

Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”



**FUNDAMENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE
DISEÑO DE ÓRGANOS PARA LA PREPARACIÓN
DE SUELOS, DESTINADOS A CAÑA DE AZÚCAR,
BASADOS EN LOS PRINCIPIOS DE LA BROCHA
MECÁNICA**

Roberto Amado Albóniga Gil (Autor); **Ciro E. Iglesias**
Coronel (Director)

Albóniga Gil, Roberto Amado (Autor)

Fundamentación de los parámetros de diseño de órganos para la preparación de suelos, destinados a caña de azúcar, basados en los principios de la brocha mecánica / Roberto Amado Albóniga Gil (Autor); Ciro E. Iglesias Coronel (Director). – La Habana: Editorial Universitaria, 2015. -- ISBN 959-16-2752-0.

1. Albóniga Gil, Roberto Amado (Autor)
2. Iglesias Coronel, Ciro E. (Director)
3. Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”
4. Ciencias Pedagógicas

Digitalización: Editorial Universitaria, torri@mes.edu.cu

- (c) Todos los derechos reservados: Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”, 2015.

Editorial Universitaria

Calle 23 entre F y G, No. 564.

El Vedado, Ciudad de La Habana, CP 10400,

Cuba



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
“FRUCTUOSO RODRÍGUEZ PÉREZ”
CENTRO DE MECANIZACIÓN AGROPECUARIA

**FUNDAMENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE ÓRGANOS PARA
LA PREPARACIÓN DE SUELOS, DESTINADOS A CAÑA DE AZÚCAR, BASADOS
EN LOS PRINCIPIOS DE LA BROCHA MECÁNICA**

**Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas
Agropecuarias.**

Autor: Ing. Roberto Amado Albóniga Gil.

Tutor: Prof. e Inv. Titular, Ing. Ciro E. Iglesias Coronel, Dr. C.

San José de las Lajas.

2013

AGRADECIMIENTOS

NO ME SENTIRÍA SATISFECHO SI OMITIERA EL NOMBRE DE ALGUNO DE LOS TANTOS QUE CONTRIBUYERON A QUE ESTE TRABAJO LLEGARA A SU FIN.

PREFIERO QUE CADA CUAL SIENTA MI AGRADECIMIENTO DESDE LO MÁS PROFUNDO DE MI CORAZÓN.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.

DEDICATORIA

**A IBLA GIL STINCER (27-6-1928 – 22-4-2013) MI
MADRE, QUE TANTO ME ALENTÓ Y NO PUDO VER
CULMINADO EL PRESENTE TRABAJO.**

SÍNTESIS

La presente investigación fundamenta teórica y experimentalmente los parámetros de diseño de órganos para un apero destinado a la preparación de suelos en caña de azúcar, basados en los principios de trabajo de la herramienta denominada brocha mecánica.

Se elaboró la base metodológica para la realización de la investigación en el Laboratorio Canal de Suelo. La experimentación se realizó en modelos a escala 1:2 acorde a la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento, que representan al modelo propuesto como “brocha agrícola” y al C-101XV en su diseño original, los que fueron evaluados en dos variantes roturando y dos roturando-surcando simultáneamente.

Al evaluar ambos modelos roturando estos cumplen con el perfil del surco acorde a la distribución geométrica de sus órganos de corte, obteniendo similar granulometría y una demanda energética de 3,56 % superior que en el C-101XV.

Los resultados roturando-surcando indican la superioridad del modelo propuesto al producir 85,28 % de fragmentos de suelo con dimensiones inferiores a 50 mm y la reducción de la resistencia traccional en 25,93 %, contra el C-101XV, por deteriorarse estos indicadores, al provocar la aparición de grandes fragmentos de suelo con dimensiones impropias para el tape de los esquejes de caña de azúcar.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I. LA PREPARACIÓN DE SUELOS PARA LA PLANTACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR	17
1.1 Importancia actual de la preparación de suelo para la caña de azúcar en Cuba.....	17
1.2 Tecnologías actuales de preparación de suelo para la caña de azúcar.	19
1.3 Análisis de los medios de preparación de suelo para la plantación de la caña de azúcar.....	22
1.4 Análisis de las investigaciones realizadas sobre el tema objeto de estudio.	31
1.5 Importancia de la experimentación de los medios de preparación de suelo en modelos a escala en canales de suelo.	40
Conclusiones parciales.....	42
CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA BROCHA MECÁNICA Y SU EMPLEO EN EL DISEÑO DE UN APERO DE PREPARACIÓN DE SUELOS	43
2.1 Fundamentos teóricos del maquinado de metales y su similitud con la roturación de suelos.	43

2.2 Factores a considerar en el diseño de la brocha mecánica.	44
2.3 Fundamentación de la aplicación teórica del principio de trabajo de la brocha mecánica a un apero agrícola.	47
2.4 Fundamentos de implantación de los criterios de diseño de la brocha mecánica a un apero para la roturación de suelos.	48
2.5 Fundamentos teóricos de los órganos que interactúan directamente con el suelo.	49
La cuña de dos caras.	49
La cuña de tres caras en el diseño de las saetas o cuchillas laterales.	53
El brazo escarificador.	56
Conclusiones parciales de los estudios teóricos.	57
 CAPÍTULO III. PROGRAMA Y METODOLOGÍAS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES.	58
3.1 Programa de las investigaciones experimentales.	58
3.2 Diseño y construcción de los modelos de las variantes a investigar.	60
3.3 Metodologías de las investigaciones experimentales.	62
3.4 Metodología para reproducir las velocidades del vehículo portaimplementos.	64
3.5 Metodología de creación de las condiciones experimentales en el canal de suelos.	66
3.6 Metodología para reproducir la humedad del suelo en el canal.	68
3.7 Metodología para reproducir la compactación del suelo en el canal.	69
3.8. Metodología para la preparación de la medición de fuerzas durante los ensayos.	70

3.9. Metodología de calibración de los brazos extensométricos.	72
3.10 Metodología para la realización de la medición de fuerza en los ensayos.....	74
3.11 Metodología para el registro de datos durante los ensayos.	75
3.12 Metodología para la determinación del perfil de suelo resultante.	75
3.13 Metodología para la determinación de la composición granulométrica del suelo.....	76
3.14 Metodología para el procesamiento y evaluación estadística de los ensayos.....	77
CAPÍTULO IV. RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES	79
4.1 Caracterización de las condiciones de realización de la investigación.	79
4.2 Caracterización del canal de suelos.....	80
4.3 Propiedades físico-mecánicas del suelo empleado en la investigación.	81
4.4 Programa experimental empleado en la investigación.	82
4.5 Resultados del diseño de la brocha agrícola para la preparación localizada de suelos destinados a caña de azúcar.....	83
4.6 Modelo experimental fundamentado a partir de la aplicación de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento.	89
4.7 Realización de los ensayos en el canal de suelos.	90
Velocidades obtenidas durante los ensayos.	90
Resultado de la obtención de la humedad durante los ensayos.....	91
Resultado de la compactación previa a los ensayos.....	92

4.8 Determinación de la calidad de labor de las variantes objeto de investigación.	94
Perfiles obtenidos por variantes.....	94
Variante I.....	94
Variante II.	96
Determinación de la granulometría en las variantes evaluadas.	100
Variante I.....	101
Evaluación de los fragmentos de suelo obtenidos >40mm ($F_{>40 \text{ Var I}}$).	104
Evaluación de los fragmentos de suelo ≤ 40 mm agrupados previamente.....	106
Variante II.	108
Evaluación de los fragmentos de suelo >40mm.....	110
Evaluación de los fragmentos de suelo ≤ 40 mm ($F_{<40 \text{ Var II}}$).	112
Determinación de la resistencia tractiva durante el corte del suelo en las variantes evaluadas.	114
Variante I.....	115
Variante II.	118
Comparación de la resistencia tractiva entre las Variantes I y II.	121
4.9 Evaluación comparativa entre la Variante III y Variante IV con surcador acoplado.	122
Perfiles obtenidos por variantes.	124
Variante III.....	124
Variante IV.....	126
Evaluación comparativa entre los perfiles generados por las Variantes III y IV.	127
Evaluación comparativa entre las granulometrías generadas por las Variantes III y IV.	128
Resultado de la resistencia tractiva en los ensayos de las Variantes III y IV.	130

4.10 Análisis de la evaluación comparativa entre las variantes estudiadas.....	131
Análisis de los resultados de la evaluación del perfil.	131
Variante I:	131
Variante II:	131
Comparación entre ambas variantes.	132
Análisis de los resultados de la evaluación de la granulometría.....	133
Entre las Variantes I y II.	133
Entre las Variantes III y IV.	134
Comportamiento de la resistencia tractiva en los ensayos realizados de las cuatro variantes objeto de investigación.....	134
CONCLUSIONES	136
RECOMENDACIONES	139
BIBLIOGRAFÍA	140
ANEXOS.....	169

INTRODUCCIÓN

“Una importante especie biológica está en riesgo de desaparecer por la rápida y progresiva liquidación de sus condiciones naturales de vida: el hombre”, alertó Fidel en su intervención en la "Cumbre de la Tierra", en Río de Janeiro, Brasil en el año 1992 (Castro, 1992). En esa reunión se analizaron los peligros que se avizoraban, como consecuencia del deterioro del Medio Ambiente, producto de la acción directa del hombre. Transcurridos veinte años de aquellas proféticas palabras, en una nueva cumbre, "Río más veinte" varios jefes de estado y gobierno hicieron referencia a esa histórica intervención alertando sobre los peligros cada vez más inminentes y la necesidad de la toma de conciencia por todos los habitantes del planeta. Uno de los aspectos más señalados fue el de la degradación de los suelos y la necesidad de su preservación.

