la descripción del área de estudio	28
2.2 Metodología para la determinación de la humedad del suelo	28
2.3 Metodología para la determinación del perfilado del suelo	31
2.4 Metodología para la determinación de la densidad aparente.....	31
2.5 Metodología para la determinación de la resistencia a la penetración del suelo	33
2.6 Metodología para los análisis estadísticos.....	35
CAPÍTULO III	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
3.1 Descripción del área de estudio.....	36
3.1.1 Principales características de los suelos estudiados	36
3.1.2 Particularidades de la siembra y preparación del suelo.....	38
3.1.3 Malezas predominantes en la zona de estudio.....	39

3.2 Determinación de la humedad del suelo durante la cosecha.....	40
3.2 Variaciones del perfilado del suelo.....	43
3.4 Variaciones de la densidad aparente del suelo.....	49
3.5 Resultados de la resistencia a la penetración del suelo.....	55
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

INTRODUCCIÓN

La disminución de la producción de caña, ha traído un efecto negativo para el mercado laboral en varias regiones del mundo. La tendencia a una mayor mecanización y utilización de agroquímicos buscando altos rendimientos con su consiguiente efecto negativo para el medio ambiente. Por otra parte, la tendencia climática mundial apunta hacia la desertificación o prolongación de los períodos de sequía, por lo que los recursos hídricos serán cada vez más necesarios y estratégicos. (FAO, 2015).

La producción de azúcar de caña en el mundo y en particular en Cuba en los momentos actuales merece una valoración integral teniendo en cuenta los componentes ambiental, económico y social, como pilares fundamentales de la sostenibilidad. La variación de los precios de los componentes de la industria y los portadores energéticos en el mercado mundial, comparado con los precios del azúcar de caña en ese mismo mercado, están haciendo insostenible la producción, aun teniendo en cuenta otros derivados que por supuesto implican la introducción de nuevas tecnologías, lo cual a veces limita un gran número de fábricas a la producción casi exclusiva de azúcar (Martínez *et al.*, 2015).

En Cuba existen alrededor de 257 700 ha con suelos arcillosos pesados y problemas de mal drenaje dedicados al cultivo de la caña de azúcar (37%). Dentro de dichos suelos se encuentra una parte con características edafoclimáticas específicas, muy susceptibles al sobre-humedecimiento creado por los períodos lluviosos, que requieren de la atención fitotécnica de la caña, mediante un manejo diferenciado en el proceso de su cosecha. A las áreas con estas características se le ha denominado condiciones de alta humedad (Betancourt *et al.*, 2015).

Existe una evolución considerable en lo referente a las máquinas, implementos y capacidad de carga en los transportes, lo que provoca compactación del suelo. La mecanización de la cosecha afecta la producción, duración del cultivo, propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Se señala que el

crecimiento de las raíces lo determinan cuatro factores fundamentales: resistencia mecánica, disponibilidad de agua, oxígeno, energía, precisando que las propiedades asociadas son la resistencia a la penetración, el potencial de agua, la aireación al igual que la temperatura, respectivamente (García *et al.*, 2010).

La cosecha es una de las etapas de mayor importancia en la producción de caña de azúcar. Es por ello que como proceso exige un alto grado de organización y coordinación de todos los factores que en ella intervienen, desde el campo hasta el basculador. Varios son los principios básicos para una buena cosecha, entre ellos: cosechar la caña en su máximo punto de madurez, cumplir los índices de eficiencia, gasto de combustible, pérdidas, limpieza y productividad y reducir al mínimo los daños a la cepa (Agroinformación, 2013).

La compactación del suelo que es uno de los factores que más contribuyen a su degradación, el más preocupante de los problemas ambientales globales para el caso de Cuba. La compactación es una de las causas de la caída de los rendimientos agrícolas, principalmente en los retoños; por lo que se le considera uno de los principales problemas que hay que enfrentar en la agricultura cañera. El suelo húmedo es mucho más susceptible a la compactación que el suelo seco. De los factores básicos que más afectan el grado de compactación del suelo, la humedad es el más importante (Betancourt, 2013).

En Cuba se han empleado las variantes de cosecha manual, semi-mecanizada y mecanizada, esta última la más extendida y en la que se utilizan principalmente cosechadoras autopropulsadas de procedencia nacional; KTP con sus diferentes modelos. Por otra parte, el sistema de cosecha empleado durante décadas ha sido el corte mecanizado sin corta-cogollo para centro de limpieza; con el empleo del tractor con carretas y del camión con remolque como medios de transporte para el tiro de la caña hacia el centro de recepción desde los campos cañeros (Matos *et al.*, 2014).

En la actualidad se ha potenciado el sistema de corte mecanizado con corta cogollo para tiro al basculador, con el que se introduce el sistema de transporte

denominado tiro partido o trasbordo de caña mediante remolques o semirremolques auto basculantes tirados por tractor para el transporte dentro del campo y camiones con remolques para el tiro hacia el basculador. El sistema se caracteriza por aportar beneficios tales como: reducción de los daños a los campos cañeros producto de la cosecha mecanizada, aumento de la productividad, disminución de los costos de la cosecha y mejora de la calidad del material que va a la industria (Martínez *et al.*, 2015).

La compactación en los suelos agrícolas es un problema que conlleva a la utilización de energía en las labores, alto consumo de recursos y la degradación del suelo haciendo que se pierdan sus propiedades así como obteniéndose bajas tasas de rendimiento en la producción. Dicho factor ocurre cuando se aplica presión o carga a la superficie del mismo, como resultado de pisoteo de animales, personas y la inadecuada utilización de equipos como tractores especialmente cuando el suelo está húmedo. La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración, la densidad aparente, provocando una reducción de la porosidad (Demuner *et al.*, 2013).

Considerando la importancia del cultivo de la caña en la zona norte de la provincia de Villa Clara tanto en rendimiento como en área cultivada, las cuales tienen lugar en suelos pesados que se caracterizan por mal drenaje y condiciones de cosecha adversas por la elevada humedad se define el siguiente problema científico:

Problema Científico: ¿Cuáles son los efectos a las propiedades del suelo que ocasiona el paso del sistema de máquinas en la cosecha de la caña de azúcar en la zona norte de Villa Clara?

Objeto de estudio: Los suelos destinados al cultivo de la caña de azúcar en condiciones de alta humedad.

Hipótesis: Si se determinan las variaciones de las propiedades del suelo tales como: la humedad, el perfilado del suelo, la densidad así como la resistencia a la penetración del suelo, a diferentes profundidades y en diferentes momentos en la

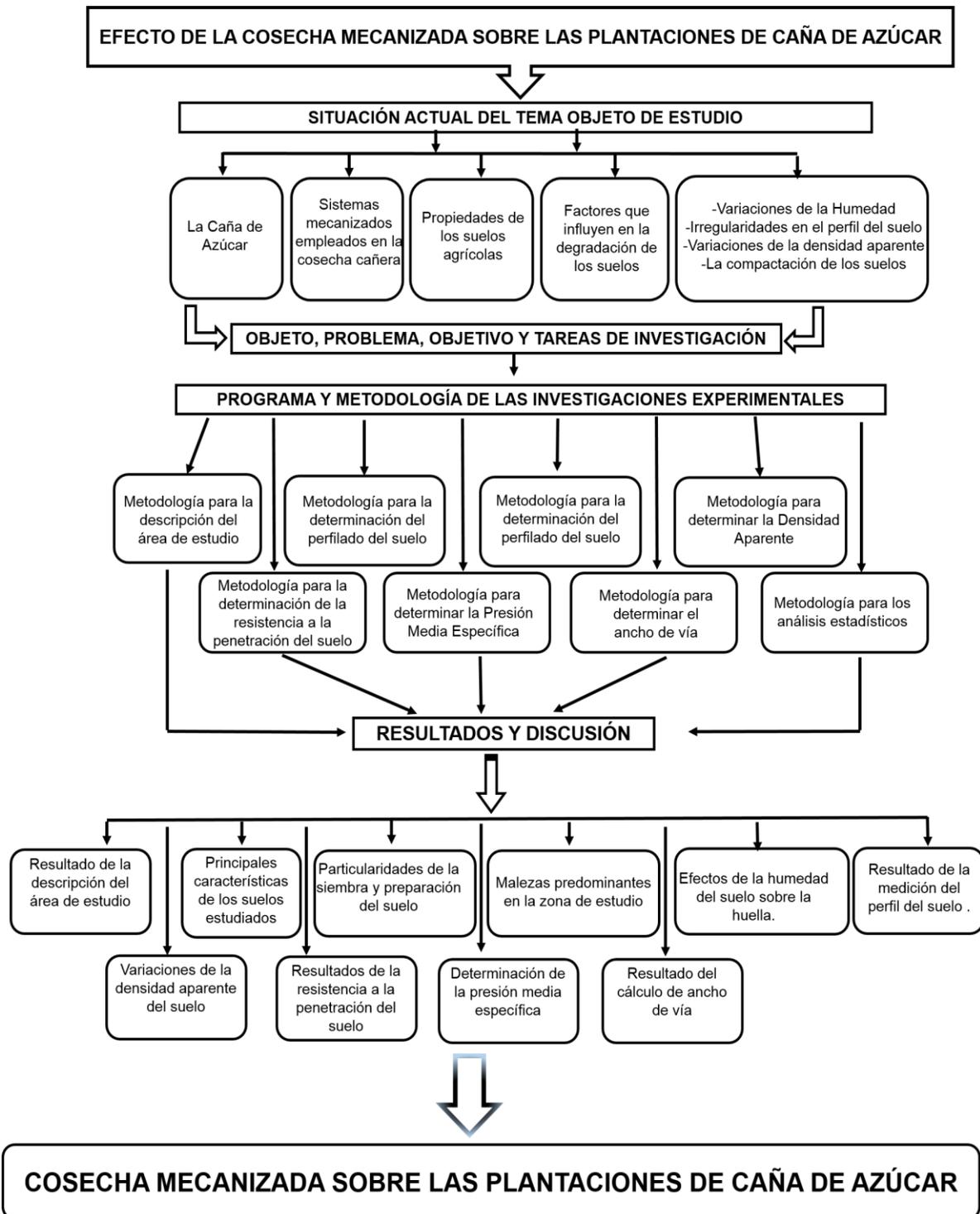
cosecha, es posible establecer el efecto del sistema de máquinas sobre el mismo empleadas en la cosecha de la caña de azúcar.

Objetivo general: Determinar los efectos sobre el suelo relacionados con el paso del sistema de máquinas durante la cosecha de la caña de azúcar en condiciones de alta humedad en la costa norte de la provincia de Villa Clara.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar los suelos y las tecnologías empleadas para la cosecha de la caña de azúcar en la UEB Héctor Rodríguez.
2. Obtener las variaciones de la humedad del suelo en función de la profundidad del mismo.
3. Determinar las variaciones del perfilado del suelo relacionados al paso de la maquinaria.
4. Determinar la densidad aparente y la resistencia del suelo respecto a la profundidad.
5. Realizar el cálculo del ancho de vía del autobasculante en correspondencia con el marco de siembra.
6. Esquema Lógico Estructural de la Investigación.

Esquema lógico estructural de la investigación



CAPÍTULO I

Revisión Bibliográfica

1.1 La caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), es un cultivo de elevada relevancia a nivel mundial. De sus tallos se extrae la sacarosa (Figura 1.1) que es uno de los principales suplidores energéticos en la alimentación humana. Su origen se ubica en Asia, más exactamente en países como India, Malasia y China. Fue llevada a otros países tropicales y subtropicales, por colonizadores y comerciantes (Rodríguez *et al.*, 2015).



Figura 1.1 Cultivo de la caña de azúcar.

Según Praveen y Vered, 2015 la caña de azúcar fue empleada por primera vez en el Sudeste Asiático y en la India Occidental como reemplazo del combustible fósil para vehículos a motor y es una antigua fuente de energía para los seres humanos. Es un recurso natural renovable, constituye una fuente de azúcar, biocombustible, fibra, fertilizante y muchos otros productos y subproducto con sustentabilidad ecológica. El jugo de la caña de azúcar es utilizado en la producción de azúcar. Los principales subproductos de la industria azucarera son el bagazo y las melazas (Acevedo *et al.*, 2015; Marzo *et al.*, 2019).

El cultivo de la caña de azúcar se desempeña bien en suelos sueltos, profundos y fértiles. Si se cuenta con riego podremos lograr mejores rendimientos que en suelos sin regar. Puede producirse también en suelos marginales como los

arenosos y suelos arcillosos con un buen drenaje. No se recomienda para suelos franco-limosos y limosos. Se adapta bien a los suelos con pH que va desde 4 a 8.3.

Uno de los cultivos de mayor producción en el mundo es la caña de azúcar, con una producción de 1.832 billones de toneladas métricas (Tm), equivalente a US\$ 57.85 billones de dólares aproximadamente. Los principales países productores son: Brasil 40%, India 20% y China 7%. Estos son capaces de abastecer más del 65% de la producción azúcar de caña mundial. El Caribe representa un 1.29% de la producción mundial y la República Dominicana aporta un 20.59% de la producción caribeña (Hasner *et al.*, 2019).

En los diferentes países donde se cultiva caña, los costos de la cosecha y transporte, representan aproximadamente entre 25% al 35% de los costos totales de producción. Cuba, Brasil y Australia son algunos de los países que han desarrollado modelos de gestión logística para el transporte de caña de azúcar ayudados con herramientas automatizadas y modelos matemáticos que les ha permitido disminuir los costos de cosecha. Estos modelos han sido desarrollados de acuerdo con las condiciones específicas de cada país y del ingenio, lo que dificulta su adopción inmediata en el ingenio de Barahona. Por tanto, es esencial desarrollar investigaciones y modelos de trabajo que mejoren la eficiencia del abastecimiento de caña en las condiciones y características propias de la zona azucarera del país, y sobre todo, con una aplicación práctica (Toohey *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018).

Las últimas previsiones de la Organización Internacional del Azúcar, ISO por las siglas en inglés, elevan la producción mundial de azúcar de caña en la campaña 2017/2018 hasta los 178.69 millones de toneladas cifra que supone un incremento del 6.22% en comparación con la previa cuando fueron 168.2 millones. Este dato es el más alto de la historia pese a la mala campaña de Brasil. Por lo que se refiere al consumo este vive un incremento del 1,62% pasando de los 170,7 millones a los 173,5 que anuncia ISO en las previsiones recientemente publicadas en los primeros días de marzo de 2018.

Según (FAO 2018) en los últimos diez años, la producción mundial de caña de azúcar ha aumentado considerablemente. Los principales países crecientes en la producción de caña de azúcar se encuentran Brasil, La India y China (Figura 1.2)



Figura 1.2 Principales países productores de caña de azúcar (FAO, 2018).

Según (Paraquat, 2015), En el mundo se cultiva aproximadamente 20 millones de hectáreas de caña de azúcar. Como es un cultivo tropical, la gran mayoría se cultiva en América Latina, India y el lejano Oriente. Muchos países en África cultivan individualmente pequeñas superficies. Brasil, India, China, Tailandia y Pakistán cultivan más de un millón de ha. La superficie en Brasil ha aumentado un 40% en la última década. Las áreas en India, Pakistán y Estados Unidos han permanecido bastante estables, pero la superficie de caña de azúcar en Cuba ha disminuido drásticamente en los últimos años.

Cuba tiene la capacidad industrial para producir 4 millones de toneladas de azúcar de caña. El país está haciendo importantes inversiones en el sector azucarero, sobre todo a través de la adquisición de tractores, cosechadoras, equipos y maquinaria especializada. Por otra parte, algunos ingenios azucareros están siendo reactivados. El sector se ha abierto gradualmente a la inversión extranjera; proceso que se inició con la autorización de una empresa conjunta de la

colaboración Cuba-Brasil para hacer funcionar el molino de azúcar del ingenio “Cinco de Septiembre” en la provincia de Cienfuegos (González, 2015).

1.2 Sistemas mecanizados empleados en la cosecha cañera

Actualmente en Cuba existe un parque de vehículos de transporte muy diversificado empleado en el traslado de la caña de azúcar desde el campo hasta los centrales azucareros. Cada tipo de transporte presenta características técnico-económicas muy particulares que bajo determinadas condiciones operativas y de explotación, hacen que su uso resulte imprescindible. Generalmente la caña se transporta de dos maneras hacia el central: “tiro directo” al basculador, con el empleo de equipos de transporte automotor (Figura 1.3) y el “tiro combinado” (intermodal). El sistema emplea los mismos equipos de transporte automotor para llevar la caña hasta los centros de acopio, donde se limpia de la paja, se carga en las casillas del ferrocarril, luego mediante el transporte ferroviario se lleva hasta el patio del central donde espera hasta ser procesada (López *et al.*, 2004).