En los “Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución” aprobados por el VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, en varios de ellos se hace referencia a la política agroalimentaria, la recuperación de la industria azucarera, a la política de Ciencia, Tecnología, Innovación y Medio Ambiente y la extensión de estos conceptos a la actividad científica de las universidades así como el énfasis en la conservación y uso racional de recursos naturales como los suelos y el agua. Esto demuestra la importancia que atribuye el Partido y el Gobierno a aspectos vitales de la economía cubana contemporánea.

La comunidad científica y la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) han sido promotoras de un cambio de paradigma en la agricultura, divulgando el empleo de diferentes tecnologías que proponen tratar al suelo con una óptica conservacionista. Se insta a evitar prácticas agresivas como el empleo de equipos pesados que

compacten excesivamente el suelo, su mullido hasta pulverizarlo, su desnudamiento y ataque con productos químicos (Gómez *et al.*; 1997; Derpesch y Friedrich, 2009).

Un porcentaje considerable del costo de producción agrícola y el mayor gasto total de energía corresponden a las labores de preparación del campo para la plantación, requiriéndose máquinas que lo simplifiquen y eleven la productividad, minimizando o eliminando los daños al Medio Ambiente. (Risueño, 1975; Domínguez y Fonseca, 1979; Gracia y Palau, 1983; Rodríguez, 1986; Martín *et al.*; 1987; Borgman, 1991b; Urbano, 1992; Márquez, 1996; Perfect *et al.*; 1996; Sánchez-Girón, 1996; Álvarez, 1997, 2000; Santana y Fuentes, 1998, 1999; Ortiz-Cañavate, 2003; Sharda y Singh, 2004; Sidhu *et al.*; 2004; Ríos *et al.*; 2006; Leyva, 2010; González 2011).

La tendencia mundial en el desarrollo de aperos para la preparación de suelos se ha encaminado a la creación de máquinas complejas capaces de realizar varias labores simultáneamente. Esta tendencia no ha tomado en cuenta las características de laboreo de suelos para la plantación de caña de azúcar. Se siguen utilizando, generalmente, aperos bajo los mismos principios tradicionales del disco y la vertedera como órganos de corte y la preparación de toda la superficie a plantar hasta la profundidad exigida. (Reyes, 1980; Herrera y Milanés, 2004; Pupo, 2005; González, 2007; Gil, 2008).

La preparación localizada de los suelos agrícolas consiste en laborar solo la franja donde se depositará la semilla, siendo el momento idóneo cuando el suelo alcanza la condición de tempero. En Cuba no puede esperarse ese estado para comenzar a preparar el suelo para la plantación, por resultar los períodos secos y lluviosos por lo general imprecisos, con un alto riesgo de incumplimiento de los planes de plantación. (INICA, 1986, 1987; Judice, 2005; IPROYAZ, 2006; Betancourt *et al.*; 2010; Betancourt, 2011)

Las tecnologías de laboreo sin inversión del prisma de suelo se basan en la aplicación de escarificadores que permiten acortar los períodos de labranza, lo que incrementa la

productividad y reduce el consumo de combustible, se favorece en suelos secos, compactados y con alto contenido de arcilla. (Suárez de Castro, 1965; Risueño, 1975; Gracia y Paláu, 1983; Cairo, 1985; Silveira, 1987; Córdoba *et al.*; 2005).

En Cuba, a partir de la década de los ochenta del pasado siglo comenzaron a extenderse tecnologías de laboreo mínimo, basadas en escarificadores con saetas. Se desarrollaron, por el antiguo Instituto de Investigaciones de Mecanización Agropecuaria (IIMA), los multiarados y se fueron generalizando sus aplicaciones a la preparación de suelos en caña de azúcar. (Bouza, 1981, 1996; Gutiérrez *et al.*; 2004; IIMA, 2006; Leyva *et al.*; 2007; Betancourt *et al.*; 2007).

En igual período surge el subsolador-descepador-surcador C-101, desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), el que obtuvo buenos resultados en suelos ligeros y medios, siendo capaz de reducir los costos hasta un 75 %, y de labrar la zona donde se encuentra el 80 % del sistema radicular de la planta (Córdoba *et al.*; 1997; Córdoba, 1999; Leyva, 1999; Cuba. INICA, 1997, 1998, 2007, 2012). Su uso estuvo restringido a las condiciones de los suelos arcillosos, necesitando generalmente acciones complementarias para alcanzar el lecho de plantación exigido (Pérez, y Pla, 1998; Leyva, 1999; Betancourt, 2007b; Quesada, 2010). El C-101, no obstante lo revolucionario de su principio, al generalizarlo a otros tipos de suelos, más pesados y con altos grados de compactación, no resultó tan alentador, limitando su empleo a operaciones independientes como subsolador o para surcar en campos previamente roturados, labor que realiza cumpliendo con la reproducción del perfil requerido por las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar (Cuba. INICA, 2007, 2012). Su principal deficiencia es producir un elevado porcentaje de fragmentos de suelo mayores de 50 cm, al realizar el corte del suelo compactado en solo dos escalones de 15 cm cada uno, además de no haber sido

evaluado previamente en otros tipos de suelos destinados a la plantación de la caña de azúcar. (Cairo *et al.*; 2001; Castillo, 2008).

El C-101XV fue una maqueta experimental diseñada por el INICA a partir de los principios de trabajo del C-101, no sustentada en una base científica, sino más bien práctica. En pruebas realizadas por sus creadores se lograron buenos resultados en la fracturación de un suelo Ferralítico rojo en labores de roturación. (Córdoba *et al.*; 1997). Al realizar un segundo pase sobre la propia hilera, que incluía la conformación del surco, este no cumplía completamente con las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar, motivado por la aparición de grandes terrones de suelo, la falta de uniformidad en el perfil y profundidad del surco para la plantación y el incremento de consumo energético por el tractor. Las deficiencias principales de este apero radicaban en la disposición y dimensiones de sus órganos de corte por lo que se precisa de una investigación para determinar la acción más efectiva sobre el suelo, con incremento de la calidad de la labor con menor consumo energético.

De la misma manera que existe una fresadora agrícola, con su principio de funcionamiento basado en la fresadora mecánica, es posible investigar la trasposición del principio de trabajo de otra herramienta, la brocha mecánica, que mediante la colocación de cuchillas de forma consecutiva sobre un soporte, incrementa por escalones la profundidad y el ancho de labor, logrando acabados de calidad y disminución del consumo energético frente a otras herramientas de uso tradicional realizando la misma función. Una investigación de este tipo permitiría pronosticar el perfil del suelo a lograr mediante la disposición de los órganos de corte en un apero, de forma que se ajuste a las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar. (ASABE, 2006; Barber, 2006; Blanco, 2007; Leyva, 2010; Betancourt, 2011; Albóniga *et al.*; 2011).

Los suelos ferralíticos, altamente productivos, ocupan el segundo lugar en extensión y rendimientos agrícolas en Cuba. La llanura Habana-Matanzas es el mayor asentamiento en el país de estos suelos y en ella se ubica geográficamente Mayabeque, macizo y provincia del mismo nombre, donde se hallan las Unidades Empresarial de Base (UEB) “Héctor Molina”, “Osvaldo Sánchez” y “Boris Luís Santa Coloma”, dedicadas al cultivo de la caña de azúcar. En la actualidad, esos suelos presentan altos niveles de compactación que, junto a otros factores objetivos, han provocado la disminución de los rendimientos agrícolas (IPROYAZ, 2006). Esto hace necesario la búsqueda de órganos de corte capaces de enfrentar el problema, que garanticen una calidad de labor que cumpla con las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar en este tipo de suelo, con menor consumo energético en su preparación para la plantación. Por todo lo antes planteado, se concibe la presente investigación, con el diseño metodológico siguiente:

Objeto de investigación: Órganos de trabajo para el laboreo de suelos, basados en el principio de funcionamiento de la brocha mecánica, que cumplan con las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar en un suelo Ferralítico rojo.

Problema científico: ¿Cómo fundamentar los parámetros de diseño de los órganos de trabajo de un apero para laboreo mínimo, en suelo Ferralítico rojo, basado en múltiples brazos escarificadores con saetas, colocados de forma consecutiva variando sus dimensiones en profundidad y ancho de trabajo de forma escalonada?

Hipótesis de trabajo: Aplicando el principio de funcionamiento de la brocha mecánica a los órganos de trabajo para laboreo mínimo de un apero, constituidos por rejas con saetas, se logra el cumplimiento de las exigencias agrotécnicas en la preparación del suelo para la plantación de la caña de azúcar.

Objetivo de la investigación: Fundamentar teóricamente y mediante su evaluación experimental las dimensiones y la disposición de los órganos de corte de un apero de roturación de suelos bajo el principio de funcionamiento de la brocha mecánica.

Tareas de la investigación

1. Fundamentación de la vinculación de los principios de la Teoría de la Brocha Mecánica y las bases teóricas de diseño de los órganos que interactúan con el suelo, empleados en los aperos para su preparación para la plantación de caña de azúcar.
2. Elaboración del programa y bases metodológicas de diseño de los modelos en dimensión natural y de las investigaciones experimentales en el canal de suelos en base a la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento aplicada a los modelos a escala.
3. Determinar el cumplimiento de las exigencias agrotécnicas de la preparación de suelos para la plantación de caña de azúcar mediante la evaluación de los modelos creados a partir del C-101XV y el propuesto en la investigación.
4. Determinación de la resistencia traccional de los modelos estudiados.