Figura 1.3 Equipos de transporte automotor usados para el tiro directo al basculador.

Los sistemas de corte mecanizado (Figura 1.4) incluyen, a su vez, el sistema de transporte denominado tiro partido o trasbordo de caña (remolques o semirremolques autobasculantes tirados por el tractor para el transporte dentro del

campo y en camiones con remolques para el tiro hacia el basculador) por aportar en lo general los siguientes beneficios: reducción de los daños a los campos cañeros producto a la cosecha mecanizada, aumento a la productividad, disminución de los costos de la cosecha y mejora del material que va a la industria (Betancourt 2017).



Figura 1.4 Sistemas de Corte mecanizado.

Según Matos *et al.* (2014) después de haberse realizado un estudio sobre la explotación del complejo de máquinas que participan en el proceso cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar véase en la (Figura 1.5), se definen que las principales deficiencias que aún persisten en el trabajo de las mismas son:

- Deficiente organización de la composición racional del complejo de máquinas utilizadas en el proceso cosecha – transporte – recepción de la caña de azúcar.
- Bajo aprovechamiento de la jornada de trabajo de las cosechadoras y medios de transporte utilizados en la transportación de caña.
- Deficiente organización de la asistencia técnica ante las roturas de las cosechadoras y medios de transporte de caña.

-Explotación del complejo de máquinas que participan en el proceso cosecha – transporte – recepción en rendimientos agrícolas muy bajos, lo cual afecta el trabajo eficiente de las mismas.



Figura 1.5 Equipos que participan en la cosecha de la caña de azúcar.

La actividad denominada trasbordo es realizada por equipamientos que realizan el transporte intermedio desde las cosechadoras de caña hasta los camiones (Figura 1.6), subdividida en: recibimiento de materia prima de la cosechadora, transporte dentro de los campos y carga de los camiones con la caña picada. Estos equipos poseen diferentes capacidades, siendo los más comunes en Cuba de 8 a 12 toneladas de carga. El proceso de trasbordo fue creado para minimizar la compactación del suelo, y de esta forma, aumentar la productividad media (Martinez *et al.*, 2012; Rossi *et al.*, 2017; Aguilar-Rivera *et al.*, 2018).



(a)

(b)

Figura 1.6 Actividad denominada trasbordo (a) transporte intermedio junto a la cosechadora y (b) transporte intermedio junto a los camiones.

El semirremolque autobasculante (Figura. 1.7) fue diseñado para atender las más severas condiciones de trabajo en el trasbordo de caña picada. Con un proyecto de construcción simple, para facilitar las operaciones de mantenimiento y vigas estructurales dimensionadas para soportar cargas estáticas y dinámicas presenta alta robustez y tecnología destacándose dentro de los demás trasbordos disponibles en el mercado.



Figura 1.7 Semirremolque autobasculante fabricado en Cuba.

Las tecnologías de manejo de la producción de caña de azúcar han evolucionado en lo referente a máquinas, implementos y capacidad de carga de los transportes, lo que provoca compactación del suelo. La mecanización de la cosecha afecta la producción, duración del cultivo y propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Se señala que el crecimiento de las raíces lo determinan cuatro factores fundamentales: resistencia mecánica, disponibilidad de agua, oxígeno y energía, precisando que las propiedades asociadas son la resistencia a la penetración, el potencial de agua, la aireación y la temperatura, respectivamente (García *et al.*, 2010).

El corte mecanizado integral de la caña de azúcar está en función de las siguientes variables: diseño de campo, atributos de las variedades, la máquina cosechadora, el operario de la máquina, el mantenimiento de la máquina y la logística del corte y del transporte. En la medida que se logre una buena integración de las variables anotadas se puede alcanzar el éxito de la cosecha mecanizada (Mantilla, 2010).

Según Galvis (2010) entre las desventajas de la cosecha integral, se puede señalar que, por las características de los equipos que participan en las operaciones de cosecha, existen mayores posibilidades de afectar los cañaverales, aumentando los problemas de compactación, los riesgos de daño a las cepas y la probabilidad de una menor longevidad del cañaveral. Así mismo, este sistema tiene mayores exigencias en cuanto a las dimensiones y a la sistematización de los campos que el sistema semi-mecánico, surgiendo limitaciones para el uso de las cosechadoras en campos pequeños, de dimensiones irregulares, cañaverales dispersos y en lotes de relieve accidentado o pendientes elevadas.

Los medios de transporte constituyen un eslabón de vital importancia en la cadena de cosecha, transporte y recepción de la caña de azúcar. La organización de estos eslabones facilita el aumento de la productividad del sistema de transporte. El transporte de caña por ferrocarril (Figura 1.8), constituye una variante económica

importante, tanto en República Dominicana como para Cuba quienes emplean los denominados carros jaula para el transporte de la caña. Los carros tienen una capacidad de 5 a 9 toneladas y su velocidad de traslación es inferior a los 60 km/h (Martin, 2013).



Figura 1.8 Transporte ferroviario.

Según Franco *et al.* (2009) la diferencia entre la distancia de siembra y las trochas provoca el pisoteo de la hilera de caña en el momento de la cosecha mecanizada, ya que se triplica el tráfico en comparación con un sistema de cosecha manual con alce mecanizado. Estudios realizados en Colombia indican que el tráfico de maquinaria agrícola sobre la cepa puede producir una disminución de la productividad de caña del 21 al 25%.

Según Matos *et al.* (2014) el tráfico de máquinas agrícolas modifica la condición del suelo, aumenta la densidad, disminuye el diámetro medio ponderado de los agregados y la macro porosidad en el entresurco con relación a la línea de plantío y esto, causa degradación acumulativa de la calidad del suelo a través del tiempo.

Según Braunack y Macgarry (2006) la intensidad de tráfico (IT) es un parámetro adecuado para definir la distribución del tráfico sobre el campo. En la actualidad se puede utilizar el sistema de información geográfica para su determinación precisa,

es útil para comparar sistemas de mecanización o cosecha y sus posibles efectos en la productividad. En el cultivo de la caña los problemas de compactación se magnifican durante la cosecha por la alta intensidad de tráfico que demanda la labor y por el tránsito directo sobre la cepa (pisoteo).

La principal causa de compactación en suelos agrícolas es el tráfico de máquinas y equipos durante las labores de cultivo y las operaciones de cosecha en especial cuando se realizan en suelos húmedos con altas presiones sobre el área de contacto suelo-llanta (Figura 1.9). La cuantificación de los efectos del tráfico usualmente incluye peso de vehículos e implementos, distancia recorrida, presión de contacto, área cubierta por llantas u orugas y número de pases. En la cosecha de caña son importantes las cargas que se desplazan y las presiones de contacto, ambos factores definen la compactación en el perfil del suelo y son las influencias dominantes en términos del daño potencial porque determinan el nivel inicial de esfuerzos en la superficie, mientras que la carga por llanta define la tasa de disminución de los esfuerzos con respecto a la profundidad (Rodríguez y Valencia, 2012).



Figura 1.9 Tractor Maxxum CASE IH traficando con exceso de humedad.

Las cosechadoras de caña CASE IH 8800 (Figura 1.10), agrega toda la confiabilidad de más de 25 años de la cosechadoras de la serie 7000. Estas

máquinas son superiores a las anteriores, ya que poseen: Nuevo motor garantizando un torque elevado y bajo consumo de combustible, sistema de refrigeración constituido por un paquete de radiadores compuesto por radiador de líquido refrigerante, de aceite hidráulico y un condensador de aire acondicionado. El picador permite una cosecha con mayor velocidad. La cabina permite que el operador controle la dirección y la transmisión electrónicamente. Mejoras en sistemas de alimentación con un nuevo ángulo de los tambores flotantes que minimiza la posibilidad de pérdidas en cosecha. Aumento de la altura de corte del corta cogollo en 0,4 m; largo de la cosechadora en 3,4 m; la distancia entre los sinfines exteriores en 0,4 m (Placeres, 2015).



(a)

(b)

Figura 1.10 (a) Cosechadora de caña CASE IH 8800 y (b) autobasculante tirado por el Tractor Maxxum Case IH 150.

Las ventajas operativas de las cosechadoras disponibles permiten una mejor planificación y organización de la zafra, una operación más eficiente de cosecha y una entrega adecuada de caña al ingenio. Dichas cosechadoras contribuyen a la mejora de la calidad de la materia prima por una significativa reducción de mejoras de materias extrañas (pajas), y una menor pérdida de azúcar por el hecho de procesar caña fresca. También es importante destacar que las nuevas cosechadoras son capaces de dejar una mínima cantidad de caña en el campo y

se evidencian mejoras en la eficiencia y costo del transporte, ya que la caña en trozos ocupa menos espacio que la caña larga y por lo tanto se incrementa la capacidad de carga de los equipos de transporte (Rodríguez *et al.*, 2002).

1.3 Propiedades de los suelos agrícolas

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas (De Benedetto *et al.*, 2017). Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos. Los agricultores han tenido que desarrollar métodos para prevenir la alteración perjudicial del suelo debido al cultivo excesivo y para reconstruir suelos que ya han sido alterados con graves daños (Fundora y Cairo, 2005; Zheng *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2018).

El suelo posee cierta capacidad para permitir el paso de la maquinaria agrícola causando la menor compactación según González *et al.* (2013) para conocer esta capacidad se hace necesario hacer un estudio del comportamiento de su resistencia mecánica, lo cual se determina estudiando el comportamiento de sus propiedades físico–mecánicas, caracterizadas internacionalmente por:

- El índice de cono para los diferentes estados estructurales y de humedad.
- Coeficiente Volumétrico de Resistencia a Compresión o el aplastamiento para los diferentes estados estructurales y de humedad.
- Estado estructural del suelo, caracterizado por su densidad aparente.
- El contenido de agua o humedad en los poros del suelo.
- La cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo, en las condiciones de alta humedad.

- La capacidad de compactación ante diferentes esfuerzos (energías) y condiciones de humedad.

Según Franco *et al.* (2009) la caña de azúcar es un cultivo poco exigente en cuanto a suelos, tolera bien y se ha cultivado económicamente tanto en suelos muy pesados o arcillosos, como en muy ligeros o arenosos. Sus exigencias respecto a suelos se limitan a profundidad, la necesaria para desarrollar su sistema radicular, alrededor de un metro; aireación suficiente, por lo que deben evitarse los problemas de drenaje tanto interno como superficial; pH, valores que no se alejen demasiado de la neutralidad, aunque suele tolerar desde 4 hasta 10; salinidad y/o alcalinidad, no muy elevada, aun cuando hay diferencias bastantes marcadas entre variedades.

Según Muelas (2010) lo más importante en relación al suelo cañero es su manejo. El manejo debe adecuarse a las condiciones requeridas por el cultivo y a las características físicas químicas y biológicas que cada suelo presenta, que lo hace un complejo activo, al cual hay que considerar más como material viviente que como materia inerte. Ese manejo, en consecuencia, debe orientarse básicamente hacia el logro de cambios favorables a su desarrollo y productividad del cultivo, a la conservación y posible mejora de las propiedades del suelo mediante:

- Conservación y posible mejora de su estructura.
- Conservación y posible mejora de su fertilidad y contenido de materia orgánica.
- Evitar los procesos de degradación del suelo erosión, salinidad y de alcalinidad.

Los suelos cañeros además, propician el crecimiento de plantas las cuales se consideran malezas. (Páez *et al.*, 2006). Estas son especies no deseadas por el hombre, ya que en determinados momentos compiten por agua, luz, nutrientes y espacio físico con plantas cultivadas, afectan el rendimiento y la calidad de los cultivos. Pueden actuar como huéspedes de plagas, enfermedades y nemátodos y pueden dificultar la cosecha en algunos casos. Esto hace que su control se halla

transformado en una práctica agronómica imprescindible (Otero, 2009; Rossi *et al.*, 2017; Aguilar-Rivera *et al.*, 2018; Gabiri *et al.*, 2018).

Las malezas en la agricultura causan pérdidas considerables a nivel mundial, mermando los rendimientos de un gran número de cultivos. Dichas plantas reducen la superficie del suelo apta para el cultivo y dificultan las labores (Núñez, 2011).

1.4 Factores que influyen en la degradación de los suelos cañeros

1.4.1 Variaciones de la humedad

Según Angelone *et al.* (2003) la humedad del suelo es una variable clave en muchas investigaciones agrícolas, hidrológicas y meteorológicas. En la agricultura con un conocimiento previo de las condiciones de dicho factor se puede establecer la frecuencia de riego, obtener una adecuada producción de cultivos y un buen tratamiento químico. En otros aspectos investigativos la humedad está vinculada con el control de intercambio de agua y energía entre la superficie del suelo y la atmósfera mediante la evaporación y la transpiración.

Típicamente, la humedad puede calcularse mediante estimaciones puntuales, sensoramiento remoto o mediante modelos de simulación. Cada uno de estos métodos tiene aparejados algunos inconvenientes, ya sea en cuanto a la exactitud y precisión de las estimaciones o en cuanto a la escala en espacio tiempo de las mismas, elementos estos poco conciliables. Esto ha conducido al empleo de técnicas de asimilación de datos en la hidrología, dirigida a una estimación “óptima” de la variable de estado mediante una combinación de la información proveniente de distintas fuentes (Hernández y Medina, 2012).

Según Rodríguez (1999) existe una estrecha relación entre la humedad y la compactación que tiene el suelo en el momento del tráfico. Sucede que la gran mayoría de los trabajos mecanizados en la agricultura se realizan cuando el suelo tiene la humedad cercana a la más factible para compactarlo. Es común asociar la compactación en alta humedad a las profundas huellas dejadas en el terreno

húmedo. Se considera que en realidad lo que ocurre fue una falla, enterrándose en ocasiones la capa vegetal que está bajo el rodaje y levantando las capas superiores del subsuelo. Este fenómeno trae consigo una ligera destrucción en el perfil de la superficie del cantero establecido para el cultivo y causando daños mecánicos al sistema radicular, lo cual puede resultar tan o más perjudicial como la propia compactación, pero son fenómenos diferentes.

La humedad del suelo es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimiento de potencia en la preparación del suelo. Los suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua aumenta, aumentando entonces la adhesión de las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción (Camacho y Gonzalo, 2006).

Según Chicas *et al.* (2014) existen tres variables de predicción para estimar la humedad, tales como: las fracciones texturales, la densidad aparente y ocasionalmente la materia orgánica. Se afirma también que los porcentajes de varianza explicada por las ecuaciones de regresión son siempre altos y que la bondad de las estimaciones, en términos de error medio y de raíz del error cuadrático medio ha sido muy satisfactoria.

El papel más importante en la eliminación del exceso de agua lo tiene la evaporación y la evapotranspiración, haciendo muy lenta la pérdida de humedad del suelo, llegando en ocasiones a superar los 30 días el suelo húmedo. Estas características traen consigo un drenaje deficiente, inadecuada aireación, así como mala estructura y agregación. Siendo la humedad y el mal drenaje en los suelos limitantes para la mecanización, cuando el suelo se humedece disminuye su resistencia mecánica (Placeres, 2015).

1.4.2 Irregularidades en el perfil del suelo

El perfil del suelo es el reflejo objetivo de su formación, sintetiza su historia. Abarca la sección transversal de un corte desde la superficie hasta la roca subyacente y sus capas se denominan horizontes (Figura 1.11). Los horizontes situados encima del material originario (horizonte C) se designan por la palabra latina solum. Cada suelo bien desarrollado, completo, no metamorfoseado, tiene sus características particulares de perfil, las cuales se utilizan para clasificarlo y su reconocimiento es de gran importancia práctica. Las capas superiores del perfil de un suelo contienen generalmente considerablemente porcentajes de materia orgánica y su color está oscurecido de manera apreciable, a causa de tal acumulación. Las capas así caracterizadas son las más convenientes para el cultivo por ser la zona de mayor acumulación de materia orgánica (Fundora y Cairo, 2005).



Figura 1.11 Sección transversal de un perfil de suelo.

Las propiedades físicas del suelo que intervienen en mayor medida en la erosión hídrica del suelo se suelen agrupar en tres categorías diferentes: a) la capacidad de la superficie y el conjunto del perfil para infiltrar agua de lluvia e impedir la formación de excedentes hídricos, b) la capacidad de la superficie del suelo para

almacenar agua, en las depresiones de mayores o menores dimensiones que se forman sobre la misma y c) la estabilidad de las partículas del suelo, o susceptibilidad al desprendimiento de las mismas, que sólo interviene una vez que se forma una lámina de agua sobre la superficie (Vidal y Paz, 2003).