Novedad científica: El empleo de los principios de corte de la brocha mecánica en el diseño de un apero de preparación de suelos, cumpliendo las exigencias agrotécnicas del cultivo en cuestión y preceptos de Agricultura de Conservación, aplicados a la plantación de caña de azúcar, así como la propuesta de bases para el establecimiento de una nueva tecnología para la preparación de suelos para la plantación de caña de azúcar en un suelo Ferralítico rojo.

Actualidad del tema objeto de investigación: Está en concordancia con la tendencia mundial de la preparación de suelos hacia el laboreo mínimo y de conservación, así como con los “Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución”, redundando en los incrementos de los rendimientos de la cosecha y en la disminución de los gastos energéticos respecto de la totalidad del proceso de preparación de suelos, y mejorar la conservación de los mismos.

Aplicabilidad práctica: Existe el diseño del apero propuesto y, por su simplicidad, las condiciones para la fabricación de un prototipo para su experimentación en condiciones reales con la posibilidad de crear una nueva tecnología de preparación de suelos para la plantación de la caña de azúcar, reduciendo las labores respecto a las tecnologías actuales.

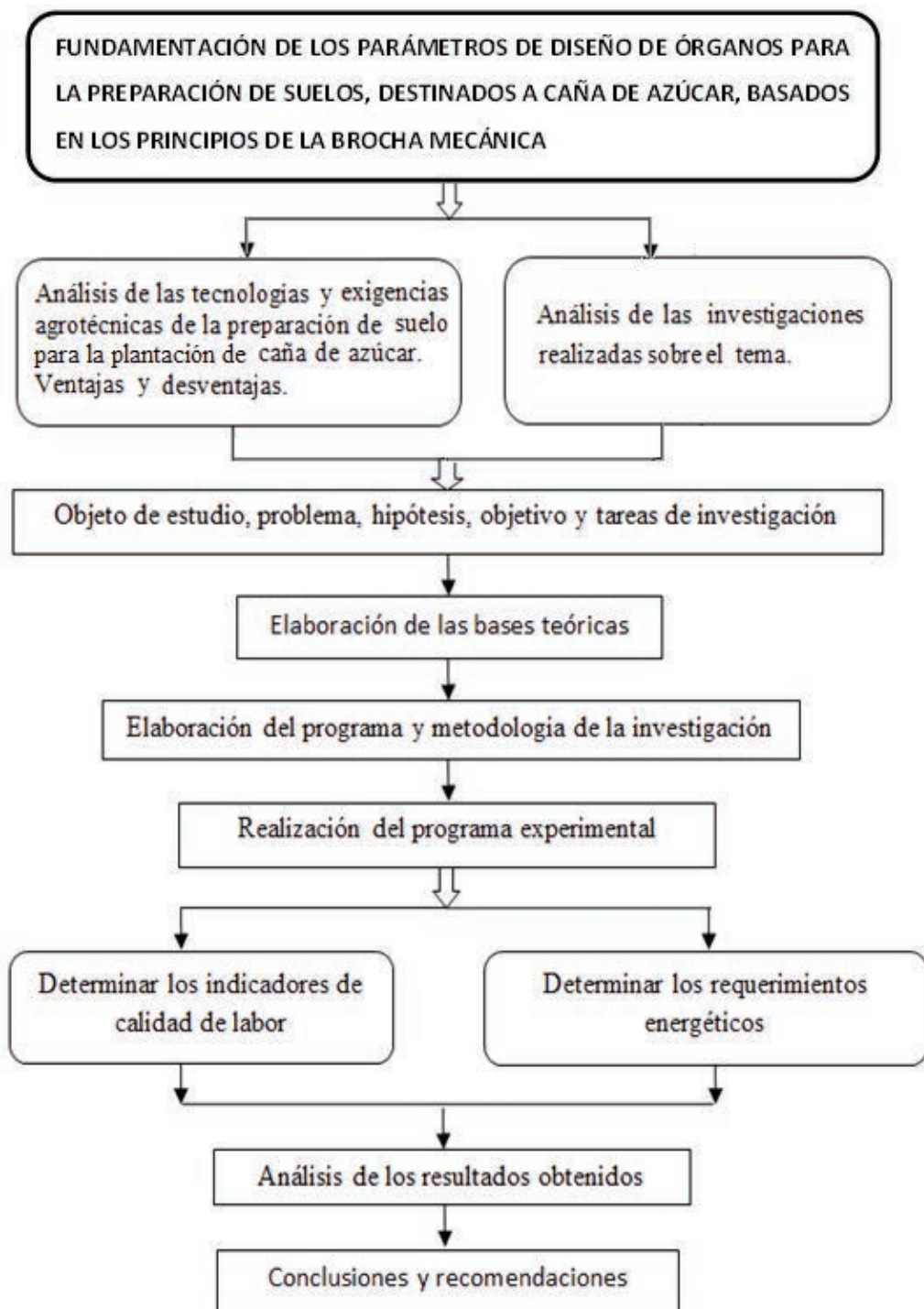


Figura 1. Esquema lógico estructural de desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO I. LA PREPARACIÓN DE SUELOS PARA LA PLANTACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

1.1 Importancia actual de la preparación de suelo para la caña de azúcar en Cuba.

El VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, aprobó los “Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución”, documento rector de la actividad del país para los próximos años, donde se refleja el papel protagónico que representa el azúcar en la economía cubana. Al respecto, el Lineamiento 79 expresa: “Ampliar y consolidar los mecanismos de protección de precios de los productos que se cotizan en bolsa y que Cuba comercializa (níquel, azúcar, petróleo, café, entre otros), como una vía para proteger los niveles de precios planificados” y en su Lineamiento 84, “Garantizar la sostenibilidad del ciclo de producción de los renglones exportables y diseñar la organización de los esquemas correspondientes para esto”. Quedando evidenciada la necesidad de recuperar y ampliar los niveles de producción de azúcar para satisfacer las demandas nacionales y de exportación. En tal sentido, varios de estos Lineamientos, haciendo referencia a la industria azucarera, indican: “la agroindustria azucarera tendrá como objetivo primario incrementar de forma sostenida la producción de caña”; al referirse a la política agroalimentaria, se indica: “elevar los rendimientos agrícolas”; “incrementar la productividad del trabajo”; “desarrollar una agricultura sostenible en armonía con el Medio Ambiente”. Como vía de implementación, en el propio documento rector, al hacer referencia a la Política de Ciencia, Tecnología, Innovación y Medio Ambiente, se destaca: “la combinación de investigación científica e innovación tecnológica, desarrollo rápido y eficaz de nuevos productos y servicios”; “extender estos conceptos a la actividad científica de las universidades”; “sostener y

desarrollar investigaciones integrales para proteger, conservar y rehabilitar el Medio Ambiente y adecuar la política ambiental a las nuevas proyecciones del entorno económico y social”; “priorizar estudios encaminados al enfrentamiento al cambio climático y, en general, a la sostenibilidad del desarrollo del país”; “enfaticar la conservación y uso racional de recursos naturales como los suelos y el agua”; “las entidades económicas en todas las formas de gestión contarán con el marco regulatorio que propicie la introducción sistemática y acelerada de los resultados de la ciencia, la innovación y la tecnología en los procesos productivos”. En su conjunto, demuestra la importancia que atribuye el Partido y el Gobierno a aspectos vitales tanto de la economía cubana, como la necesaria implementación de estos Lineamientos para lograr un desarrollo sostenible en armonía con el Medio Ambiente.

El azúcar de caña está entre los productos agrícolas de mayor demanda a nivel mundial, por su alto valor energético y combinado con la harina de trigo, el chocolate o muchos otros, resultan una combinaciones muy demandadas por millones de consumidores. Es uno de los cultivos más extendidos en el mundo, en más de cien países de las regiones tropicales y subtropicales, no sólo por su producto principal, el azúcar, sino también por sus derivados y subproductos. Es fuente de energía renovable y un medio de contrarrestar el efecto invernadero (del Toro, 1986; Gómez, 1999; Cuellar et al.; 2002; Barber, 2006; Derpsch y Friedrich, 2009). Durante muchos años, fue la base económica de nuestro país, y en la actualidad se encamina su recuperación, para ocupar el lugar preferente que tuvo en el mundo junto al tabaco y el ron cubano (MINAZ, 2004; Brizuela et al.; 2006; MINAZ, 2008; Manso, 2008; Leyva, 2009; Betancourt, 2011).

Para lograr la recuperación de los niveles de producción de años anteriores y reducir las áreas que estaban destinadas a este cultivo se requiere un incremento sustancial de los rendimientos, solo alcanzable combinando muchos factores y donde la preparación de los campos para la plantación desempeña un papel protagónico. Solo con una correcta preparación de los campos

para la plantación se puede lograr, que los esfuerzos posteriores que se realicen al plantar, tapar el esqueje, regar y realizar el resto de las labores culturales que se requieren, den como resultado una plantación sana y resistente durante varios años, con altos rendimientos.

1.2 Tecnologías actuales de preparación de suelo para la caña de azúcar.

Desde tiempos inmemorables la actividad agrícola se caracterizó por el empleo de la tracción animal como única fuente energética disponible y la preparación de los campos para la siembra se fue adecuando a las condiciones naturales de cada región geográfica basada en la experiencia transmitida de generación en generación. Con el surgimiento del motor de combustión interna y los primeros tractores no existieron cambios en los conceptos de preparación, solo en los medios que incrementaran la productividad, dando lugar a la aparición de los aperos agrícolas que durante años se fueron perfeccionando y generalizando en los campos: arados de disco, vertedera y gradas, como los mostrados en la Figura 1.1, ejecutando las operaciones de: roturación, gradeo y cruce del campo, con un espaciamiento entre labores de 10...15 días con repetidos pases de dichos aperos hasta lograr la profundidad requerida y mulción total del suelo, antes de realizar el surcado para la plantación.