Según Cruz *et al.* (2015) el perfil del suelo se define como la desviación típica de las elevaciones superficiales del suelo, considerando los cambios debidos a la pendiente del terreno, y las huellas que puedan dejar los neumáticos de las máquinas y ciertos implementos de laboreo. Esto adquiere gran importancia ya que es uno de los parámetros que da la posibilidad de determinar la forma que toma el suelo, luego que sobre él actúa la fuerza de los neumáticos u órganos de trabajo de las diferentes máquinas agrícolas durante el laboreo. Además permite a los diseñadores de máquinas e implementos agrícolas, conocer las características del suelo y poder realizar un diseño óptimo, adecuado que cumpla con los requisitos agrotecnológicos.

El microrrelieve del suelo escala de milímetros a centímetros, puede llegar a cambiar rápidamente, debido a procesos erosivos. De esta forma, en los suelos agrícolas la microtopografía de superficie se altera debido a las operaciones de laboreo, el tránsito de ganado, la compactación, la erosión y deposición de la lluvia y el viento. Los ciclos de humedad, sequía, representan factores que pueden también alterar dicha propiedad. Por otra parte los procesos y cambios que ocurren en la microtopografía del suelo, son los principales factores para determinar la influencia de la remoción y transporte del suelo, así como su deposición. Otros procesos que afectan la microtopografía del suelo son la infiltración, la retención de agua, el intercambio gaseoso, la evaporación y el flujo de calor (García, 2006).

El perfil del suelo, incluye el conjunto de todos los horizontes genéticos, las capas orgánicas sobre la superficie, y el material madre u otras capas debajo del "solum", que influyen en la génesis y en el comportamiento del suelo. Aparte de los horizontes genéticos, muchos suelos tienen capas heredadas de un material madre estratificado; es el caso de perfiles que tienen características debidas no

sólo a los procesos de formación del suelo, sino heredados de un material madre, como es el caso de una terraza aluvial, o incluso debidas en parte a procesos geológicos que acompañan la formación del suelo. Así, un suelo con un perfil bien desarrollado, puede ser gradualmente cubierto con ceniza volcánica, loess, arena transportada por viento, por ejemplo, sin afectar seriamente la vegetación; el horizonte superficial se va engrosando y la parte inferior del perfil va quedando gradualmente fuera del alcance de los procesos activos de formación del suelo (Hernández, 2007).

1.4.3 Variaciones de la densidad aparente

La densidad es una propiedad del suelo ampliamente utilizada en la agricultura relacionada principalmente con las prácticas de manejo de los suelos y las aguas. Recientemente ha aumentado la preocupación respecto a la determinación y exactitud en su medición, debido al incremento del uso de irrigación, de tierras cultivadas sin labranza y a la compactación de suelo. La densidad es la característica que en mayor grado influye sobre la productividad de los cultivos, debido a su estrecha relación con otras propiedades del suelo (Salamanca y Sadeghian, 2005).

Según Alvarado y Forsythe (2005) la densidad de partículas (ρ_p), también conocida como densidad real y densidad mineral, definida como la relación entre la masa de suelo y el volumen de sólidos del suelo ($\rho_p = m_s/V_s$) y la densidad aparente (ρ_a) definida como la relación de la masa de suelo y el volumen total o sea el volumen de partículas más el espacio entre ellas ($\rho_a = m_s/V_t$). La ρ_a se utiliza principalmente para calcular la porosidad total del suelo y por ende en estudios de relación suelo-agua, aunque también se emplea para la interpretación de análisis de laboratorio para el campo.

Según Fundora y Cairo (2005) la densidad es una propiedad fundamental del peso del suelo muy vinculada a otras propiedades físicas, sin la cual no sería posible su interpretación. Hay dos tipos de densidades: la densidad real, densidad de los sólidos o peso específico y la densidad aparente o densidad de volumen. El peso

de los sólidos del suelo ha sido expresado a menudo en términos de su peso específico, también se define como la masa (o peso) de una unidad de volumen de sólidos del suelo, y es llamada densidad de la partícula. Densidad aparente o densidad de volumen: es un segundo y diferente método de expresar el peso de un suelo. En este caso se calcula el volumen total del mismo (espacio ocupado por los sólidos y los espacios de los poros conjuntamente).

Según Rubio (2010) existen diversos métodos para determinar la densidad aparente del suelo. El método del cilindro metálico es el más sencillo de ellos, pero tiene como principal inconveniente la presencia de piedras, por lo que solo puede utilizarse adecuadamente en suelos poco pedregosos. Asimismo cuando se toman muestras superficiales con una barrena que contiene los cilindros se corre el riesgo de compactar el suelo por la adherencia del mismo al deslizarse sobre las paredes de los cilindros. El método del terrón tiene como principal inconveniente que no puede precisar el volumen de las grietas y de los huecos interpedales. Es también difícil de usar en suelos con alto contenido de materiales gruesos (gravas y piedras). El método de excavación y determinación el volumen extraído tiene varias ventajas respecto a los anteriores según sus autores, ya que en suelos pedregosos sus resultados son similares a otros métodos de excavación/relleno (por ejemplo con arena o agua) y mejores que los obtenidos por el método del cilindro.

Los factores que mayor influencia tienen sobre la densidad del suelo son: contenido de materia orgánica, textura del suelo, estructura, uso y manejo. Contenidos altos de materia orgánica, el suelo adquiere una mejor estructura y los valores de la densidad disminuyen, lo que favorecen el comportamiento agrícola. Se ha encontrado una correlación significativa entre la materia orgánica y la densidad de volumen (0.73) en suelos tropicales evolucionados. Los valores altos de densidad en general significan altos niveles de compactación producto del empaquetamiento de los agregados del suelo, lo que ofrece una fuerte resistencia a la penetración de las raíces (Martín y Durán, 2011).

1.4.4 La compactación de los suelos

La compactación en los suelos agrícolas es un problema que conlleva a la utilización de energía en las labores, alto consumo de recursos y la degradación del suelo haciendo que se pierdan sus propiedades y así mismo obteniéndose bajas tasas de rendimiento en la producción. La compactación del suelo ocurre cuando se aplica presión o carga a la superficie del mismo, como resultado de pisoteo de animales, personas y la inadecuada utilización de equipos como tractores especialmente cuando el suelo está húmedo. La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración, la densidad aparente y reduciendo la porosidad (Demuner *et al.*, 2013).

El estudio de las propiedades físicas del suelo tiene un papel preponderante en la caracterización de su productividad. 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. 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 (Henrriquez *et al.*, 2011).

Agafanov y Alonzo (1993) plantean que aunque el corte mecanizado produce una ligera compresión del horizonte superficial, aun así queda a un nivel satisfactorio. Señala Fonseca (1982) que cuando aumenta la humedad del suelo y la cantidad de pases de los equipos, la compactación asciende; sin embargo, hasta cierto punto, el suelo seco no se comprime fácilmente. Sin embargo, Fernandez *et al.* (1992) señalan que la mecanización del corte de la caña puede compactar el 20 por ciento del área total del campo, ocasionando pérdidas de hasta tres toneladas de azúcar por ha. En este sentido, Rodrigues y Valencia (2012) refieren que en Cuba el 24% de la superficie agrícola presenta afectaciones por compactación y citan como una de sus causas en los suelos cañeros la mecanización total,

mediante el uso de equipos pesados, de las operaciones de cosecha y transporte, sobre todo cuando se realizan en condiciones de alta humedad.

Según Prieto (2010) las principales consecuencias de la compactación sobre los cultivos es el deterioro general de las plantaciones y la limitación de la funcionalidad y la capacidad de absorción de nutrimentos por las raíces, debido fundamentalmente a:

- Disminución de la porosidad y por ende de la disponibilidad del oxígeno y la capacidad de retención de humedad.
- Decrecimiento de la velocidad de la infiltración favoreciéndose el proceso de reducción y anaerobiosis.
- Formación de capas u horizontes que dificultan la penetración y proliferación de las raíces.

La compactación de los campos de cañas está vinculada con la caída acelerada de la producción de una cepa a la otra. No existen métodos apropiados para la descompactación de los suelos cañeros que garanticen una respuesta sistemática al mantenimiento de los rendimientos, aún en cepas viejas. Según criterio de los productores de caña, la no respuesta a las aplicaciones de fertilizantes está en relación directa con el estado físico del suelo, donde es probable que como consecuencia de la compactación los suelos hayan alcanzado su densidad crítica (Fundora y Cairo, 2005).

Referido a la compactación del suelo originada por el paso de la maquinaria agrícola, se plantea que el cálculo de la distribución de presiones en el suelo es una función de: carga en las ruedas, presiones de inflado y condiciones del suelo. El campo de tensiones bajo un tractor, tráiler o implemento con neumáticos depende de la cantidad de carga, el tamaño del área de contacto entre el neumático y el suelo, y la distribución de la presión superficial dentro del área de contacto, así como de la naturaleza del suelo, su contenido de humedad y densidad (Delgado, 2004).

Según Herrera *et al.* (2009) entre los factores provocantes de degradación física del suelo se encuentra la compactación, la cual ha sido considerada como la principal causa de degradación del suelo. La compactación del suelo provoca disminución de los rendimientos agrícolas, mayores requerimientos energéticos en labranzas y labores culturales, necesidades de resiembras, mayores dosis de agroquímicos y número de pasadas de los equipos, necesidades crecientes de fertilizantes e ineficiencia en el uso de la maquinaria. La compactación del suelo no siempre es perjudicial; durante la siembra es necesario una cierta compactación del suelo para que la semilla tenga un contacto adecuado con este, facilitando el acceso de la raíz al aire y nutrientes del suelo.

Las principales propiedades que interactúan sobre la resistencia a la penetración son el contenido de humedad, la velocidad de secado, el manejo y las propiedades intrínsecas del suelo. Las pérdidas de agua originan un acercamiento entre las partículas del suelo, el cual será mayor mientras más rápido sea el secado. Consecuentemente se incrementa la resistencia del suelo a la penetración. El aumento de la resistencia superficial del suelo originado en aumentos en densidad aparente por compactación o por deshidratación, restringe fuertemente el crecimiento radicular y la fuerza que puede ejercer el extremo distal de la raíz en dirección axial puede llegar hasta 1.000 KPa (Kaplán *et al.*, 2012).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Metodología para la descripción del área de estudio

Para caracterizar el área de estudio se realizaron visitas dirigidas a observar los diferentes aspectos de la actividad productiva de tres unidades de producción de caña (UBPC), de la UEB Héctor Rodríguez. Se consultó la información archivada en la empresa respecto a las actividades productivas y la ubicación geográfica del área objeto de estudio. Se identificó la estructura de las UBPC así como las principales características de los suelos predominantes. Se realizaron visitas a las diferentes áreas de estudio donde se tomaron muestras de malezas encontradas. Los equipos que participaron en la cosecha de la caña en las zonas evaluadas fueron la cosechadora CASE IH 8 800 y el Autobasculante tirado por el Tractor Maxxum Case IH 150 que se muestran en la (Figura 2.1).



Figura 2.1 Equipos participantes en la cosecha (cosechadora CASE IH 8 800 y el Autobasculante tirado por el Tractor Maxxum Case IH 150).

2.2 Metodología para la determinación de la humedad del suelo

La humedad en base al suelo seco (hbss) %, se determinó por el método Gravimétrico. Se tomaron varias muestras de suelo con una profundidad de 10 cm hasta los 30 cm en el centro del surco y del espacio entre hileras previo a la cosecha. El tratamiento de las muestras en el laboratorio se realizó conforme a la

NC 3447-2003 (Figura 2.2), secando en la estufa todas las muestras tomadas a una temperatura constante de 105 °C, durante 24 h. Se enfriaron las muestras en una desecadora durante 20 min, a partir de lo cual las muestras se pesaron cada dos horas hasta alcanzar una masa constante. El pesaje de las muestras antes y después del secado se realizó con una balanza de precisión $\pm 0,1$ g.

El valor de la humedad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\omega = (P1 - P2 / P2 - T) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

ω - es el contenido de humedad respecto a la masa seca, en %hbss

P1 - es la masa húmeda más la masa del recipiente (pesafiltro), en g;

P2 - es la masa seca más la masa del recipiente, en g;

T - es la masa del recipiente (tara), en g.



Figura 2.2 Determinación de la masa de suelo en el laboratorio.

2.3 Metodología para determinar la presión media específica

En esta investigación se define como Condiciones Normales de Trabajo (CNT) a aquellas donde el semirremolque pone en contacto con el suelo toda el área de apoyo de los neumáticos, según diseño; y Condiciones Reales (CR) donde ocurre lo contrario, es decir solo una parte de la superficie de apoyo del neumático se

pone en contacto con el suelo. En esta evaluación se realizó un análisis considerando el peso total del autobasculante.

La presión media específica para condiciones normales (P_n) fue determinada utilizando la siguiente expresión:

$$P_n = \frac{W_n}{A_n} \quad (4)$$

Dónde: W_n , Peso o carga sobre el neumático (kN) y A_n , Área de contacto del neumático con el suelo en condiciones normales, m^2 .

Para la determinación de A_n se emplearon las expresiones siguientes propuestas por Sánchez (1996):

$$A_n = b_n * l \quad (5)$$

Siendo: b_n ancho de la huella, m; para condiciones normales de trabajo, la cual está en relación con el ancho constructivo del neumático (bc), se halla como:

$$b_n = bc * 0.87 \quad (6)$$

El valor de l , ancho de la huella en condiciones normales de trabajo, m; se determina como:

$$l = 2 * \sqrt{\delta(dc - \delta)^2} \quad (7)$$

Dónde: δ , Deformación del neumático, m; considerando una deformación del 20% respecto a la altura del neumático (h), entonces:

$$\Delta = 0.2 * h \quad (8)$$

Hallándose h por la expresión:

$$h = \frac{d_c - d_i}{2} \quad (9)$$

Siendo: d_c y d_i , Diámetros exterior e interior del neumático, m.

La presión media específica para condiciones reales (P_r) fue determinada utilizando la misma expresión (2), pero en este caso:

$$P_r = \frac{W_n}{A_r} \quad (10)$$

Dónde: A_r , Área real de contacto del neumático con el suelo, m^2 .

El área real se determinó midiendo el ancho y la longitud de contacto del neumático sobre el cantero in situ, con cinta métrica de apreciación 1mm.

2.4 Metodología para la determinación del perfilado del suelo

La variación del perfilado del suelo se determinó antes y después del paso de la maquinaria, utilizando un nivel de burbuja y el perfilómetro con divisiones en el plano horizontal cada 5 cm (Figura 2.3) y apreciación en la medición en el plano vertical de 1 mm. Las evaluaciones se realizaron en un ancho total de 3,20 m, es decir de centro a centro de espacio entre hileras. Se tuvo en cuenta realizar tres o cinco pruebas de perfilometría por campo a no menos de 20 m de los bordes de los campos para evitar las áreas con mayores afectaciones causadas por el viraje y el tráfico de la maquinaria durante la cosecha. Se evaluaron además los daños relacionados con el tránsito de camiones y remolques dentro del campo en función del desprendimiento del suelo y patinaje.



Figura 2.3 Determinación de la variación del perfil del suelo.

2.5 Metodología para la determinación de la densidad aparente

Se utilizó el método del Cilindro Biselado (Figura 2.4). Se tomaron varias muestras de suelo en el centro del surco y en el centro del espacio entre hileras antes y después del paso de la maquinaria, a profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm utilizando para ello un cilindro de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro.

Se procedió al secado de las muestras mediante una estufa a una temperatura constante de 105 °C, determinándose su masa con la utilización de una balanza con valor de división no mayor que 0,1 g hasta obtener valores constantes de las masas de suelo.

La densidad aparente del suelo se calculó a través de la expresión:

$$Da = Gn / Vc \quad (2)$$

Dónde:

Da: Densidad aparente del suelo, (g/cm³)

Gn: Masa de la muestra del suelo después de secada, (g)

Vc: Volumen del cilindro para la toma de muestra, (cm³)



Figura 2.4 Determinación de la densidad aparente.

Por su parte la porosidad se determinó en función de la densidad aparente mediante la ecuación:

$$P = 100 (1 - da/dr) \% \quad (2)$$

Siendo da y dr los valores de densidad aparente y real respectivamente y P el porcentaje de huecos del suelo u horizonte considerado.

2.6 Metodología para la determinación de la resistencia a la penetración del suelo

La resistencia a la penetración del suelo se determinó mediante un análisis de penetrometría (Figura 2.5), efectuándose en dos sitios: centro del surco y el centro del espacio entre hileras, hasta alcanzar una profundidad de 30 cm, en capas de 10 cm, tomándose cinco puntos como referencia dentro del campo y realizando tres mediciones en cada uno, antes y después del paso de la maquinaria.

Se utilizó un penetrómetro de impacto y punta normalizada (ASAE S313,3 FEB04), con masa del martinete de 1 kg, diámetro de la base del cono de 12,83 mm y punta cónica de 30 grados, Se empleó una regla de aluminio de 1 500 mm y precisión 1 mm para registrar la penetración del cono en el suelo respecto al número de golpes.



Figura 2.5 Determinación de la compactación.

Las lecturas de resistencia obtenidas en impactos se transformaron al Sistema Internacional de Medidas por la fórmula siguiente (Smith, 1998).

$$Re = m^2 \cdot h \cdot g / (m + u) \cdot (e \cdot a)1000 \quad (3)$$

Dónde:

Re = Resistencia del suelo (kPa)

m = Peso del mazo (kg)

h = Recorrido del mazo (m)

g = Gravedad (9.81 m/seg²)

u = Peso del varillaje (kg)

e = Avance promedio/impacto (m)

a = Área de cono (m)

2.7 Metodología para determinar el ancho de vía

La distancia que sobrepasa el neumático del semirremolque en la franja de seguridad (D) (Figura 2.6) se determinó partiendo de las dimensiones del sistema de rodaje del autobasculante, ancho de vía (B) y ancho del neumático (b), número de hileras que se ubican debajo del semirremolque (n), una en este caso; y los parámetros vinculados a la plantación en cantero, distancia de plantación (M) de 1,60 m y franja de seguridad exterior (C_{ext}) de 0,40 m; se tiene que:

$$D = C_{ext} + \left[\frac{(B + b) - M(n + 1)}{2} \right] \quad (11)$$

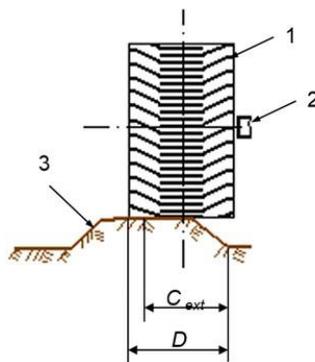


Figura 2.6. Distancia que sobrepasa el neumático del semirremolque (D) en la franja de seguridad (C_{ext}). 1- Neumático, 2-Eje y 3-Superficie acanterada.

Para el cálculo del ancho de vía máximo posible para el semirremolque se emplea la expresión propuesta por Chudakov (1977); considerando que la caña de azúcar

tiene una zona o franja de seguridad de 0,40 m y está plantada a 1,60 m de distancia entre hileras.

$$B = M(n+1) - 2C_{ext} - b \quad (12)$$

Dónde:

M-Distancia entre surcos, m;

n-Número de surcos bajo el semirremolque;

C_{ext} -Zona de protección exterior de la planta, m;

b- Ancho del neumático, m.

2.8 Metodología para los análisis estadísticos

Se empleó el tabulador profesional Microsoft Excel para realizar la tabulación, el manejo de los datos así como los análisis de frecuencia, el promedio y las desviaciones de las mediciones realizadas. Se emplearon además las facilidades de dicho sistema para realizar los gráficos y tablas correspondientes.

El tamaño de la muestra de las variables en estudio y los datos obtenidos en los diferentes experimentos se procesó mediante el empleo del paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1. Realizando un análisis de regresión para determinar el modelo de mejor ajuste en la descripción de la deformación de la altura del cantero (DAC) en función de la humedad del suelo (H) para la profundidad evaluada (0-30cm), considerando a DAC como variable dependiente y la humedad como variable independiente.

Se utilizó la prueba t-Students para muestras independientes como criterio para estimar las diferencias entre las medias muestrales, a un 95% de probabilidad, en la evaluación de la resistencia a la penetración y la densidad aparente antes y después del paso del autobasculante sobre el cantero.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Descripción del área de estudio

El estudio se desarrolló en la UEB Héctor Rodríguez en tres unidades de producción de caña (UBPC Carlos Perera, Antonio Bacallao, Monte Lucas,) situadas en el macizo cañero de la costa norte de la Empresa Azucarera Villa Clara, véase en la (Figura 3.1). La UEB Héctor Rodríguez limita al norte con la zona costera de Villa Clara, al sur con la UEB “George Washington” al oeste con la UEB “Panchito Gómez Toro” y al este con la UEB “Abel Santamaría”. Estructuralmente cuenta con 12 UBPC, el Banco de Semilla Registrada, 3 CPA y 2 CCS que totalizan una superficie cañera de 14 802,40 ha distribuidas en bloques atípicos en su mayoría. Los pelotones están compuestos por 2 cosechadoras, 4 tractores de trasbordo y 4 semirremolques autobasculantes.

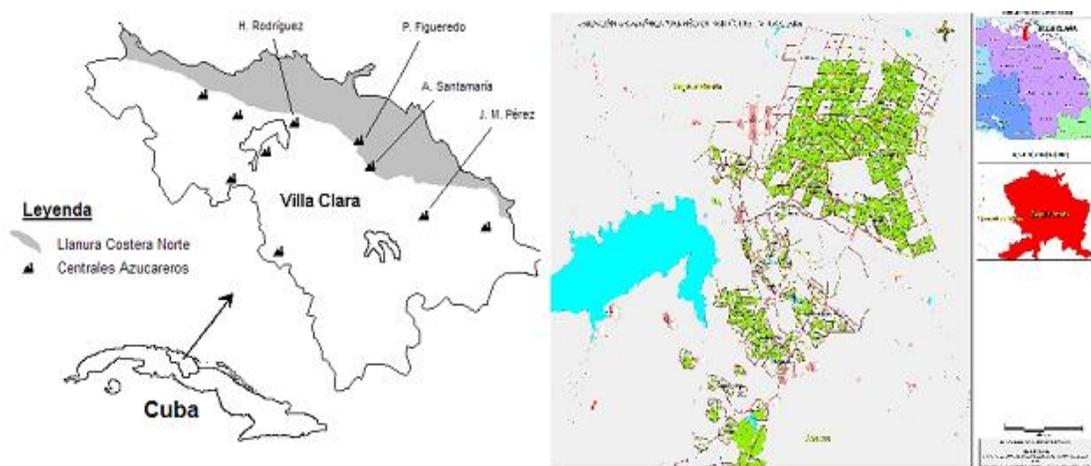


Figura 3.1 Ubicación geográfica de la UEB Héctor Rodríguez.

3.2 Principales características de los suelos estudiados

La zona en estudio se distingue por suelos llanos con pendientes inferiores al 2%. Los estudios se realizaron en plantaciones de caña de secano, fundamentalmente en cepas de primavera quedada y soca, en diferentes agrupamientos de suelos. En la tabla 3.1 se puede observar que a pesar de la UBPC C. Perera contar con

menor cantidad de área destina al cultivo es donde más rendimiento se encontró debido a la variedad del cultivo predominante y al suelo existente.

Tabla 3.1 Características de la zona de estudio.

<i>UBPC</i>	<i>Bloq</i>	<i>Suelo predominante</i>	<i>Cepa</i>	<i>Variedad</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Rend. (t/ha)</i>
UBPC C. Perera	29	Pardo Sialítico	PQ	C 89-250	39,9	60
UBPC J. A. Bacallao	34	Vertisol	PQ	C 323-68	101,6	55
UBPC Monte Lucas	69	Gleyzado sialitizado	Soca	C 89-250	86,7	58,7
Total					228,2	57,5

Según la Nueva Versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández, 2007) , en esta UEB existen 7 grupos principales de suelos, véase en la Figura 3.2.

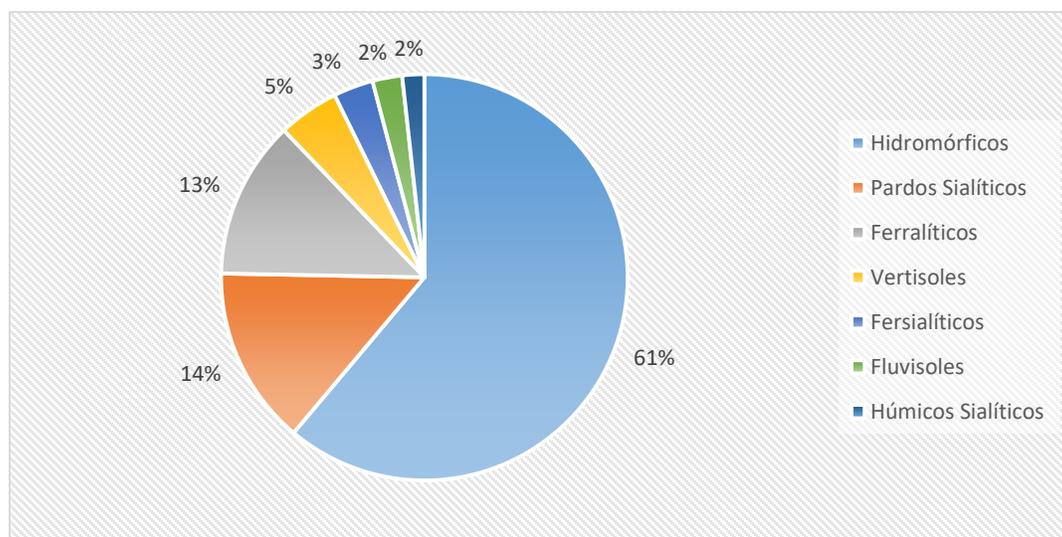


Figura 3.2 Distribución de los suelos según su clasificación.

En la (Figura 3.2) se muestra la distribución de los suelos de la UEB Héctor Rodríguez según su clasificación Genética, representando los suelos Hidromórficos más del 50% de la superficie total, con el menor porcentaje los Húmicos Sialíticos con un 2%. Los suelos Hidromórficos se desarrollan en

regiones llanas o depresionales donde predominan condiciones hidromórficas por la presencia de un manto freático cercano a la superficie y en ocasiones por presentar una capa impermeable relativamente próximo de la superficie. Se caracterizan por su poca profundidad efectiva (menor de 20 cm), la consistencia es compacta, el drenaje es deficiente y no presentan pedregosidad ni graviliosidad, las concreciones son escasas y la rocosidad está ausente (Cid *et al.*, 2011). Debido a estas características los mismos son propensos a mantener en etapas lluviosas una alta humedad que dificulta las labores de cosecha y predispone a los mismos a daños de tipo estructural así como en el perfil de los surcos.

3.3 Tecnologías empleadas en el cultivo y cosecha de la caña

En la UEB la preparación del suelo está mecanizada totalmente. La siembra mecanizada se encuentra limitada por el complementario de las máquinas especializadas aún en desarrollo, y por las limitaciones de sus usos en estos suelos que presentan un alto contenido de humedad. El cultivo y la fertilización están mecanizados casi totalmente. En alrededor de 90% de las áreas tratadas con herbicidas que son la mayoría, el 41.9% se aplica con avión, el 34.3% con máquinas agrícolas y el 23.8% con mochilas.

Las dimensiones del cantero tabla 3.2, ancho de la base y de la copa, resultaron similares con las reportadas para esas condiciones por Betancourt e Iglesias (2011), no así la altura que resultó inferior al valor mínimo de 20 cm recomendado por Gutierrez *et al.* (2013). Aunque en el rango de lo obtenido en otras investigaciones por Betancourt (2013).

Tabla 3.2 Relieve y características vinculadas a la distancia entre hileras y al cantero.

Relieve	Distancia entre hileras (m)*	Altura del cantero (cm)	Ancho de la base del cantero (cm)	Ancho de la copa del cantero (cm)
Llano	1,60 ± 0,02	18,3±1,79	0,86±0,03	47,43 ±6,40

*Es equivalente a la distancia de centro a centro de la parte superior del cantero.

La cosecha se realiza de forma mecanizada en su totalidad. Para ello se emplea la cosechadora CASE IH 8 800 de fabricación brasileña, con un tiempo de explotación de 6 años y altos niveles de automatización. Como transporte intermedio se emplea el autobasculante de Fabricación cubana RA-10. Finalmente la caña se lleva al basculador del Ingenio mediante camiones Scania y Super KAMAZ de doble remolque con capacidad de cargas hasta 60 t.

3.4 Malezas predominantes en la zona de estudio

En la tabla 3.3 se muestran las principales malezas encontradas en el área objeto de estudio. Las mismas están representadas por diferentes especies, entre las que se encuentran la Jiribilla, Zancaraña y la Hierba Bruja, que resultaron ser las más abundantes y se ubican en las UBPC J.A Bacallao y Monte Lucas.

Tabla 3.3 Principales malezas en la zona objeto de estudio.

UBPC	Bloque	Maleza 1	Maleza 2	Maleza 3	Maleza 4
UBPC C. Perera	29	Jiribilla	Paraná	Hierba Bruja	Cebolleta
UBPC J. A. Bacallao	34	Pica pica	Jiribilla	Hierba Bruja	Zancaraña
UBPC Monte	69	Paraná	Jiribilla	Hierba Bruja	Zancaraña
Lucas	70	Jiribilla	Hierba Bruja	Yerba fina	Marabú

La Figura 3.3 muestran dos de las principales malezas encontradas en las diferentes UBPC objeto de estudio, las cuales son conocidas como: (a) Jiribilla (*Dichanthium annulatum* (Forsk.), (b) Zancaraña (*Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton.



(a)

(b)

Figura 3.3 Malezas (a) Jiribilla (*Dichanthium annulatum* (Forsk.), (b) Zancaraña (*Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton.

3.5 Efectos de la humedad del suelo sobre la huella.

Los valores de humedad encontrados en los suelos de las diferentes UBPC (Figura 3.4) reflejaron un incremento respecto a la profundidad para los tres casos de estudio y todos estuvieron por debajo del 65% en los tres niveles de profundidad; valor declarado para los suelos arcillosos pesados como límite superior (Soler *et al.*, 2012).

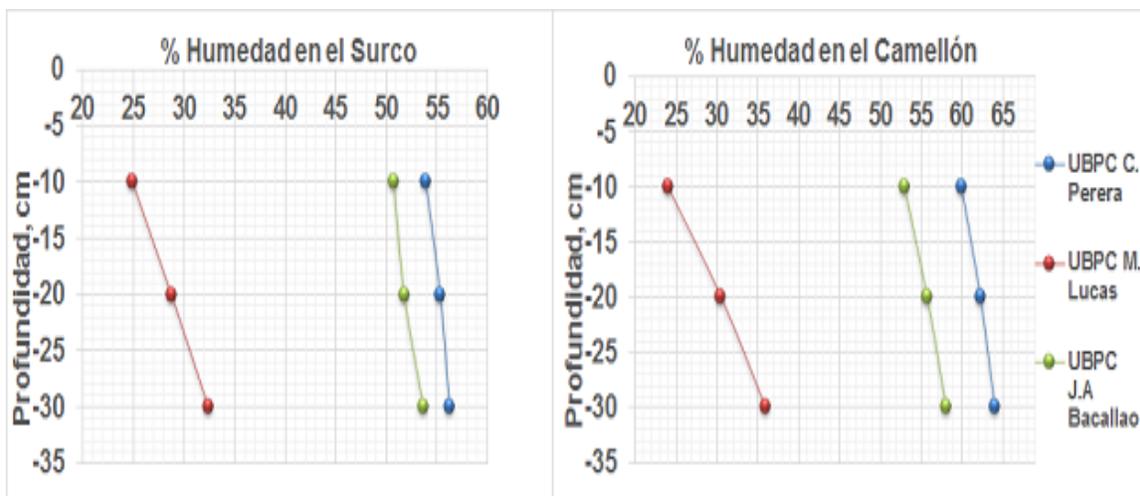


Figura 3.4 Valores de humedad encontrados en las diferentes UBPC.

El valor máximo de humedad en las tres profundidades evaluadas se encontró en la UBPC Carlos Perera en el bloque 29 del campo 6, con 64,0% siendo mayor a la profundidad de 30 cm en la zona de espacio entre hileras.

No obstante en las tres condiciones de suelo evaluadas, la cosechadora CASE IH 8 800 fue capaz de desplazarse satisfactoriamente, debido en lo fundamental al sistema de rodaje por estereras el cual genera bajas presiones sobre el suelo. Sin embargo, esto no fue así para el agregado formado por los tractores Maxxum CASE y Belarus 1523 con el autobasculante de fabricación nacional utilizado como transporte intermedio.

Este medio presentó dificultades con su traficabilidad debido al incremento de los valores de humedad presentes en zonas puntuales del campo dando como resultado la aparición de atascaderos (Figura 3.5). Este fenómeno tuvo lugar indistintamente en todos los bloques estudiados con mayor intensidad en los campos con mayor humedad del suelo.



Figura 3.5 Transporte intermedio atascado en la UBPC Monte Lucas.

En la Figura 3.6 se muestran los valores de humedad del suelo a diferentes profundidades en la zona del atascadero en la UBPC Monte Lucas. Para estas condiciones se usó el semirremolque por debajo de su capacidad de carga. Esto constituye una limitante para este medio de transporte, lo que reduce la eficiencia del proceso. Para este caso, la zona del atasco coincidió con una pequeña depresión en el campo lo que originó la acumulación del agua y por consecuencia el incremento de la humedad del suelo.