Figura 1.1. Aperos tradicionales para la preparación del suelo.

a) Arado de discos; b) Arado de vertedera; c) Grada pesada.

Los sistemas de preparación de suelos más empleados en el mundo hasta la década del 80 del pasado siglo fueron: el sistema tradicional propiamente dicho; Del Pelo Pardi; Especial; Luisiana y laboreo mínimo, como una variante de adaptación de los anteriores, mediante el empleo de similares aperos realizando menos operaciones (Santana et al., 1999; Leyva et al.;

2007b) estos sistemas de preparación del suelo fueron ensayados y modificados en nuestro país, acorde a las transformaciones que se buscaban en los sistemas de plantación según requerimientos de la mecanización para la cosecha (Norton,1979; del Toro,1986; Ortiz,1989; Brizuela et al.; 2006; Betancourt et al.; 2007b).

El laboreo mínimo en su versión actual, busca reducir el número de operaciones mediante la utilización de tecnologías con visión conservacionista, uso racional de la maquinaria existente y dar paso al empleo de nuevos aperos que tengan como principio básico la cuña simple y limitar la utilización del disco o la vertedera, por sus efectos nocivos de compactación, traslado e inversión del prisma de suelo. De conjunto con las nuevas propuestas tecnológicas en la preparación de suelo surgen nuevas definiciones en ese campo. En dependencia del área de acción de los aperos utilizados en la preparación parcial se emplean los términos de preparación localizada si los órganos de trabajo actúan únicamente en la franja a preparar, o semi-localizada cuando alguno de los equipos influye parcialmente sobre el resto del área (Velarde et al.; 2010). La tecnología de preparación localizada, además de las ventajas antes mencionadas, tiene otras particulares como el uso más racional de la energía, al labrar una parte del terreno que no sobrepasa al 50 % del área a plantar y, al quedar los espacios entre hileras firmes, se aprovecha mejor la fuerza de tracción de los tractores, respecto a aquellos que laboran toda la superficie teniendo que desplazarse sobre un terreno promovido (Gómez et al.; 1997; Vidal et al.; 1998; Santana et al.; 1999; Córdoba, 1999; Cuellar et al.; 2003; Velarde y Rodríguez, 2007).

El laboreo en franjas, como lo plantean los preceptos de la Agricultura de Conservación, es aplicable a muchos cultivos (Borgman, 1991; Almarales, 1998; Córdoba, 2005; Blanco, 2007) y puede ser perfectamente empleado en la preparación de los campos para la plantación de la caña de azúcar, laborando sobre las propias hileras existentes. Cuando se va a eliminar una plantación que sus rendimientos no son los adecuados, pueden ser empleados aperos de

labranza que con menos operaciones logren la profundidad adecuada, las dimensiones de fragmentos de suelo, que favorezcan el crecimiento de las plantas sin ser fácilmente erosionables y dañen menos la integralidad del suelo. Resulta perfectamente aplicable cuando estos campos presentan un buen drenaje y no requieren labores de nivelación, no siendo necesario retirar la cobertura del suelo y comenzar las labores de preparación a partir de la eliminación de las cepas vivas que permanezcan en el campo (Bouza, 1996; Cairo et al.; 2001; Fernández et al.; 2004; Barber, 2006).

Independientemente de las terminologías y los conceptos surgidos, se tiende a aplicar los principios que se basan en el laboreo mínimo, buscando eliminar los perjuicios de la preparación tradicional del suelo en lo tecnológico, económico y de conservación de los recursos naturales (Piard, 1992; Sánchez, 1996; Bouza, 1996; Pérez y Pla, 1998; González, 1998; Torres y Villegas, 1998; Santana y Fuentes, 1999; Braunack, 2000; Villegas, 2000; García et al.; 2000; Rebolled y Gómez, 2000; Fernández et al.; 2004; Gutiérrez et al.; 2004; Alt, 2005; Judice, 2005; Córdoba et al.; 2005; Barber, 2006; Ortiz y Rössel, 2007; Betancourt et al.; 2007c; Blanco, 2007).

En caña de azúcar se debe garantizar: laboreo a la profundidad exigida, que no queden cepas vivas, suficiente suelo promovido para el desarrollo del esqueje, tamaño adecuado de los fragmentos de suelo para el tape y que esté listo en el momento requerido (Bucman y Brandy, 1967; Humber, 1973; Mateo, 1996; Norton, 1987; Muñiz, 1998; Rojo, 1999; Álvarez, 2000; Pérez, 2005; IIMA, 2006; Barahona, 2007; INICA, 2007; Leyva et al.; 2007b; Zinck, 2005; Mónico, 2007).

En la actualidad, pese a la experiencia acumulada y los resultados de más de 15 años de experimentación con aperos que trabajan bajo el principio del corte horizontal del suelo, en condiciones de producción, se mantienen indistintamente como tecnologías a aplicar la labranza total, localizada y mixta o semi-localizada (Gómez et al.; 1997; García, 1997; Leyva,

1999; Luna, 2004; MINAZ, 2004; Castillo, 2008; INICA 2012) manteniéndose la primera bajo el principio antes explicado de tecnología tradicional, disminuyendo operaciones y combinado con aperos de laboreo mínimo, independientemente que se invierta o no el prisma de suelo, es decir, comenzando los trabajos con la preparación total hasta una profundidad de 15...20 cm, culminando el proceso con medios de laboreo localizado y realizar el surcado simultáneamente: preparación localizada si los órganos de trabajo actúan únicamente en la franja a preparar, mixta o semi-localizada, que combina medios de ambos tipos de labranza cuando alguno de los aperos influye parcialmente sobre el resto del área, como ocurre con la combinación del escarificador C-101 y la grada mediana de discos (Velarde et al.; 2010; INICA, 2007b; 2009; 2012).

1.3 Análisis de los medios de preparación de suelo para la plantación de la caña de azúcar.

Con la introducción de la cosecha mecanizada en Cuba, se comienzan a apreciar las afectaciones que esta producía sobre el suelo, dando lugar a investigaciones, para evaluar la magnitud de los daños que se ocasionaban. Sin embargo, no es hasta finales de la década del '70 y principios de los '80 del pasado siglo, que se aprecia una intensificación de las investigaciones en esa dirección, con el propósito de reducir labores, estudiar el efecto de los neumáticos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, determinar los daños ocasionados por la quema de caña, al suelo y a las cepas de las plantas de caña de azúcar; estos estudios incluyeron los órganos de los aperos de preparación de suelos, buscando soluciones tecnológicas en función de los factores degradantes a las áreas cañeras (Domínguez y Fonseca, 1979; Reyes, 1980; INICA, 1986, 1987; Norton, 1987).

Las principales desventajas y daños acumulativos, ocasionados a largo plazo por el empleo de las tecnologías tradicionales, además de las ya apuntadas, son: destrucción de la micro fauna, pérdida de humedad y liberación de carbono a la atmósfera en forma de CO₂ (Arzola, 2004;

Reicosky y Saxton, 2007; Márquez, 2008) reducción del intercambio hídrico y gaseoso por el incremento de la compactación y creación de un piso de aradura limitando la permeabilidad del suelo. Como resultado, se tienen la baja productividad de los conjuntos en las operaciones por excesivos pases, los elevados costos de producción que terminan afectando al suelo y el rendimiento del cultivo. (Martín et al.; 1987; Campos y Fernández, 1979; Borgman, 1991a; Álvarez, 1997, 2000; González, 1998; Hernández y Bouza, 1998; Cuellar et al.; 2002; Alt, 2005; Ortiz y Rössel, 2007).

Por ser la tecnología que se utilizaba para la preparación de los campos, antes de introducir la mecanización en la cosecha de la caña de azúcar en Cuba, y que no difería de la existente en el mundo, el desarrollo de aperos de preparación de suelos para la plantación de caña de azúcar se basó en los modelos ya existentes en el país, surgiendo los primeros arados de discos integrales genuinamente cubanos, nombrados ADI-3 y ADI-4 (Arado de Disco Integral) Figura 1.2, atendiendo al número de discos, siendo el primero el más difundido, y con ligeras modificaciones constructivas se ha mantenido en producción hasta la actualidad, por su alta demanda, al requerir una fuente energética menor y coincidir con el tipo de tractor de mayor existencia en Cuba (Ortiz, 2003; Sotto et al.; 2006).



Figura 1.2. Arado ADI-3 de producción nacional.

a) Versión inicial en plena labor; b) Versión actual modernizada.

Trabajos posteriores se encaminaron a desarrollar variados aperos como gradas, subsoladores y otros para los diferentes tipos de atenciones culturales, siempre respondiendo a la tecnología tradicional de preparación de suelos.

Estas investigaciones se ampliaron hasta el estudio de los órganos de trabajo de aperos para el laboreo profundo y la interacción de los órganos con el suelo, en especial la cuña y los brazos para subsoladores y escarificadores, utilizando los avances científicos y medios técnicos existentes en el mundo, que estuvieran al alcance. En tal sentido se realizaron ensayos en condiciones reales, con el empleo de la extensometría y otras técnicas, como simulación mediante maquetas experimentales y canales de suelo (Lombard, 1973; Velarde, 1975; Norton, 1979; Cárdenas, 1982).

En Cuba, hasta el momento en que se comenzó a utilizar variantes adaptadas de laboreo mínimo se empleaba la tecnología tradicional descrita anteriormente (Guzmán y Ruíz, 1984; Rodríguez, 1986; citados en Leyva, 2010 y Betancourt 2011). La Norma NRAG 047:78, aún vigente, instruye la preparación de suelos para caña de azúcar, al referirse a las dimensiones del surco, establece entre los factores de mayor importancia: profundidad de labranza, que se debe fijar entre 30...40 cm; el suelo “mullido” y libre de “crudos”; que se logren más del 85 % de fragmentos de suelo menores de 50 mm en el fondo del surco; paredes de los surcos en forma de V, con ángulos de talud que eviten el desprendimiento de fragmentos de suelo que afecten la estabilidad de la profundidad del surco durante la plantación y la ausencia de cantidades significativas de fragmentos mayores de 150 mm, tanto en el surco, como en la superficie del camellón. La citada Norma responde a la tecnología tradicional de preparación de suelo, basada en el laboreo intensivo y el exceso de mulción, no coincidiendo con los principios considerados en la actualidad por la Agricultura de Conservación y sin ser actualizada como documento rector, han sido emitidos durante años instructivos para los diferentes procesos de preparación del suelo para la plantación (Álvarez, 1997; INICA, 2007; Rodríguez et al.; 2007). A partir de estos principios, Olivet (2010) propone el tamaño de fragmento óptimo entre 20...50 mm; mientras otros autores consideran este rango entre 10...50 mm (Russell, 1968; Leyva y

Parra, 2001; Leyva et al.; 2007a) , infiriendo que los fragmentos menores de 10 mm son propensos al arrastre por el agua y el viento (Cairo, 1985; Duran ,1996; Friedrich, 2003, INICA,2007; Betancourt et al.; 2007a; Leyva,2010; Betancourt, 2011).

El desarrollo de aperos destinados a la preparación de suelos para la plantación de caña de azúcar en Cuba continuó, en función de otras labores, dando lugar a la aparición de los primeros subsoladores de la serie Bayamo; que debieron competir con una gran variedad de aperos de diferentes tipos, marcas y países que se introdujeron en Cuba, con diferentes grados de aceptación, acorde a su comportamiento en las variedades de suelos existentes y sus respectivas características. Con la puesta en marcha de la fábrica de implementos agrícolas “Mártires del 26 de Julio” en la provincia de Holguín, en los años finales de la década de los '70 del pasado siglo, se estabilizó la producción de varios de estos aperos. No obstante, los centros de investigación y universidades vinculadas a la agricultura, cañera y no cañera continuaron las investigaciones y el desarrollo de nuevos aperos, ya con una visión más avanzada de mejoramiento constructivo y conservación de los suelos, siguiendo la tendencia mundial pero acorde a nuestras potencialidades de capacidades energéticas de los tractores y constructivas de las fábricas y talleres.

A mediados de los años '80 aparece el primer apero de diseño cubano para el laboreo en franjas con visión conservacionista. Diseñado por los investigadores del INICA se fabrica el primer prototipo del descepador-escarificador-surcador denominado C-101 (Figura 1.3), capaz de realizar la operación de corte de la cepa, mediante un disco corta paja situado como primer órgano de trabajo, seguido por un primer brazo escarificador de tipo curvo, con una reja en su extremo inferior y saetas a ambos lados, que realizan la fragmentación del suelo conjuntamente con el corte del sistema radicular y desprendimiento de la cepa a eliminar. A continuación, un segundo brazo también con saetas laterales, pero de menor ancho, fracturan el suelo a mayor profundidad. Este segundo brazo posee en su parte posterior una serie de

orificios verticales para la sujeción de un surcador, que se coloca en posición de trabajo en un segundo pase del apero por la misma hilera, para la conformación del surco. En ambos lados de la estructura le fueron colocadas ruedas para el control de la profundidad de labor.



Figura 1.3. Descepador-escarificador-surcador C-101.

a) Vista general; b) Laborando en suelos con baja compactación; c) Con órgano desterronador; d) Con órgano zanjeador.

Este apero (Figura 1.3a), al ser evaluado inicialmente, reportó buenos resultados en suelos con bajos niveles de compactación y humedad apropiada (Figura 1.3b) (INICA, 1997; Córdoba, 1999), esto facilitó su rápida introducción en producción, por su bajo nivel de complejidad de fabricación. Su posterior comportamiento en suelos compactados no dio los resultados esperados, al no cumplir con las exigencias agrotécnicas requeridas para la plantación de la caña de azúcar, dejando excesiva cantidad de terrones mayores de 50 cm. Este apero, ampliamente difundido en la agricultura cañera, no es utilizado para lo que fue concebido como descepador, al no lograr la calidad de trabajo requerida, al producir un bajo porcentaje de desterronamiento, siendo entonces empleado como surcador en campos previamente roturados con tecnología tradicional o mínima de preparación del suelo. Como vía de solución a esta dificultad, se trabajó en el diseño de aditamentos que mejoraran la calidad, incorporándole rodillos desterronadores (Figura 1.3c). En posteriores desarrollos, buscando una mayor versatilidad, se diseñaron surcadores para plantación en doble hilera, marcadores, zanjeadoras (Figura 1.3d) y badeneras. En diferentes zonas geográficas del país le realizaron modificaciones acordes a los requerimientos del lugar (Betancourt et al., 2007b; Leyva, 2009; Quesada, 2010). Como solución para resolver el problema del desterronamiento y tomando

como base el propio C-101, se creó el C-102 (Figura 1.4), donde se sustituía la ubicación del disco corta paja y el primer brazo descepador por una fresadora agrícola (Gómez et al.; 1997).

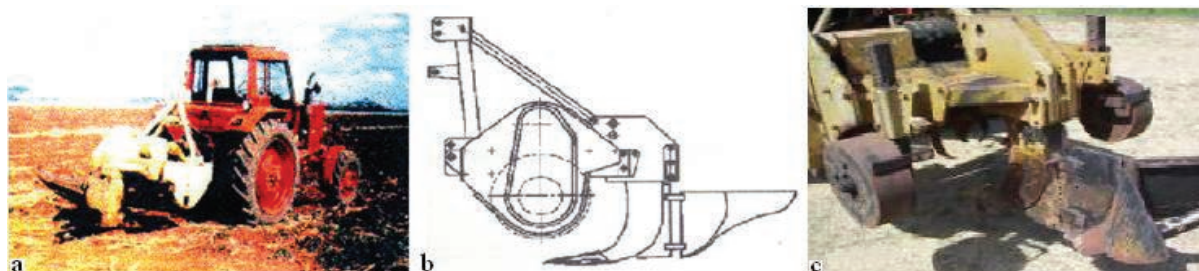


Figura 1.4. Aperos C-102.

a) Laborando en el campo; b) Esquema funcional; c) Vista posterior.

En la Universidad de Granma se creó con similares características, pero para trabajar sobre dos hileras de caña, la multilabradora UDG-3,2 (Figura 1.5) (Leyva et al.; 2007). Ambas con similar principio de trabajo, labranza localizada sobre la hilera de la vieja plantación, combinando fresadora, escarificador y surcado en uno o dos pases, ambos se clasificaron dentro del grupo de máquinas complejas, fueron fabricadas como prototipos y evaluadas con resultados aceptables de calidad de labor.



Figura 1.5. Multilabradora UDG-3,2.

A pesar de que la multilabradora UDG-3,2 en la zona oriental de Cuba, incrementó la productividad en $0,87 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$, disminuyó el gasto de combustible y los costos en $70,5 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$ y $83,00 \text{ peso} \cdot \text{ha}^{-1}$ respectivamente, con respecto al empleo de las tecnologías utilizadas hasta ese momento, empleando aperos tradicionales con los tractores de estera DT-75 y Komatsu (Leyva, 2009). Estos aperos presentan como limitación su alto costo de fabricación y su elevada complejidad constructiva, razón por la que no han sido, en las condiciones actuales,

asimilada su producción por la industria mecánica cubana, limitando las posibilidades de haber sido extendido su uso en los suelos pesados.

A finales de los años '80, el IIMA realizó el desarrollo de subsoladores con saetas para el corte del sistema radicular de la vegetación indeseable, denominándolos “Multiarados” (Figura 1.6), desarrollados en un inicio para cultivos menores y posteriormente, extendiendo su uso a caña de azúcar. (Silveira, 1990; MAG-FAO, 1996; Santana et al.; 1999; MINAZ, 2001b; Cuellar et al.; 2002b; INICA, 2007a).



Figura 1.6. Diferentes modelos de multiarados para labores en caña de azúcar.

Sobre la propia línea de diseño del C-101, descartando su función como descepador, se crea el surcador C-103, para un suelo previamente trabajado con una grada ligera que removiera la capa superficial del campo como muestra la Figura 1.7a, dentro de la concepción de labranza localizada, para suelos con baja compactación y posteriormente pasar el surcador C-103, mostrado en la Figura 1.7b y que aparece en la Figura 1.7c con una representación de la disposición de los esquejes de caña de azúcar en el surco generado.



Figura 1.7. Tecnología de preparación del campo con el empleo del C-103.

a) Grada ligera en función de acondicionamiento superficial del suelo; b) Vista lateral del surcador C-103; c) C-103 surcando.

Dando continuidad a los desarrollos sobre la base del C-101, a finales del primer quinquenio del presente siglo se crea la maqueta C-101XV, también nombrado en ocasiones C-104, mostrada en la Figura 1.8, concebida de modo experimental para laboreo en franjas, realizando las operaciones de descepe, roturación y surcado en uno o dos pases, de acuerdo a las condiciones de compactación y humedad del campo, compuesto por un disco corta paja, seguido de cuatro brazos con iguales dimensiones, colocados uno detrás del otro, provistos cada uno de cuña con saetas a ambos lados e iguales dimensiones, buscando realizar cortes consecutivos de forma escalonada hasta lograr la profundidad deseada. En un segundo pase, al último brazo se acopla un surcador que realiza la labor final de conformación del surco.