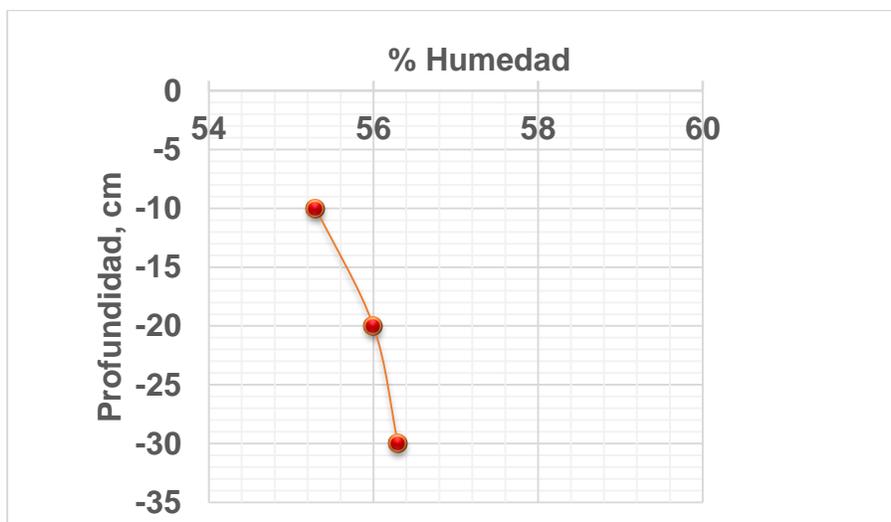


Figura 3.6 Valores de humedad en los que el agregado tractor-autobasculante fue susceptible de atascos.

Las huellas producidas por el atascamiento (Figura 3.7) de este agregado provocaron serias deformaciones en el perfil de suelo y como consecuencia en el desarrollo posterior del cultivo; para cuya recuperación son necesarias las diferentes labores adicionales que incrementan los costos y limitaciones de productividad.



Figura 3.7 Zona del atascamiento del transporte intermedio en la UBPC Monte Lucas.

3.6 Resultado de la medición del perfil del suelo

3.6.1 Determinación de la presión media específica

Algunos de los factores que relaciona el grado de disminución o reducción de la altura del cantero por el tráfico del autobasculante son, el peso en el momento del tráfico, la velocidad de traslación, la ubicación del semirremolque sobre el cantero y la humedad del suelo. Este último factor en particular, ejerce gran influencia sobre la deformación del cantero tal y como se observa en la Figura 3.8, donde con el incremento de la humedad del suelo desde 39 a 51% hbss la disminución de la altura del cantero (DAC) va desde alrededor de 3 cm hasta los 11 cm, respectivamente; es decir llegando a reducir la altura del cantero a valores superiores al 65% en superficies acanteradas con alturas similares a las reportadas en este trabajo.

Este resultado se debe, por una parte, a que los suelos arcillosos pesados como los del norte de Villa Clara disminuyen la resistencia a la compresión con el

aumento de la humedad del suelo, por lo que con mayor humedad, según el intervalo evaluado, se deforma más el cantero; por la otra, al tráfico sobre el montículo de suelo, sin apoyar uniformemente toda el área de contacto del sistema de rodaje sobre la superficie del terreno, incrementando la presión sobre el suelo y por consiguiente su deformación.

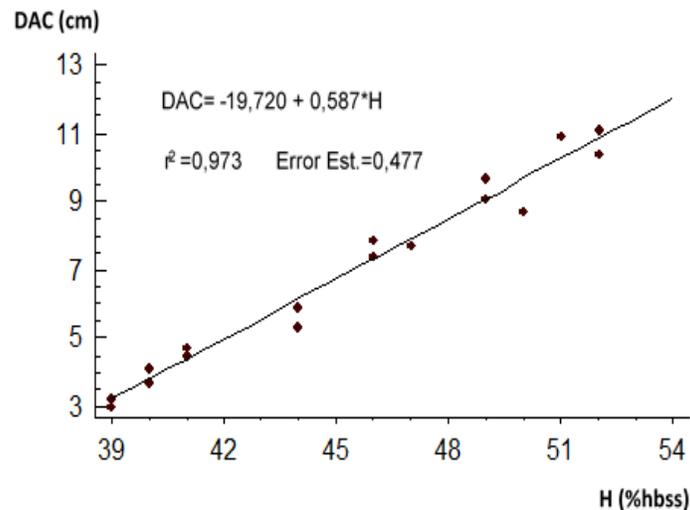


Figura 3.8 Deformación de la altura del cantero (DAC) en función de la humedad del suelo (H).

El empleo del autobasculante en superficies acanteradas, al no respetar la zona de protección del cultivo desaprovecha las bondades del sistema de rodaje que posee, cuatro neumáticos con cubierta extra ancha diseñados para reducir las presiones específicas sobre el suelo y por ende la compactación; más bien en condiciones extremas, con área inferior a $0,27 \text{ m}^2$ en uno de los canteros sobre los cuales transita, ejerce presiones similares al promedio de ambos puentes (delanteros y traseros) de los equipos que no están dotados para transitar dentro de los campos cañeros y que hoy se utilizan en el transporte cañero en Cuba, como el remolques RC-10, el ZIL 130 entre otros.

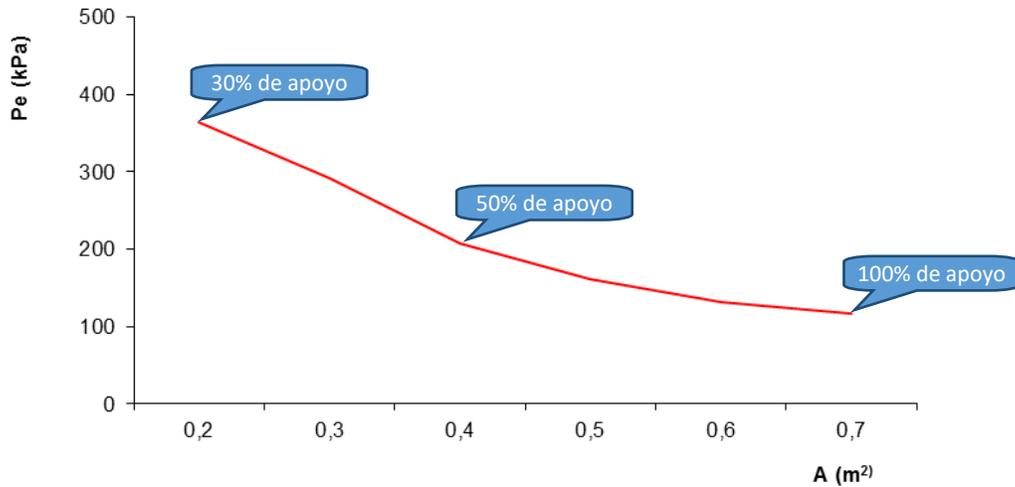


Figura 3.9 Presión específica (P_e) sobre el suelos en función del área de apoyo (A) de los neumáticos del autobasculante.

La no correspondencia del sistema de rodaje con la distancia de plantación origina el tráfico sobre una parte del cantero (Figura 3.10a) o completamente sobre su superficie (Figura 3.10b), resultando en el primer caso en un incremento de la presión media específica.



Figura 3.10. Tráfico del autobasculante sobre el cantero. a) Sobre aproximadamente el 50% de la superficie y b) En el 100% del área.

En la Figura 3.11 se observa como comienza a deformarse el cantero a medida que va pasando el autobasculante (Figura 3.11a), alcanzando su máxima deformación después del segundo pase (Figura 3.11b), obsérvese como se pierde el perfil del cantero.

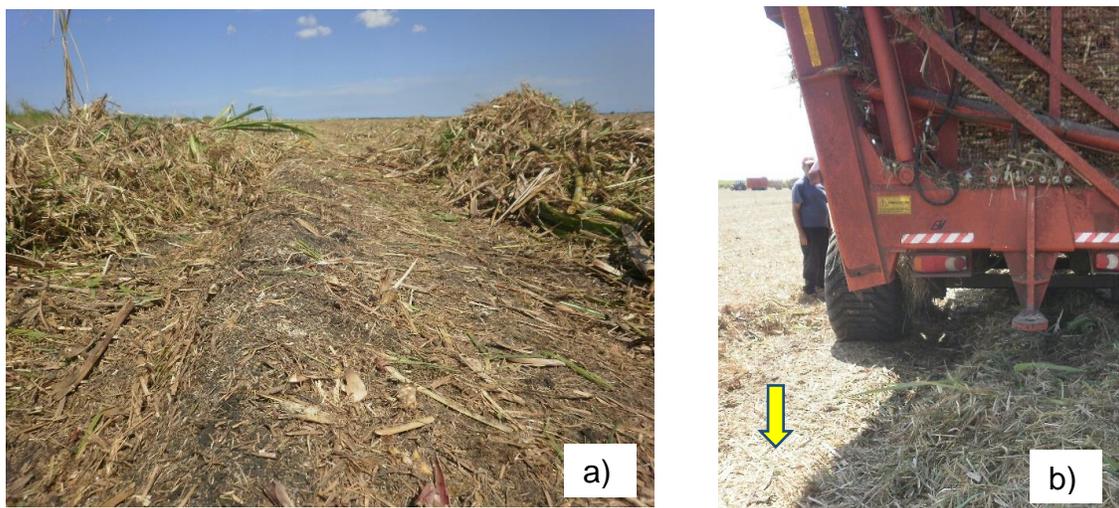


Figura 3.11. Deformaciones del cantero. a) Después de un pase y b) En dos pases.

3.6.2 Evaluaciones del perfilado del suelo en las diferentes UBPC

Las evaluaciones del perfilado en las diferentes UBPC estudiadas mostraron afectaciones del suelo producto del pase de los diferentes equipos que intervienen en la cosecha y tiro de la caña.

Como se puede apreciar en la (Figura 3.12), posterior al pase de la cosechadora se produce el hundimiento en el espacio entre hileras así como también posterior al pase del semirremolque, esta vez en el surco o hilo de caña. Como consecuencia del tráfico durante la cosecha, ocurre el hundimiento al transitar el agregado formado por los tractores Maxxum CASE y Belarus 1523 con el autobasculante de fabricación nacional. Este hecho puede afectar el proceso de germinación de los retoños de la plantación debido fundamentalmente a las altas presiones (Cuenca *et al.*, 2010).

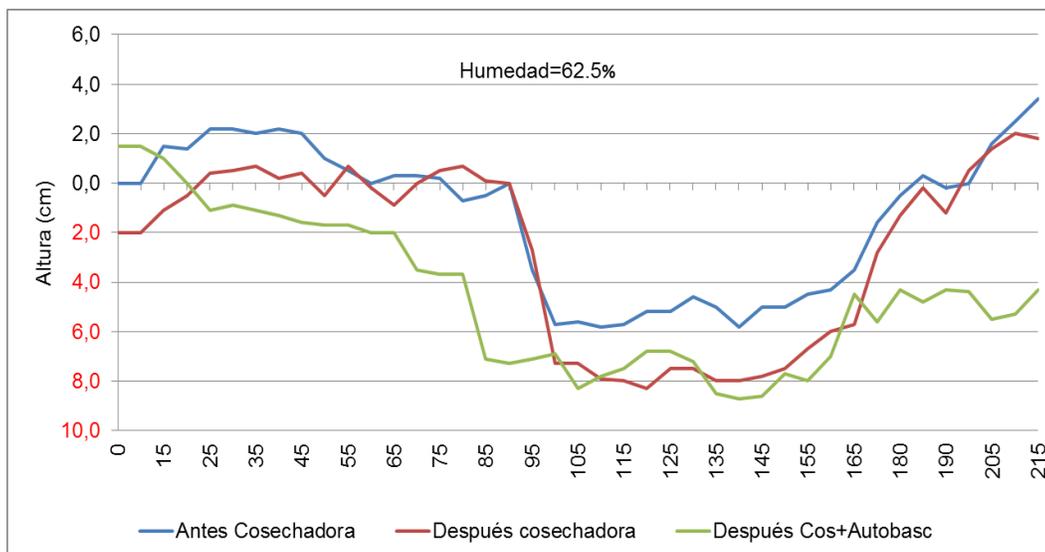


Figura 3.12 Variaciones del microrrelieve en la UBPC Carlos Perera.

Las variaciones del perfilado del suelo muestran el proceso de compactación que se verifica posterior a la cosecha, tanto por la cosechadora como por parte del autobasculante, actualmente empleado para el tiro intermedio de la caña a consecuencia fundamentalmente de las dimensiones de su trocha que no se ajustan al ancho de siembra (Betancourt *et al.*, 2013).

Un estudio más detallado del efecto de la cosechadora sobre el perfilado del suelo (Figura 3.13) mostró que la deformación provocada por su peso generó huellas menores a 5 cm y no afecta la estructura del surco. Esta máquina fue capaz de desplazarse satisfactoriamente en todas las condiciones estudiadas, sin atascamientos, evidenciando bajos valores de presiones sobre el suelo.

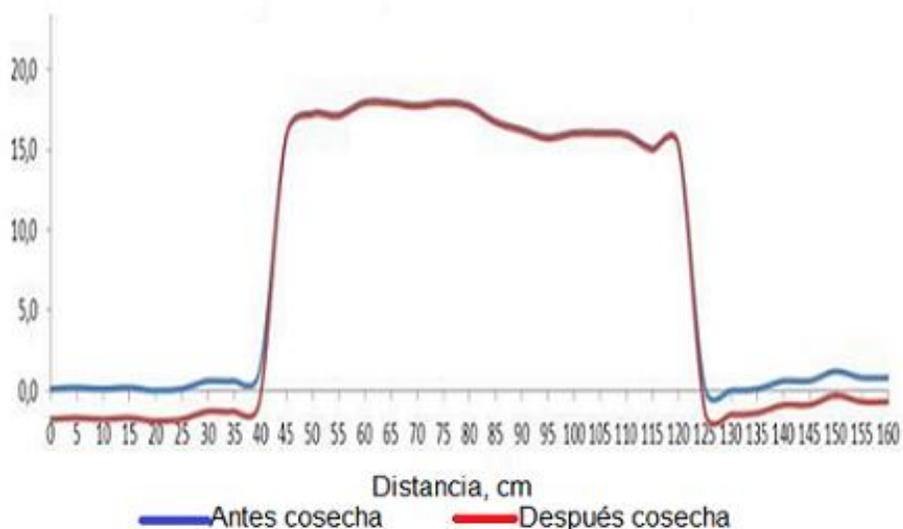


Figura 3.13 Variaciones del microrrelieve del suelo posterior al pase de la cosechadora en la UBPC C. Perera.

La Figura 3.14 muestra las variaciones del microrrelieve del suelo pertenecientes a la UBPC Monte Lucas en el bloque 69, campo 6. Dichas pruebas fueron realizadas para un antes y después de pasar la cosechadora más el agregado formado por los tractores Maxxum CASE y Belarus 1523 con el autobasculante de fabricación nacional utilizado como transporte intermedio, donde se puede observar la diferencia del hundimiento del microrrelieve del suelo que producen ambos medios al transitar (transporte intermedio y la cosechadora).

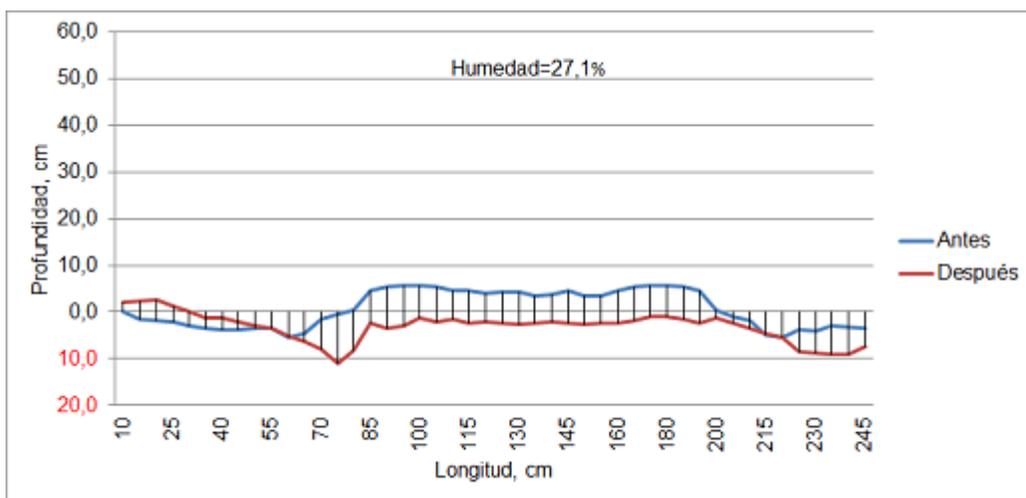


Figura 3.14 Variaciones del microrrelieve del suelo en la UBPC M. Lucas.