Esta maqueta, pese haber logrado un nivel de fragmentación del suelo acorde a las exigencias agrotécnicas para la siembra de la caña de azúcar en el primer pase, por realizar el corte del suelo en cuatro escalones de forma consecutiva hasta lograr la profundidad exigida, no pasó de la fase experimental por cuestiones inherentes a su diseño, pues la profundidad de labor dependía de la inclinación del bastidor que impusiera el operador del tractor, por tener todos los brazos similares dimensiones y por consiguiente no mantener los ángulos de incidencia de las cuñas y saetas con el suelo de modo apropiado. Además, realizando la labor de surcado no mantenía uniformidad en la profundidad del surco ni en la geometría exigida, generaba un elevado porcentaje de terrones de dimensiones superiores a los requeridos, lo que no garantizaba el tape de los esquejes e incrementaba considerablemente la resistencia tractiva.



Figura 1.8. Maqueta experimental C-101XV

Las deficiencias presentadas no fueron analizadas sobre el principio de trabajo de la propia maqueta, sino que se trató de buscar la solución a las deficiencias modificando el surcador, sin llegar a una solución acertada, no continuando con su desarrollo. Sin embargo, la fracturación del suelo obtenida como resultado del incremento del número de brazos, constituye un punto de continuidad para el desarrollo de nuevas investigaciones, dirigidas al diseño racional y creativo, sobre bases científicamente sustentadas de los órganos de trabajo para un apero que garantice la calidad de la preparación de suelos en franjas, reduciendo considerablemente el número de operaciones a realizar, respecto a las tecnologías actualmente empleadas.

En otras regiones del país se realizaron también modificaciones constructivas al C-101 para adaptarlo a las condiciones específicas del lugar. Al norte de la provincia de Villa Clara, por existir un alto nivel freático en áreas destinadas a plantaciones de caña de azúcar, se emplea la tecnología de plantación en canteros, lo que invierte la geometría de conformación del surco respecto a la generalmente empleada en la mayoría de las áreas para este cultivo. La modificación consistió en cambiar la disposición en ancho de las saetas respecto a las originales, realizando cortes de menor a mayor de forma escalonada y reducir la altura de los escalones de 15 cm a 10 cm e incorporar un tercer brazo con saetas para mantener la profundidad de 30 cm en la profundidad del surco (Betancourt et al., 2007b, c, d; 2010).

En las recomendaciones propuestas en la Tesis de Doctorado “*Escarificación localizada primaria para el perfeccionamiento de la tecnología de preparación de suelos arcillosos pesados con superficie acanterada dedicados a la caña de azúcar*” se propone analizar la posibilidad de incorporación de un cuarto brazo escarificador para lograr un mejor resultado en la fragmentación del suelo (Betancourt, 2011).

1.4 Análisis de las investigaciones realizadas sobre el tema objeto de estudio.

Buscar una explicación científica al comportamiento de la fracturación del suelo, ha sido objeto de estudio de un gran número de hombres de ciencia durante varios siglos. De sus trabajos han surgido diferentes modelos que involucran la relación esfuerzo-deformación, con el interés de buscar una explicación al comportamiento del suelo, bajo la acción de las fuerzas generadas al interactuar con él. No fue precisamente por la agricultura que se iniciaron estos estudios, el obstáculo mayor se encontró en la construcción de castillos y fortalezas, cuando estos no podían ser contruidos sobre roca sólida. Fue precisamente bajo estas condiciones que Charles Coulomb presentó sus estudios en 1776 sobre el comportamiento del suelo y sus características desde el punto de vista mecánico, al considerar que el suelo es un medio continuo, que falla por donde en forma natural surgen las mayores tensiones, que son las de corte. Coulomb se limitó a usar la teoría de equilibrio, considerando un bloque de terreno como un cuerpo libre para determinar la presión lateral limitante (Figura 1.9).

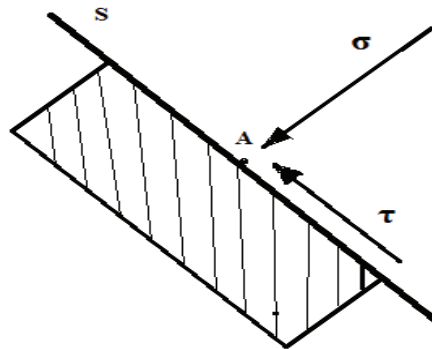


Fig. 1.9. Esquema tensiones producidas en un elemento del suelo.

Esta presión en fallo a tracción o compresión, la propuso a partir de las ecuaciones de los coeficientes para presiones activas y pasivas, denominándolos K_a y K_p respectivamente, determinando un ángulo de rozamiento característico de cada suelo y la inclinación del talud natural que se produciría respecto a la horizontal. Este ángulo de rozamiento lo identificó por

la letra griega ϕ y representa, el valor por el cual se van a producir las principales tensiones de fracturación del suelo.

La teoría de Rankine, desarrollada en 1857, simplifica a la propuesta por Coulomb en la solución a un campo de tensiones, para predecir las presiones activas y pasivas del terreno. Esta solución considera que el suelo está cohesionado y tiene una superficie que está friccionando el plano de rotura, en este caso sería una superficie plana y la fuerza resultante paralela a la superficie libre del talud. Manteniendo que ϕ es el ángulo de rozamiento del suelo y la inclinación del talud que se crea respecto a la horizontal como el ángulo β .

$$k_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - (\cos^2 \beta - \cos^2 \phi)^{\frac{1}{2}}}{\cos \beta + (\cos^2 \beta - \cos^2 \phi)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.1)$$

$$k_p = \cos \beta \frac{\cos \beta + (\cos^2 \beta - \cos^2 \phi)^{\frac{1}{2}}}{\cos \beta - (\cos^2 \beta - \cos^2 \phi)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.2)$$

El estado tensional del sólido en el momento de la fractura viene definido por una función del tipo $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$, donde σ representa las tensiones normales. Esta relación es el criterio de rotura, y es propio de la estructura de cada material. Para lograrlo, sólo es posible, por medios experimentales. Mediante ensayos de laboratorio, se obtienen una serie de círculos que representan el estado tensional del material en el momento de la rotura, en los ejes σ y τ . En términos físicos, si un círculo de Mohr (Figura 1.10) para estados particulares de esfuerzo, yace enteramente por debajo de la envolvente, el material está en condiciones estables. Si el círculo de Mohr toca la envolvente, la resistencia máxima ha sido alcanzada, es decir, la falla ha ocurrido en un plano determinado.

Según la teoría de Mohr, el material se puede estirar o se romperá cuando la tensión de corte σ_ϕ en el plano de rotura alcance un determinado valor, que depende de la tensión normal σ_n que actúa sobre dicho plano, o bien, si la tensión principal máxima de tracción alcanza el

valor de la resistencia a la tracción τ_0 . La representación gráfica del círculo de Mohr para materiales elásticos se muestra en la figura 1.10a). Como resultado se obtiene la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, representado de forma gráfica en cada uno de los círculos de Mohr, así como, de la recta ajustada.

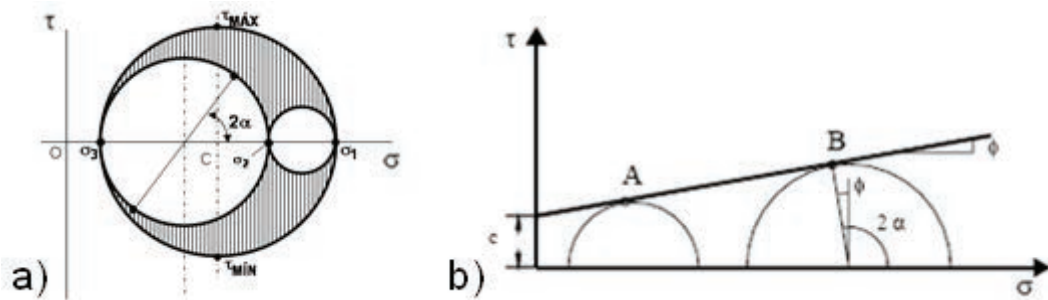


Figura 1.10. Representación del círculo de Mohr.

a) Comportamiento de un material elástico; b) Comportamiento plástico del suelo.

El criterio de Mohr-Coulomb plantea que la rotura en un plano se produce cuando la tensión de corte alcanza el valor dado por:

$$\tau = c + (\sigma \cdot \tan \phi) \quad (1.3)$$

Siendo:

τ -resistencia al corte del suelo; c -parámetro que mide la cohesión del suelo; σ -tensión normal sobre el plano de falla; ϕ -ángulo de rozamiento interno.

La elección del criterio de Mohr-Coulomb ha permitido asegurar dentro del modelado una buena aproximación al comportamiento real del suelo y a la vez goza de una amplia aceptación, debido a su simplicidad y uso en la mayoría de las aplicaciones prácticas de la Mecánica de Suelos. (Terzaghi, 1943; Paine, 1956; Hettiaratchi y Reece, 1967; Gill y Glen, 1968; Juárez y Rico, 1969; Lade, 1977; Sowers y Sowers, 1979; Tarragona, 1985; Hettiaratchi, 1987; Cárdenas, 1992; Sánchez Girón, 1995; Karmakar y Kushawaha, 2003; Keller, 2004; Kachanov, 2004; Kim et al.; 2004; Kimato et al.; 2004; Ibarra et al.; 2005; Karmakar et al.; 2005; Herrera, 2006).

A partir de la teoría de Mohr-Coulomb se desarrollan una serie de modelos analizando el comportamiento del suelo bajo la acción de diferentes superficies, planas o curvas, así como el efecto de los ángulos de incidencia y la relación que se establece por el contacto de diferentes materiales entre ambas superficies.

Otro modelo que tiene sus orígenes en estudios anteriores al siglo XX es el Método de la Espiral Logarítmica sobre el plano, basado en las teorías de Coulomb y Rankine, propuesto por Terzaghi en 1925. Este método fue concebido para el cálculo de muros de contención en la ingeniería civil y posteriormente utilizado por investigadores en la relación suelo-herramienta con fines agrícolas (Terzaghi, 1959). Como todos los métodos que lo precedieron y que fueron originalmente desarrollados para la evaluación de cargas en suelos en ingeniería civil, siendo con posterioridad usado extensivamente en el cálculo de la resistencia del suelo en herramientas de roturación (Reece, 1965; Hettiaratchi y Reece, 1967, 1974; Hettiaratchi et al.; 1996).

Los primeros resultados de investigaciones, que se reportan sobre la interacción entre herramienta de trabajo y el suelo con interés agrícola y aplicando la teoría de Mohr-Coulomb, fueron realizados por el profesor Vasili Prokhorovich Goriachkin en 1935, aplicándolo al estudio de la interacción suelo-máquina en el diseño de órganos para aperos agrícolas (Figura 1.11) y dio origen a la formulación de la ecuación racional que lleva su nombre.

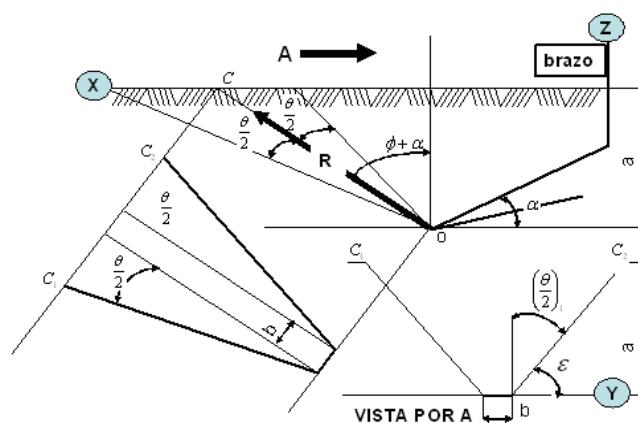


Figura 1.11. Modelo propuesto por Goriachkin.

Esta ecuación, con total validez en la actualidad, rige la variación de la fuerza de tracción de los aperos de preparación de suelo y fue formulada para el cálculo de la resistencia general que ofrecen estos durante la labor, involucrando los tres términos que la caracterizan: resistencia no útil provocada por el peso del apero al friccionar sobre el suelo ($f \cdot G$); requerimiento traccional útil empleado durante el laboreo del suelo ($K_d \cdot a \cdot b$), y gasto de energía cinética del apero durante el movimiento relativo entre ambos ($\epsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$). Estos términos se representan mediante la denominada “Ecuación Racional de Goriachkin” representada como:

$$P_G = f \cdot G + K_d \cdot a \cdot b + \epsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2 \quad (1.4)$$

Donde: f -Coeficiente de fricción de los elementos del arado contra el suelo; G -Masa del arado, N; K_d -Coeficiente de resistencia específica del suelo a la deformación por el órgano de trabajo, Pa; a -Profundidad de labor o espesor del prisma de suelo, m; b -Ancho de prisma de suelo enfrentado por la cuña, m; ϵ -Coeficiente de resistencia que depende de la forma de la superficie de trabajo del apero, $N \cdot s^2 \cdot m^{-4}$; v -Velocidad de trabajo del arado, $m \cdot s^{-1}$.

Gran parte de los modelos desarrollados posteriormente (Figura 1.12) se realizaron sobre la base de modelos estáticos.

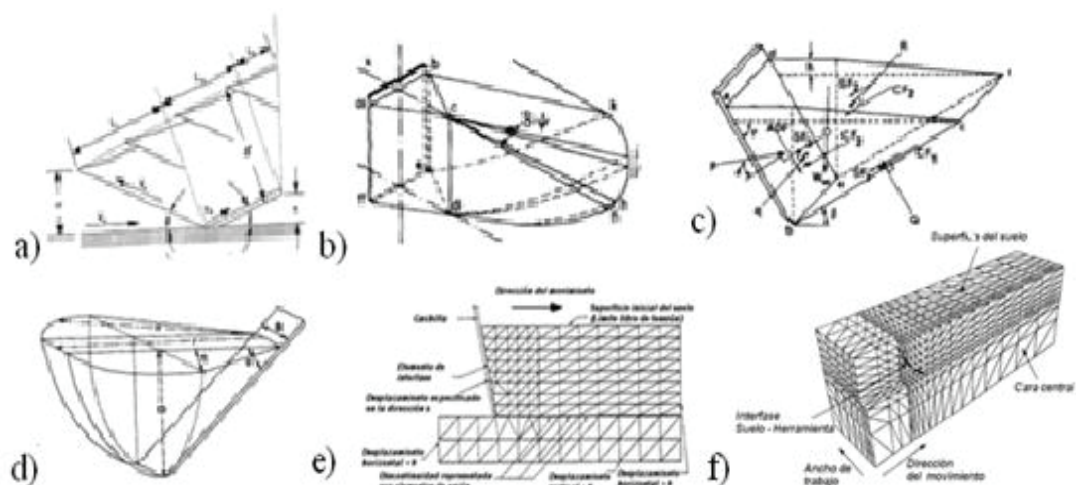


Figura 1.12. Diferentes modelos para analizar el comportamiento del suelo por la acción de la cuchilla del apero.

a) Söhne, 1956; b) Paine, 1956; c) Prumpral, Grisso y Dessai, 1987; d) Godwin y Spoor, 1977; e) Yong y Hanna, 1977; f) Chi y Kushwaha, 1990.

Los estudios de Söhne (1956), Payne (1956), O'Callaghan y Farrelly (1964), Hettiaratchi y Reece (1967) y las modificaciones propuestas a este modelo por Grisso y Perumpral (1985) y Godwin y Spoor (1977) investigan las fallas del suelo con arados, proponiendo que se asuma la falla del suelo en dos regímenes por separados: una falla creciente sobre una profundidad crítica y dos fallas laterales bajo dicha profundidad. Mc Kyes (1985) incluye en la ecuación los valores del ángulo de fricción interna del suelo y del ángulo de fricción suelo-metal. Además, resulta la primera propuesta de tratamiento de los cálculos en un programa para computadora. El programa fue desarrollado para minimizar la fuerza P y determinar en el plano de fallo el ángulo β mostrado en la Figura 1.13.

Swick y Perumpral (1988) proponen un modelo del corte donde se incluyen los efectos dinámicos. A este modelo de fallo del suelo, similar al propuesto por Mc Kyes y Ali (1977) se le adiciona el efecto de la fuerza de aceleración por concepto de la velocidad de operación y la de gravedad. Además, a partir de las observaciones realizadas, proponen considerar un ángulo η que representa los lados crecientes extendidos a ambos lados, como función de la distancia de ruptura que se proyecta delante de la cuña y el ángulo de cizallamiento.

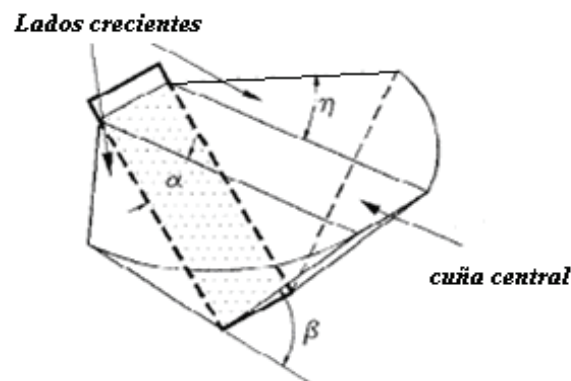


Figura 1.13. Modelo propuesto por Swick-Perumpral.

Con el incremento de las posibilidades de la computación, los estudios teóricos sobre fragmentación del suelo han dado paso a la aplicación del Método de los Elementos Finitos. Los primeros trabajos de aplicación de este método al estudio de la interacción suelo-metal

lo realizan Yong y Hanna en 1977. Ellos proponen un método para determinar teóricamente el comportamiento del suelo bajo la acción de una cuchilla de corte plana. El continuo incremento de las potencialidades de las computadoras permitió elaborar modelos en tres dimensiones, diferentes formas de representar los fragmentos de suelo y obtener un mayor acercamiento al comportamiento real del suelo ante la acción del órgano de trabajo (Chi et al.; 1993). En Cuba, Herrera (2006) aplicando el propio método presentó su tesis doctoral “Simulación del comportamiento mecánico de los suelos Ferralíticos rojos mediante el Método de Elementos Finitos”, tomando como métodos comparativos para su evaluación los de Drucker Prager y Mohr–Coulomb.

Otras investigaciones realizadas, sobre el tema objeto de estudio, son las referentes a las características comunes de los suelos cubanos destinados al cultivo de la caña de azúcar. Estos suelos son plásticos y compactos, por poseer alto porcentaje de arcilla, lo que incrementa su resistencia mecánica según el contenido de humedad que posea y muy susceptibles de incrementar esta compactación por la acción mecánica de los equipos que transitan sobre él. Esto ha ocasionado que en la actualidad exista en los campos una alta compactación de estos, a lo que se unen otros factores como la erosión y la pérdida de materia orgánica (García de la Figal, 1978; MINAZ, 2002; Barber, 2006; ASABE, 2006, 2006b, 2006c, 2006d; BB, 2008, 2008b; González, 2011).