3.7 Variaciones de la densidad aparente del suelo

La tabla 3.4 muestra las variaciones referentes a la densidad aparente para un antes y después del paso de la maquinaria utilizada en la cosecha de la caña de azúcar y para tres profundidades en el perfil del suelo. De forma general las mediciones realizadas muestran valores de densidad entre 0,8 y 1,38 (g/cm³), los valores mayores se encontraron en la UBPC Monte Lucas como resultado de los bajos niveles de humedad existentes.

Tabla 3.4 Comportamiento de la densidad aparente (g/cm³) en tres UBPC.

Medición	Momento	Prof (cm)	UBPC		
			C. Perera	M. Lucas	J.A Bacallao
Surco	Antes cosecha	10	0,87	1,21	0,9
		20	0,9	1,33	0,96
		30	0,94	1,33	0,96
		<i>media</i>	<i>0,90</i>	<i>1,29</i>	<i>0,94</i>
		<i>STD</i>	<i>0,04</i>	<i>0,07</i>	<i>0,03</i>
	Después cosecha	10	1,09	1,38	0,96
		20	1	1,38	1,03
		30	0,95	1,36	1,03
		<i>media</i>	<i>1,01</i>	<i>1,37</i>	<i>1,01</i>
		<i>STD</i>	<i>0,07</i>	<i>0,01</i>	<i>0,04</i>
Camellón	Antes cosecha	10	0,9	1,34	0,92
		20	0,93	1,34	0,97
		30	0,95	1,28	0,97
		<i>media</i>	<i>0,93</i>	<i>1,32</i>	<i>0,95</i>
		<i>STD</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>
	Después cosecha	10	1,02	1,36	0,98
		20	0,98	1,35	1,05
		30	0,95	1,32	1,02
		<i>media</i>	<i>0,98</i>	<i>1,34</i>	<i>1,02</i>
		<i>STD</i>	<i>0,04</i>	<i>0,02</i>	<i>0,04</i>

Como se puede apreciar en la tabla 3.4 la densidad aparente de las UBPC Carlos Perera y J.A Bacallao mostraron un ligero incremento respecto a la profundidad previo a la cosecha en los primero 20 cm, tanto en el centro de los espacios entre hileras como en el centro del surco. La UBPC Monte Lucas por su parte mostró un incremento considerable de 1.33 (g/cm³) a los 20 cm de profundidad y luego se mantiene este valor hasta los 30 cm, este mismo patrón se muestra en el espacio

entre hileras donde alcanza densidades de hasta $1,38 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. La causa de este comportamiento de la densidad en esta unidad, puede estar vinculada a las labores relacionadas con el cultivo durante el crecimiento de la caña.

Dicha variable mostró una disminución respecto a la profundidad, excepto en la UBPC J.A Bacallao que mostró un aumento en los primeros 20 cm de profundidad, tanto en el surco como en la zona del espacio entre hileras y después de los 20 cm comenzó a mantenerse constante en el surco así como disminuyó en el espacio entre hileras. El aumento puede estar relacionado con el contenido de materia orgánica, textura o el manejo de diferentes labores agrícolas que haya recibido el suelo.

Similar tendencia en la manifestación de la densidad aparente se encontró en las UBPC J. A. Bacallao y Monte Lucas, esta última con los menores ascensos como consecuencia del menor porcentaje de humedad, en coincidencia con lo señalado por Fonseca (1982) referente a que el suelo seco no se compacta fácilmente.

No obstante, los valores de densidad aparente encontrados distan mucho de los señalados por Humbert (1965) y Jonn-Jiang (1970) como críticos en los suelos arcillosos pesados de los trópicos para el desarrollo normal del sistema radicular de la caña de azúcar ($1,5\text{-}1,7 \text{ g/cm}^3$), cuando el desecamiento está por debajo del punto de marchitez, estado de humedad no alcanzado en ninguna de las condiciones evaluadas.

La Figura 3.15 muestra los valores de densidad aparente para un antes y un después de la cosecha, en la zona del surco de las UBPC objeto de estudio, donde los cuales coinciden o están muy próximos de los reportados por Acosta *et al.* (1989), Agafanov y Alonzo (1993), y García *et al.* (2010), como característicos de estos suelos; con la excepción de los localizados en la UBPC Monte Lucas, donde en los primeros 30 cm sobrepasa el valor de densidad crítica ($1,15 \text{ g/cm}^3$) dado por Cairo y Fundora (2005) para el cultivo de referencia en este tipo de suelo.

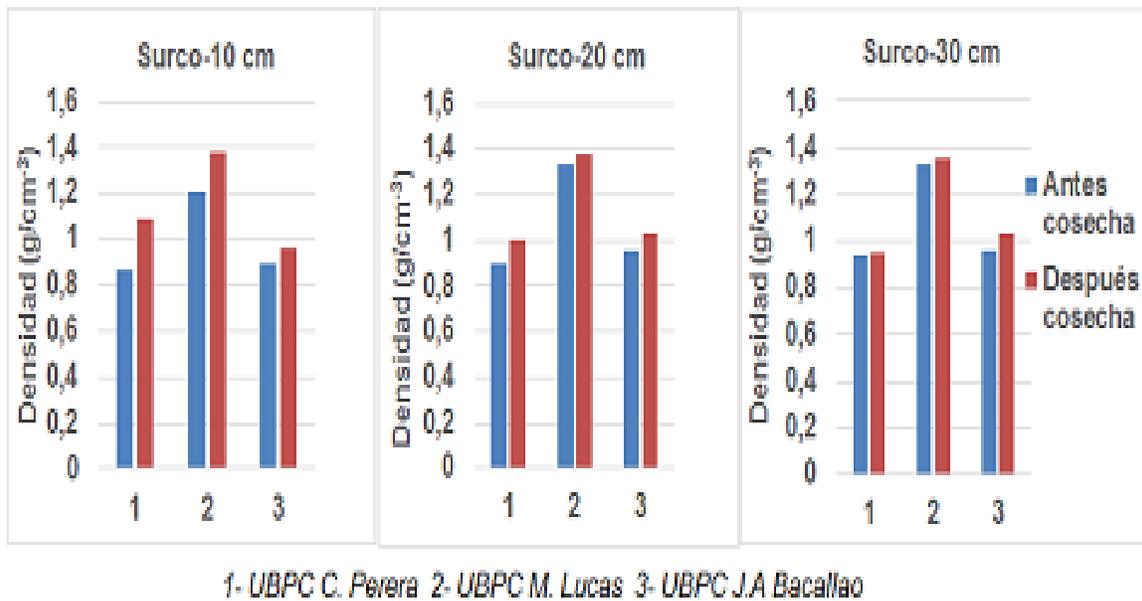


Figura 3.15 Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) en las UBPC antes y después de la cosecha en el surco.

La Figura 3.16 muestra los valores de densidad aparente tomados en la zona del espacio entre hileras para un antes y un después del paso de la maquinaria empleada en la cosecha de la caña a profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm; 20-30 cm en las diferentes UBPC estudiadas. Se puede observar que la densidad aparente presenta un ligero aumento después de la cosecha con respecto al paso de la maquinaria antes de dicha labor, con la excepción de la UBPC C. Perera donde a una profundidad de 20-30 cm va a mantenerse constante la densidad aparente con un valor de aproximadamente $0.98 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

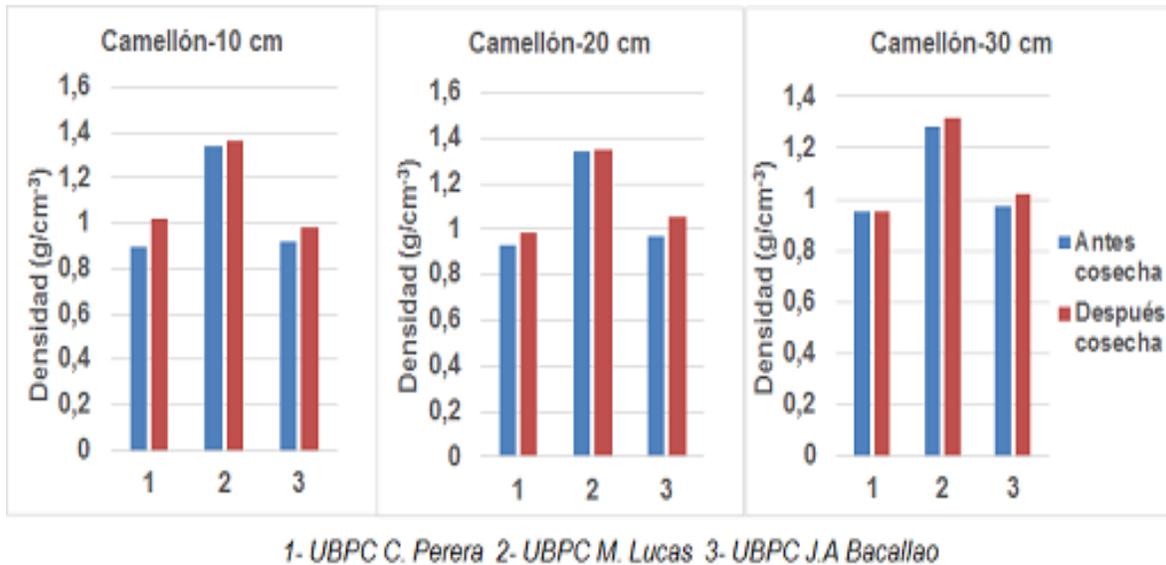


Figura 3.16 Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) en las UBPC antes y después de la cosecha en el espacio entre hileras.

La relación existente entre la densidad aparente del suelo y la humedad del mismo se refleja en la Figura 3.16, donde se muestra que con el paso del sistema de cosecha la densidad muestra un patrón similar en el surco y el espacio entre hileras. A medida que aumenta la humedad hasta un valor crítico la densidad disminuye con el aumento de la humedad, luego de lo cual muestra una tendencia a mantenerse constante o incrementar en el perfil de 0 a 10 cm. Por su parte el paso del sistema provoca un aumento promedio de 0.1 g/cm^3 en todos los perfiles analizados.

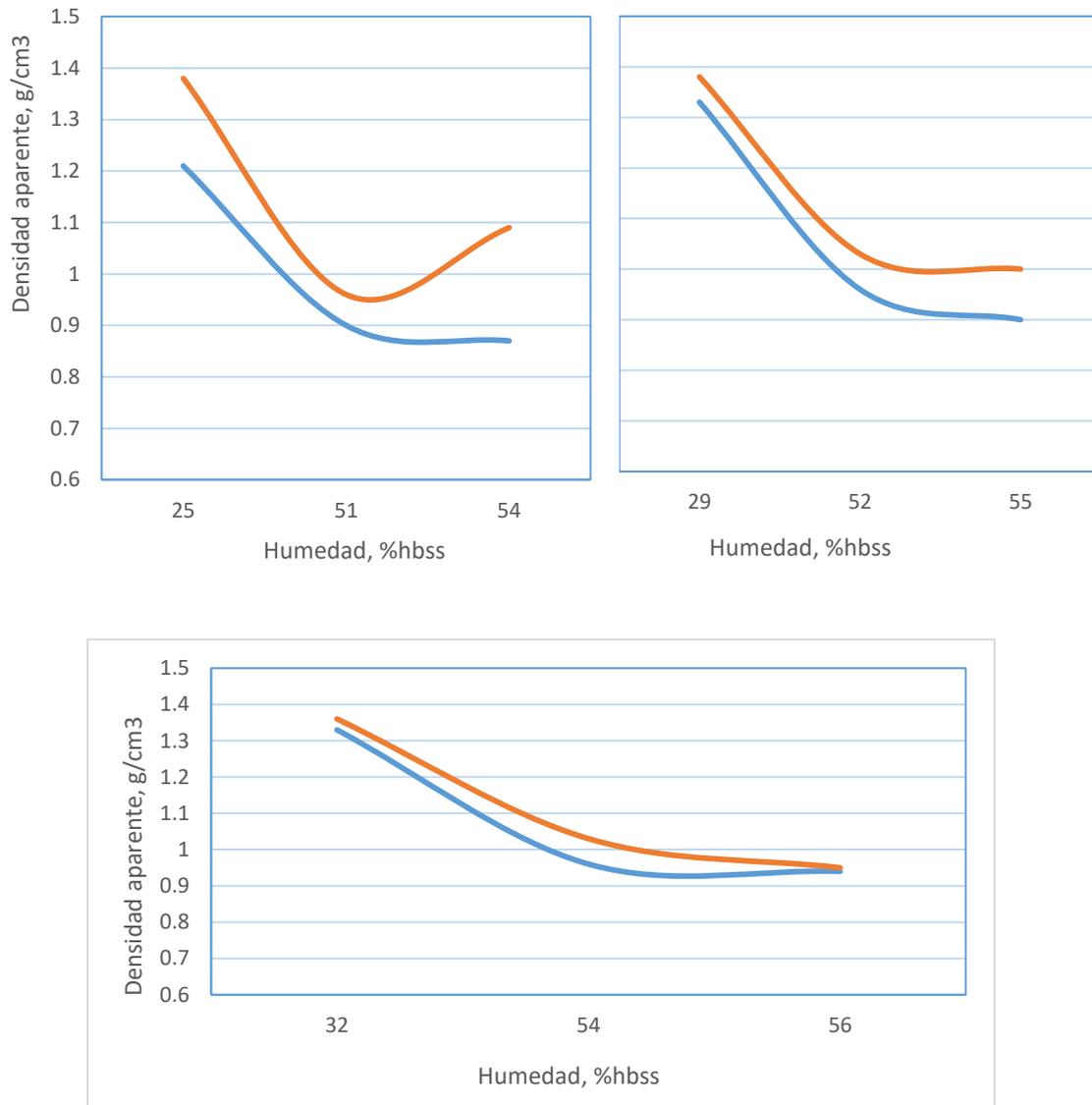


Figura 3.17 Variación de la densidad en el surco en función de la humedad antes (azul) y después (naranja) a profundidades de 0-10(a), 10-20(b) y 20-30(c) cm respectivamente.

Por su parte la porosidad del suelo varía respecto a las diferentes profundidades encontrándose mayor porcentaje de porosidad total antes del paso del complejo de máquinas que intervienen en la cosecha mecanizada, principalmente en la capa superficial del suelo, como muestra la Figura 3.18.

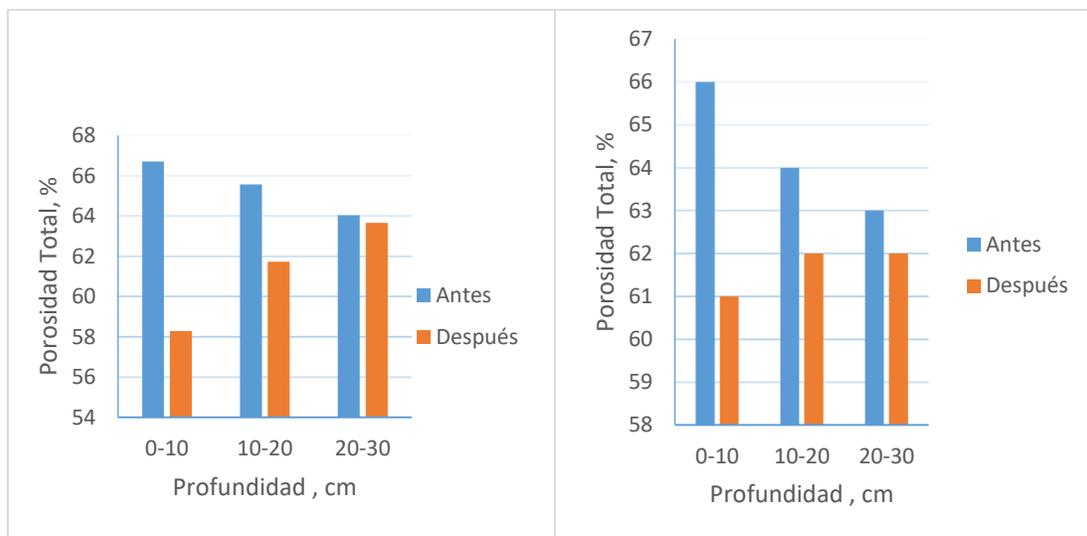
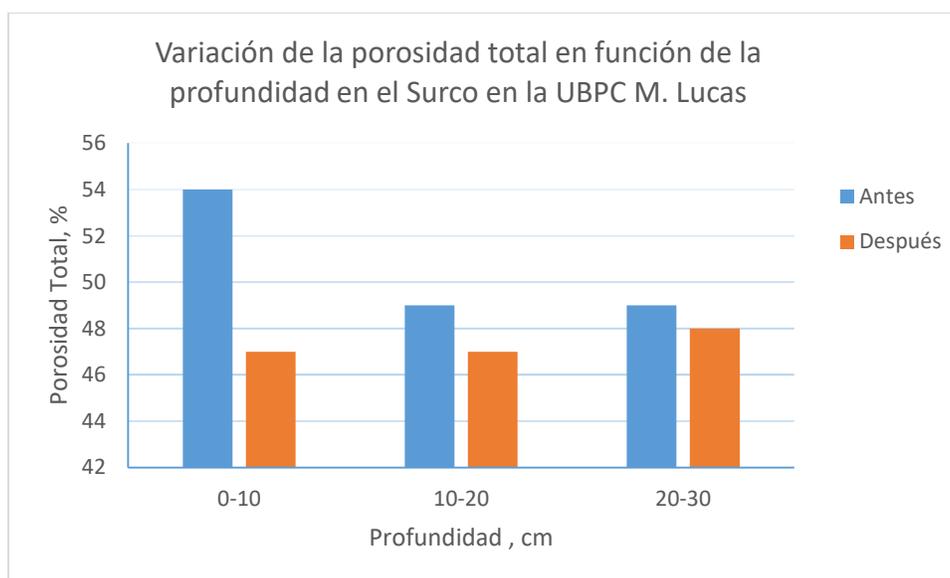


Figura 3.18 Variación de la porosidad total en función de la profundidad (a) surco y (b) espacio entre hileras en la UBPC Carlos Perera.

La Figura 3.19 nos muestra una ligera disminución de los valores obtenidos de porosidad total en la UBPC M. Lucas tanto en el surco como en los espacios entre hileras comparados con la UBPC Carlos Perera. Los mayores valores de porosidad total se encontraron en los primero 10 cm de profundidad, llegando alcanzar valores hasta 54% antes de la cosecha y 50% después de la cosecha en la zona correspondiente al centro de los espacios entre hileras, manteniendo este mismo valor de porosidad en el surco.



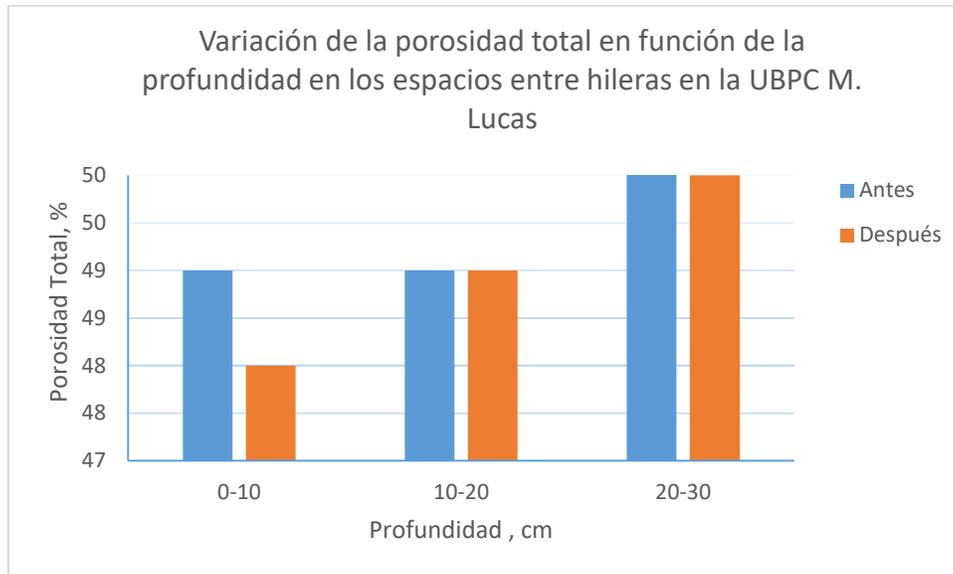


Figura 3.19 Variación de la porosidad total en función de la profundidad (a) surco y (b) espacio entre hileras en la UBPC M. Lucas.

3.8 Resultados de la resistencia a la penetración del suelo

La Figura 3.20 muestran los valores de resistencia a la penetración encontrados en las UBPC Carlos Perera, para un antes (A) y un después de la cosecha (C+A), dichos valores indicaron un aumento ligero de la resistencia del suelo en varias ocasiones respecto a la profundidad, con mayores magnitudes en la zona correspondiente al centro del camellón en la UBPC C. Perera llegando a obtener valores de resistencia a la penetración de (1550 kPa), en coincidencia con los resultados alcanzados por Fonseca (1982).

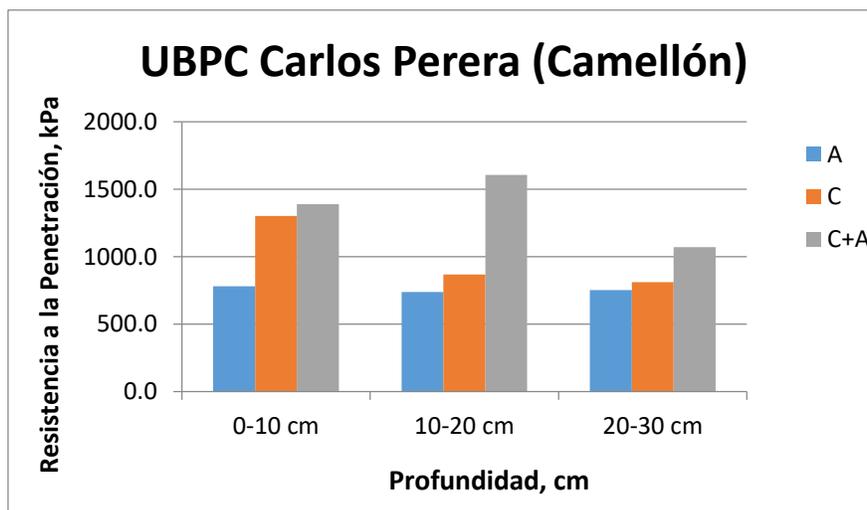
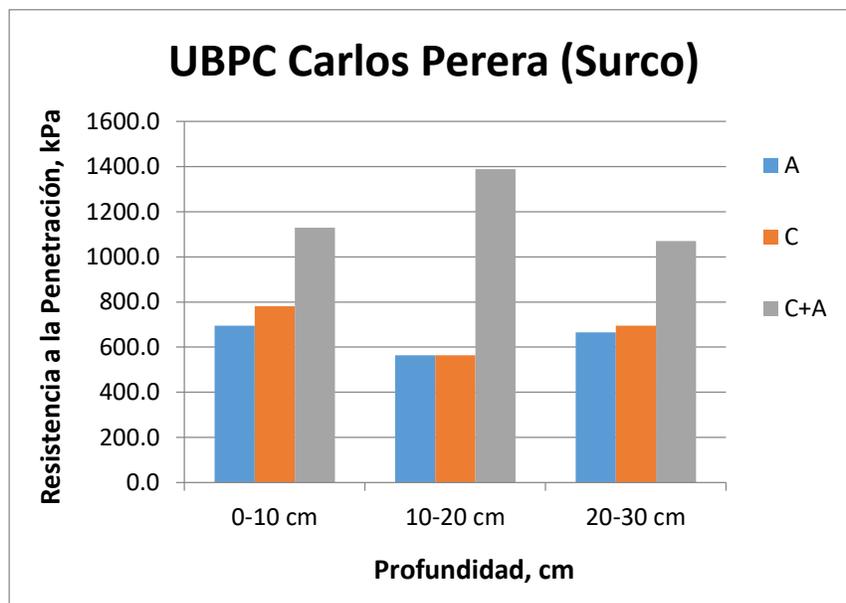


Figura 3.20 Valores de resistencia encontrados en la zona del surco y espacio entre hileras en la UBPC C. Perera.

La Figura 3.21 nos muestra los valores de resistencia a la penetración (kPa) en función de la humedad del suelo, en la zona del surco y en la zona de los espacio entre hileras, para un antes y un después de la cosecha en la UBPC C. Perera, donde se puede observar el incremento de la resistencia a la penetración después del paso del sistema de máquinas de cosecha en las dos zonas evaluadas.

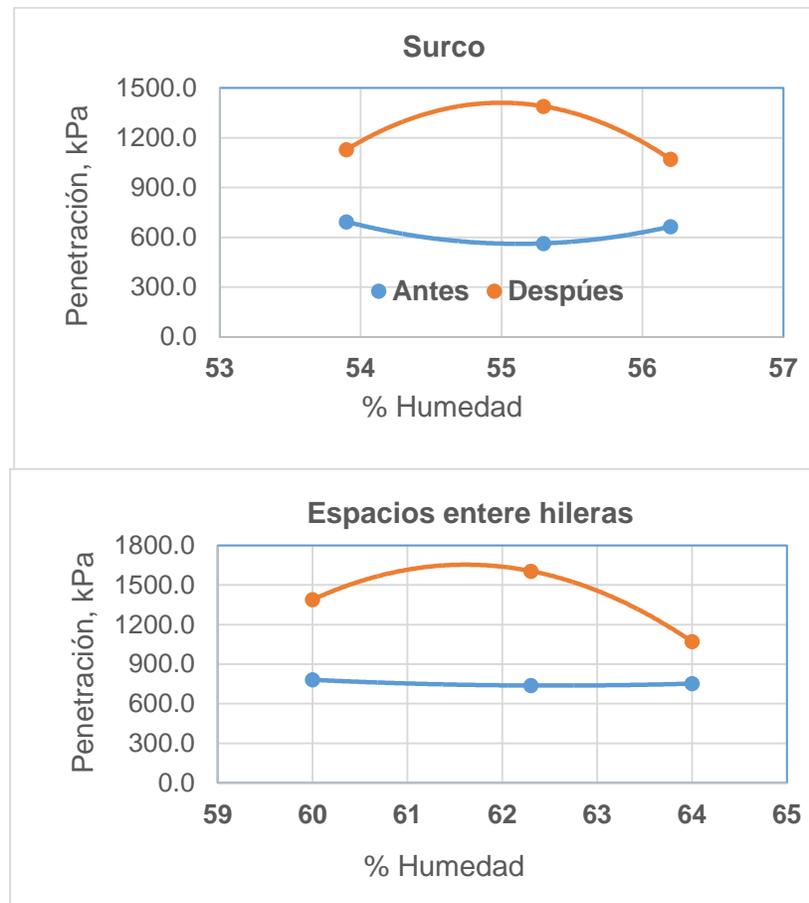


Figura 3.21 Valores de resistencia a la penetración en función de la humedad en el surco y los espacios entre hileras (UBPC C. Perera).

El incremento de la resistencia a la penetración del suelo que se produce en el centro del espacio entre hileras, después del pase de la cosechadora, es del 21,3%; mientras que en el centro del surco de caña, después del pase del autobasculante, es del 77%.

Posterior al pase de la cosechadora el mayor aumento de la resistencia en profundidad se produce en la capa más superficial, aunque se extiende por todo el perfil; al igual que después del pase del semirremolque. El resultado final es el crecimiento de la resistencia en casi toda la masa de suelo, expresado tanto en el centro del surco como en los espacio entre hileras hasta los 20 cm de profundidad.

La Figura 3.22 muestra los valores de resistencia a la penetración (kPa) en función de la humedad encontrados en la UBPC Monte Lucas, los cuales presentan un

disminución significativa de los valores de resistencia a la penetración del suelo en comparación con los obtenidos en la UBPC Carlos Perera a medida que aumenta la humedad, donde el mayor valor encontrado no sobrepasa los 1606,1 (kPa) no siendo así en el caso de la UBPC Monte Lucas donde después de la cosecha se registraron valores hasta de 3906,6 (kPa).

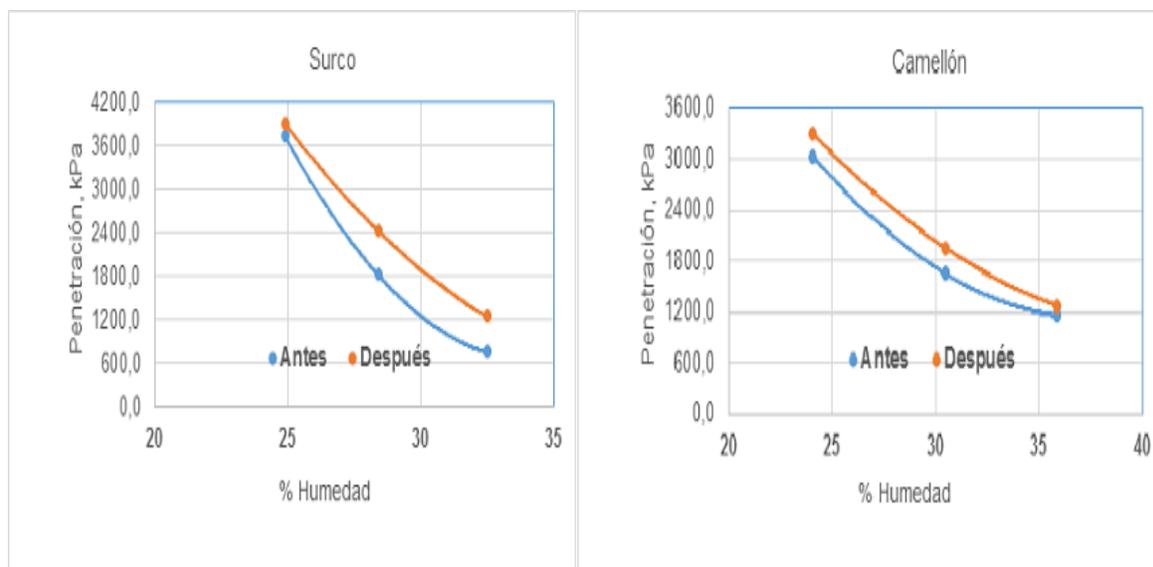


Figura 3.22 Valores de resistencia a la penetración en función de la humedad en la UBPC M. Lucas.

La disminución de los valores de resistencia a la penetración en la UBPC Carlos Perera respecto a la UBPC Monte Lucas, son correspondidos al contenido de humedad encontrado en dicha UBPC, ya que el humedecimiento favorece una disminución de la densidad aparente, debido a que la presencia de agua en los poros amortigua y dificulta el acercamiento de las partículas del mismo, estos se expanden y disminuye el efecto de la compactación (Herrera *et al.*, 2009).

3.9 Resultados del cálculo del ancho de vía

Teniendo en cuenta que la distancia establecida para la plantación de la caña de azúcar es de 1.60m, con una zona de protección de 0.40m, manteniendo los mismos neumáticos del sistema de rodaje, 1,80m es el ancho de vía recomendado para el semirremolque autobasculante (Figura 3.23). Esta propuesta va

enmarcada solamente para cumplir uno de los requerimientos agrotécnicos de este tipo de remolque, su traficabilidad entre surcos o capacidad de paso, por lo que se recomienda a partir de la reducción de los valores del ancho respecto al diseño original realizar los estudios correspondientes de estabilidad.

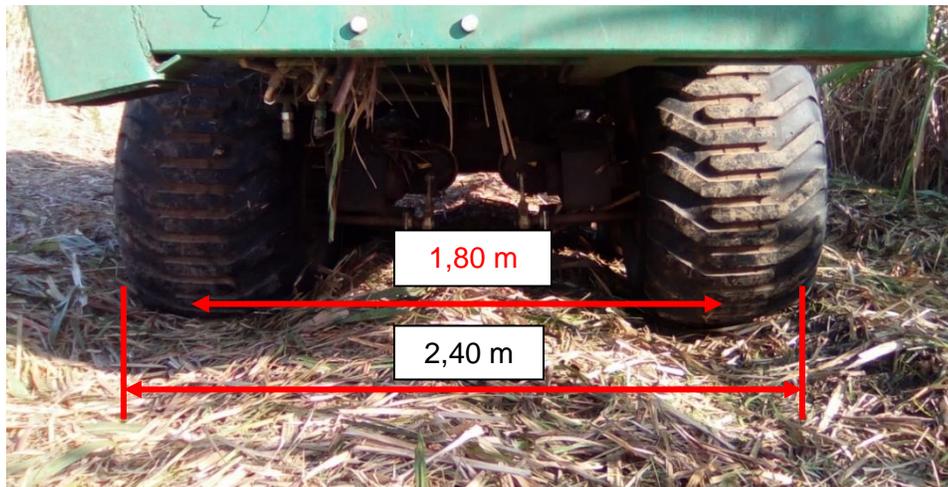


Figura 3.23 Propuesta del ancho de vía para el sistema del rodaje del autobasculante objeto de investigación, con una distancia de plantación de 1,60m.

CONCLUSIONES

1. La cosechadora traficó sin dificultad en los diferentes niveles de humedad estudiados (24 y 64%), sin embargo para niveles de este indicador de 54% se observó el atascamiento del transporte intermedio representado por el Maxxum CASE 150 y el Autobasculante de 10 t.
2. Se redujo el perfil del cantero hasta 11cm (65%), para un nivel de humedad de 51% hbss, como resultado de las altas presiones específicas (350 kPa), que aplica el autobasculante sobre el cantero donde transita.
3. La densidad aparente del suelo antes de la cosecha mostró promedios entre 0,90 y 1,32 g/cm³, en las tres unidades estudiadas se constató un incremento después del paso del sistema de máquinas para la cosecha tanto en el surco como en los espacio entre hileras con valores entre 0,98 y 1,37 g/cm³, respectivamente.
4. El mayor incremento de la resistencia a la penetración del suelo, como promedio de 550 kPa se produce en el surco de caña después del paso del autobasculante, correspondiendo a una humedad de 55%hbss en los primeros 20 cm del perfil.
5. El ancho de vía adecuada para el tren de rodaje del autobasculante es de 1,80 m, lo cual se corresponde con los requerimientos necesarios para su tráfico en las condiciones de alta humedad.

RECOMENDACIONES

1. Emplear para el transporte intermedio de la caña de azúcar un autobasculante que se ajuste al ancho entre hileras evitando el tránsito sobre las cepas.
2. Evaluar la estabilidad del equipo a partir de la reducción del ancho de vía propuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, R.; A. C. LUQUE; M. A. DEBES; M. D. L. Á. ZARDÓN; M. LA O; I. ALFONSO, et al. M. E. ARIAS: "Variaciones morfológicas de roya naranja en cultivares de caña de azúcar en Cuba", *Revista de Protección Vegetal*, vol. 30 134-134, 2015. ISSN:1010-2752.
- ACOSTA, J.; M. CABALLERO y H. DÍAZ: *Definir el manejo adecuado de las labores de cultivo mecánico para diferentes condiciones de suelo, climáticas y tipos de cepas*. ISAI "Camilo Cienfuegos". Matanzas. , 50pp. 1989.
- AGAFANOV, O. y F. ALONZO: Influencia de la quema de la caña de azúcar y el corte mecanizado sobre las propiedades físicas del suelo. pp. 29-73. 1993.
- AGROINFORMACIÓN: *La Compactación de los suelos agrícolas [en línea]*. vol. no. Disponible en: http://www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp[14/06/2013 12:58:37.
- AGUILAR-RIVERA, N.; M. ALGARA-SILLER; L. A. OLVERA-VARGAS y C. MICHEL-CUELLO: "Land management in Mexican sugarcane crop fields", *Land Use Policy*, vol. 78 763-780, 2018. ISSN:0264-8377.
- ALVARADO, A. y W. FORSYTHE. *VARIACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE EN ÓRDENES DE SUELOS DE COSTA RICA [en línea]* Disponible en: www.mag.go.cr/rev_agr/inicio.htm [Consulta].
- ANGELONE, S.; F. MARTINEZ y F. AIRASCA: *Determinación del contenido de Humedad de suelos en Hornos Microondas*. Universidad Nacional de Rosario, 2003.
- BETANCOURT, Y.: "Las propiedades físicas del suelo para definir la zona de aplicación del laboreo localizado en los suelos arcillosos pesados en el norte de Villa Clara", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 2013.
- BETANCOURT, Y. y C. IGLESIAS: "Fundamentos del diseño de implementos para la preparación localizada de superficies acanteradas en caña de azúcar", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20 5-10, 2011. ISSN:1010-2760.
- BETANCOURT, Y.; C. IGLESIAS; A. GUTIÉRREZ y I. GARCÍA: "Nuevos parámetros de diseño del escarificador C-101 para la labranza primaria de superficies acanteradas.", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22 68-73, 2013. ISSN:1010-2760.
- BETANCOURT, Y.; M. OROZCO; MARINEZ; H. PÉREZ; R. MARÍN y R. VILLEGAS: Fundamentos técnicos para la implementación del complejo tecnológico cosecha-transporte en condiciones de alta humedad de los suelos cañeros de Cuba. . *En: (INICA), I. d. I. d. I. C. d. A. (ed.)*. pp. 2015.
- BRAUNACK, M. y D. MACGARRY: "Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia", *Soil & Tillage Research*, vol. 86 86-102, 2006.
- CAIRO, P. y O. FUNDORA: *Edafología*, La Habana ed, Isbn: 2005.

- CAMACHO, J. y A. GONZALO: *EVALUACIÓN DE IMPLEMENTOS DE LABRANZA A DIFERENTES VELOCIDADES DE OPERACIÓN Y CONTENIDOS DE AGUA DEL SUELO.*, Ingeniería Agrícola, Universidad Nacionas De Colombia, 2006.
- CHICAS, R.; E. VANEGAS y N. GARCÍA: "Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23 41-46, 2014. ISSN:2071-0054.
- CHUDAKOV, D.: *Fundamentos de la teoría y el cálculo de tractores y automóviles.*, Isbn: 1977.
- CID, G.; T. LOPÉZ; F. GONZÁLEZ; J. HERRERA y M. E. RUIZ: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20 42-46, 2011. ISSN:1010-2760.
- CRUZ, M.; M. HERRERA; A. TABOADA y L. GARCIA: "Determinación de la geometría del perfil del suelo mediante el método de tratamiento de imágenes.", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 24 31-35, 2015. ISSN:1010-2760.
- CUENCA, D.; J. A. DELGADO; C. DOMÉNECH y A. MIRAD: *Cálculo analítico de la presión de preconsolidación del suelo: aplicación a la Vega Baja del río Segura (Alicante)*. Isbn: 2010.
- DE BENEDETTO, D.; F. MONTEMURRO y M. DIACONO: "Impacts of agro-ecological practices on soil losses and cash crop yield", *Agriculture (Switzerland)*, vol. 7 (12): 2017. ISSN:20770472 (ISSN).
- DELGADO, J. A.: *Remodelación del puente de rodaje del remolque autobasculante para el tiro de caña en condiciones de elevada humedad del suelo.*, Universidad Central Marta Abreu de Las VILLAS, 2004.
- DEMUNER, G.; M. CADENA y S. G. CAMPOS: "Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo con tres sistemas de labranza", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22 68-71, 2013. ISSN:2071-0054.
- FAO. *Revista sobre Agricultura orgánica promueve experiencias para la conservación de suelos [en línea] Disponible en: <http://www.fao.org/cuba/noticias/detail-events/en/c/340415/> [Consulta: 20/11/2015].*
- FERNANDEZ, L.; A. GONZALEZ y A. LAU: "Volumen de poros en selos arcillosos de Holguin y Santiago de Cuba", *Revista Cubana De Física*, vol. 12 1992.
- FONSECA, M.: *Como la compactación del suelo afecta a las cañas de retoño.* , Isbn: 1982.
- FRANCO, R.; J. TORRES y J. PANTOJA: " Impacto de la siembra a 1,75 m en la productividad de la caña de azúcar en el Ingenio Mayagüez", *Tecnicaña*, vol. 5, 2009.
- FUNDORA, O. y P. CAIRO: *Edafología*, La habana ed, Isbn: 2005.
- GABIRI, G.; B. DIEKKRÜGER; C. LEEMHUIS; S. BURGHOF; K. NÄSCHEN; I. ASIIMWE y Y. BAMUTAZE: "Determining hydrological regimes in an agriculturally used tropical inland valley wetland in Central Uganda using

- soil moisture, groundwater, and digital elevation data", *Hydrological Processes*, vol. 32 (3): 349-362, 2018. ISSN:08856087 (ISSN).
- GALVIS, D.: "Los sistemas de corte mecanizados de la caña de azúcar. Equipos de cosecha.", *Revista Técnicaña*, vol. 26, 2010.
- GARCÍA, I.; M. SÁNCHEZ; M. L. VIDAL DÍAZ; Y. BETANCOURT y J. ROSA: "Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 19 51-56, 2010. ISSN:2071-0054.
- GARCÍA, R.: *Desarrollo de una metodología para la medición de la rugosidad superficial del suelo.*, Edafología, Universidad Politécnica De Madrid., 2006.
- GONZÁLEZ, M.: *La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes.*, Ed. Bildner Center for Western Hemisphere Studies, Isbn: 2015.
- GONZÁLEZ, O.; M. HERRERA SUÁREZ; C. E. IGLESIAS y E. LÓPEZ: "Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22 75-80, 2013. ISSN:2071-0054.
- GUTIERREZ, A.; F. MUJICA; L. GARCÍA; E. PINEDA; Y. BETANCOURT; J. GÓMEZ, et al.O. ADAY: "Manual de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de la caña de azúcar en los suelos arcillosos pesados con riego superficial.", *Cuba & Caña, Suplemento especial, No. 1.*, vol. I 2013.
- HASNER, C.; A. A. D. LIMA y E. WINTER: "Technology advances in sugarcane propagation: A patent citation study", *World Patent Information*, vol. 56 9-16, 2019. ISSN:0172-2190.
- HENRRIQUEZ, C.; O. ORTIZ; P. VARGAS y D. GÓMEZ: "Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero". *En: Costarricense.*, I. A. (ed.). pp. 2011.
- HERNÁNDEZ, L.: *Metodos para el analisis físico de los suelos*, Ediciones INCA ed, Isbn: 978-959-7023-39-5, 2007.
- HERNÁNDEZ, Y. y H. MEDINA: "Estimación de la humedad del suelo mediante técnicas de asimilación de datos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21 30-35, 2012. ISSN:2071-0054.
- HERRERA, M.; C. IGLESIAS y O. GONZÁLEZ: "Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 18 2009.
- HUMBERT, R.: *El cultivo de la caña de azúcar* Isbn: 1965.
- KAPLÁN, A.; S. LABELLA; L. RUCKS; A. DURÁN y A. CALIFRA: GUIA PARA LA DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL DE SUELO. pp. 2012.
- LÓPEZ, E.; S. MIQUEL y L. PLÁ: "EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN CUBA ", *REVISTA INVESTIGACIÓN OPERACIONAL*, vol. 25 2004.
- MANTILLA, L.: "Los sistemas de corte mecanizados de caña de azúcar. Equipos de cosecha", *Revista Técnicaña*, vol. 2010.
- MARTIN, L.: "Ingeniería Mecánica-16", *Carros jaula ferroviarios: determinación de un escalón en*

- diámetro.*, pp, 2013.
- MARTÍN, N. J. y J. L. DURÁN: *El Suelo y su fertilidad*, La Habana, 2011 ed, Isbn: 2011.
- MARTINEZ, M.; A. BANCHI y J. LÓPES: "Análisis de operaciones de trasbordo de caña picada.", *Revista AgriMotor*, vol. V 2012.
- MARTÍNEZ, R.; Y. BETANCOURT; M. RODRÍGUEZ; L. VIDAL y S. GUILLÉN: Evaluación Agrotécnica de la Combinada Cosechadora de Caña de Azúcar CASE IH 8800 y del Semirremolque Autobasculante de Fabricación Cubana en Suelos Arcillosos Pesados con Superficies Acanterada. En, pp. 2015.
- MARZO, C.; A. B. DÍAZ; I. CARO y A. BLANDINO: "Bioethanol Production from Food Crops", *Chapter 4 - Status and Perspectives in Bioethanol Production From Sugar Beet*, pp 61-79, Eds. Ray, R. C. and Ramachandran, S.: Academic Press, 2019.
- MATOS, N.; C. IGLESIAS y E. GARCÍA: "Organización racional del complejo de máquinas en la cosecha - transporte - recepción de la caña de azúcar en la Empresa Azucarera Argentina", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23 27-33, 2014. ISSN:2071-0054.
- MUELAS, R.: *Manual de Mecánicas del Suelo.*, Isbn: 2010.
- NÚÑEZ, D.: MALEZAS. MÉTODOS DE CONTROL EN LA AGRICULTURA. En: *Cienfuegos*, U. d. M. C. (ed.). pp. 2011.
- OTERO, L.: "Revisión bibliográfica sobre aspectos bioecológicos del Don Carlos (Sorghum halepense) (L.) Pers.) de interés para su manejo en las plantaciones de cítricos y otros frutales", *Revista CitriFrut*, vol. 26 2009.
- PÁEZ, Y.; L. RIVERO; Y. GARCÍA; P. ALMARALES y A. TURRO: RIESGO DE TRANSMISIÓN DE ENFERMEDADES POR MALEZAS Y PLANTAS ECONÓMICAS ASOCIADAS A LA CAÑA DE AZÚCAR EN CUBA. En: (EPICA), E. P. d. I. d. I. C. d. A. (ed.). pp. 42-46. 2006.
- PARAQUAT. *Centro de Información del Paraquat [en línea] Disponible en: <http://paraquat.com/spanish/banco-de-conocimientos/producci%C3%B3n-y-protecci%C3%B3n-de-cultivos/cultivo-de-ca%C3%B1a-de-az%C3%BAcar> [Consulta].*
- PLACERES, Y.: *EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES TECNOLÓGICOS – EXPLOTATIVOS y ECONÓMICOS DE LA COSECHADORA CAÑERA CASE IH AUSTOFT A 8000 EN LA UEB PERUCHO FIGUEREDO*, Ingeniería Agrícola, Marta Abreu De Las Villas, 2015.
- PRIETO, O.: *Estudio del desempeño ambiental del recurso suelo. Estudio de caso, Municipio Encrucijada*, Facultad de Química Farmacia, Universidad Central Martha Abreu de Las Villas, 2010.
- RODRIGUES, L. y J. VALENCIA: "Impacto del tráfico de equipos durante la cosecha de caña de azúcar (Saccharum officinarum)", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 16 1128-1136, 2012.
- RODRÍGUEZ, P.; J. PÉREZ y E. GONZÁLES: "Sistemas de cosecha de la caña de azúcar.", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. I 2002.
- RODRÍGUEZ, E.; I. ALFONSO; M. RODRÍGUEZ; R. GONZÁLEZ; F. ALFONSO; J. PÉREZ, et al. J. O'RELLY: "Sanidad de la caña de azúcar en Cuba:

- Resultados en 50 años", *Revista de Protección Vegetal*, vol. 30 149-149, 2015. ISSN:1010-2752.
- RODRÍGUEZ, M.: *Fundamentación del uso de rodaje por semiesteras en las cosechadoras cubanas de caña de azúcar para trabajar en suelos de mal drenaje con condiciones de alta humedad.*, Departamento de Mecanización Agrícola Universidad Central Martha Abreu de Las Villas 1999.
- ROSSI, G. A. M.; W. D. Z. LOPES; H. M. DE SOUZA ALMEIDA; V. E. SOARES; C. E. G. AGUILAR; A. M. C. VIDAL, et al. A. S. FERRAUDO: "Spatial distribution, prevalence and epidemiological risk factors of cysticercosis in cattle from state of São Paulo, Brazil, slaughtered for human consumption", *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, vol. 8 117-122, 2017. ISSN:2405-9390.
- RUBIO, A. M.: *LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA*. UNIVERSIDAD DE SEVILLA, 2010.
- SALAMANCA, A. y S. SADEGHIAN: *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelo de la zona cafetera colombiana*, pp 381-395, 2005.
- SÁNCHEZ, V.: *Dinámica y mecánica de Suelos.* , Isbn: 1996.
- SOLER, H.; H. PÉREZ y Y. BETANCOURT: Manejo sostenible de tierras en la producción de caña de azúcar. *En: Azúcar.*, G. A. A. I. d. I. d. I. C. d. (ed.). pp. 290. 2012.
- TOOHEY, R. C.; J. BOLL; E. S. BROOKS y J. R. JONES: "Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica", *Geoderma*, vol. 315 138-148, 2018. ISSN:0016-7061.
- VIDAL, E. y A. PAZ: EVOLUCIÓN DEL MICRORRELIEVE DE LA SUPERFICIE DEL SUELO MEDIDO A DIFERENTES ESCALAS. *En: Coruña.*, F. d. C. U. d. L. (ed.). pp. 2003.
- WANG, F.; G. YANG; W. KE y S. MA: "Effect of Sugarcane Chopper Harvester Extractor Parameters on Impurity Removal and Cane Losses", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51 (17): 292-297, 2018. ISSN:2405-8963.
- YIN, S.; Z. ZHU; L. WANG; B. LIU; Y. XIE; G. WANG y Y. LI: "Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22 (3): 1695-1712, 2018. ISSN:10275606 (ISSN).
- ZHENG, K.; J. HE; H. LI; H. ZHAO; H. HU y W. LIU: "Design and Experiment of Combined Tillage Implement of Reverse-rotary and Subsoiling", *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 48 (8): 61-71, 2017. ISSN:10001298.