Con el interés de reducir el nivel de deterioro de los campos se ha recurrido a buscar soluciones con la aplicación de métodos conservacionistas, obteniéndose buenos resultados en algunas regiones del país, siendo aún insuficientes, siguiendo el principio del laboreo mínimo y los primeros intentos laborando solamente la franja a sembrar. Con esta operación se logra minimizar el número de labores, demostrándose sus beneficios y ventajas, al obtener reducciones de gastos totales hasta un 50 % en caña de azúcar. Varios investigadores reportaron incrementos de producción y no hallaron diferencias adversas con la aplicación del

laboreo mínimo (Córdoba et al.; 1997; Santos Gómez, 1997; Espinosa, 1980 y Zuaznábar, 1986 citados en Córdoba, 1997; Pérez, 1998; Pupo et al.; 2004; CONAB, 2006; Betancourt et al.; 2007a; Betancourt et al.; 2007b; Leyva, 2009; Mena et al.; 2010; Ramírez et al.; 2010).

Los aperos de labranza vertical, desde el punto de vista de la reducción de consumo de energía, representan una opción de menor costo para la preparación de suelos (Hoogmoed, 1994; Cadena et al.; 2004). En ese sentido, Hernanz y Sánchez-Girón (1998) plantean que en los sistemas de laboreo mínimo, la labranza primaria con apero de acción vertical permite reducir, para una misma profundidad de trabajo, el gasto de energía un 30 % en comparación con los medios tradicionales de discos y de vertederas.

En investigaciones realizadas por Suárez et al.; 1991; Córdoba et al., 1997, se obtuvo incrementos de dos veces la productividad de los equipos evaluando los resultados obtenidos en la agricultura cañera cubana con la aplicación de labranza localizada donde estaba ubicada la cepa anterior, reportando impactos productivos en las provincias de La Habana, Cienfuegos, Las Tunas y Santiago de Cuba, con ahorros de recursos superiores al 50 % respecto a las tecnologías tradicionalmente usadas y un incremento de los rendimientos de no menos de 10 t/ha, atribuible a condiciones mejores en el lecho de plantación; coincidiendo con lo recomendado por Betancourt et al., 2009, de aplicar el laboreo localizado en la hilera de la plantación anterior donde el porcentaje de materia orgánica es superior en 0,52 % y el contenido de fósforo asimilable es superior en 1,29 mg/100 g en suelos arcillosos pesados.

Betancourt et. al.; 2007b al comparar el laboreo localizado respecto al laboreo mínimo total, necesitó 2,07 h/ha menos, con ahorros en el consumos de combustible y en el costo total de la preparación de suelo de 28 L/ha y 46,77 peso/ha respectivamente, dejando el área lista para el acanterado con un mes de anticipación. El propio autor refiere además, que el laboreo localizado alcanza población y rendimiento significativamente superior, con valores de 7 320 tallos/ha y de 9,21 t/ha respectivamente.

Ramírez et al., 2010 concluyó que la variante de laboreo mínimo en la que solo se realiza descepe y surcado en una misma labor es un método de preparación de suelo más eficiente que la preparación por el método tradicional, en la que se realiza: rotura, cruce, pase de grada y surcado tradicional, obteniendo ahorro de 120,97 peso por cada 13,42 ha y período de trabajo más corto, aportando, como resultados relevantes la reducción del tiempo de plantación y un notorio ahorro de combustible, contribuyendo a su vez al mejoramiento y conservación del suelo. En estudios similares Pupo et al.; 2004 estudiaron una tecnología de laboreo mínimo (descepe de la caña con el C-101, grada y surcado con C-101), comparándolo con el tradicional, en que se utilizaba al tractor sobre esteras DT-75 como tractor base de la clase traccional 30 kN; como resultado, el gasto de combustible fue de 48,71 y 97,61 L/ha, respectivamente, ahorrando 48,9 L/ha con C-101, mientras que el costo fue de solo 31,74 peso/ha, con la tecnología de laboreo mínimo y 75,95 peso/ha con la tradicional, ahorrándose 44,21 peso/ha en comparación con la primera.

Mena et al., 2010 observaron que desde el punto de vista de la calidad, que la preparación de suelo en franja, empleando métodos conservacionistas para el cultivo de la caña de azúcar, reduce los costos y el impacto ambiental con la mejora de los suelos.

Leyva en 1998 evaluando el mullido y el perfil del suelo descompactado por los aperos C-101 y multiarados en suelo Ferralítico rojo, utilizado en caña de azúcar y tomando como parámetro de referencia, los terrones mayores de 50 mm, reportó el 46 % del total con un solo pase. El propio Leyva, 2009, usando tecnologías de laboreo mínimo con escarificador combinado C-101, con todos sus órganos obtuvo 66,8 % y en tecnología de descepe con el propio equipo solamente el 61,8 %, resultados que de forma general afectan el surcado y cubrimiento del esqueje, no garantizando las condiciones requeridas para la preparación de suelo en franja en solo dos pases.

Las investigaciones realizadas han demostrado las ventajas de la utilización del laboreo mínimo en la preparación del suelo para la plantación. La acción directa de los elementos de corte del suelo para la preparación sólo la reportan Leyva, (2009), con las diferentes ubicaciones de los elementos de corte en la multilabradora UDG-3,2 sin modificar los parámetros geométricos ni dimensiones de los mismos.

Una investigación más profunda referente al comportamiento del suelo Ferralítico, fue la evaluación de su comportamiento mecánico y la interacción suelo-metal y suelo-suelo en la que se determinaron los coeficientes para diferente humedad y compactación, así como un análisis de los diferentes modelos que analizan la interacción herramienta-suelo (Herrera et al.; 2001a, 2001b; Herrera, 2006).

1.5 Importancia de la experimentación de los medios de preparación de suelo en modelos a escala en canales de suelo.

No se puede pretender que el diseño de un apero dado, pueda tener similar comportamiento en todos los tipos de suelos ante la acción del órgano de corte, lo que está determinado por factores muy variables donde intervienen la composición, densidad, contenido de humedad del suelo entre otros y el diseño de los órganos que interactúan con el mismo.

La experimentación en condiciones naturales resulta altamente compleja y costosa quedando siempre un factor de incertidumbre por la variabilidad de los parámetros que caracterizan las condiciones de evaluación.

Desde hace muchos años, se ha comprobado que la experimentación de proyectos ingenieriles resulta ventajosa mediante la creación de modelos físicos a escala, por las ventajas que representa poder crear condiciones experimentales estables para valorar su comportamiento según un diseño de realización de los ensayos.

Los modelos creados a partir de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento permiten definir el comportamiento de un modelo antes de ser construido en su verdadera magnitud y

obtener su respuesta como base para la ejecución del modelo a crear, evidenciado por su empleo y confianza depositada por las industrias espacial, aeronáutica, civil, naval, automotriz y de construcción de maquinaria, también utilizado ampliamente como método de validación de resultados obtenidos mediante el Método de Elementos Finitos (Olson y Weber,1966; Rodríguez, 1981; Rajaram y Erbach,1991; Wang y Gee-Clough,1993; Quinsin y Shuren,1994; Durán, 2000, 2001a, 2001b).

Conjuntamente con la elaboración del modelo debe existir un medio capaz de reproducir las condiciones naturales a que se enfrentará el objeto en cuestión. Para ello, se han creado túneles de viento, canales de agua para la evaluación de embarcaciones o plataformas que pueden imitar las magnitudes de terremotos. A partir de la década del '40 del siglo pasado se han desarrollado canales de suelo para la reproducción de las condiciones de este en laboratorio (Figura 1.14). (Vaden, 1967; Reeves, 1968; Kraptin, 1971; Iglesias y Herrera, 2001; Martínez de la Calle, 2004; Ibarra, 2005; Upadhyaya, 2006; Herrera, 2006; González, 2011).

Estos constituyen una herramienta muy eficaz en investigaciones para determinar los parámetros racionales de diseño y/o trabajo, que garanticen la calidad de labor de aperos de labranza (Pope, 1971; Saperstain y Franklin, 1971; Siemens, 1973; Bonn, 1973; Johnson, 1973; Luth, 1974 citados en Moreno, 1993; Wang y Gee-Coughed, 1991; Quinsin y Shuren, 1994; Durán, 2000; Ibarra, 2001).



Figura 1.14. Canales de suelo desarrollados en los años cincuenta para la evaluación de aperos y órganos de trabajo a escala natural y reducida.

El desarrollo de los canales de suelo alcanza niveles significativos, logrando ser reconocidos como medios para la investigación de herramientas en el área de mecánica de labranza y tracción (Vaden, 1967; Pope, 1971; Saperstain y Franklin, 1971; Siemens, 1973; Bonn, 1973; Johnson, 1973; Luth, 1974; citados en Moreno, 1993; Durán, 2001; Ibarra, 2001, 2005).

Conclusiones parciales.

De lo anterior se puede concluir que:

1. Los aperos de preparación de suelo disponibles en el país, no cumplen con los principios de trabajo propios de la Agricultura Conservacionista, ni garantizan en todos los casos, el cumplimiento de las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar;
2. Para lograr la conservación de los suelos, la mejora de sus propiedades físico-químicas-biológicas y el crecimiento sostenible de la producción azucarera en Cuba, se deben eliminar tecnologías inapropiadas de preparación del suelo para la plantación;
3. Se requiere fundamentar un apero que requiera menos operaciones, para lograr las condiciones propicias a la plantación de la caña de azúcar para su desarrollo en óptimas condiciones, con el menor consumo energético posible, que cumpla con sus exigencias agrotécnicas y que puedan ser producidos por la industria mecánica cubana;
4. La disposición científicamente fundamentada de los órganos de trabajo en el escarificador, puede constituir un elemento importante en la búsqueda de una solución racional para el laboreo en franjas en caña de azúcar y hacerlo extensivo a otros cultivos.
5. Es procedente concentrar la atención de investigaciones hacia los órganos que interactúan directamente con el suelo, utilizando las técnicas de vanguardia en la evaluación de modelos a escala y la utilización de canales de suelo para la experimentación, técnica que está científicamente fundamentada y sus ventajas están demostradas en Cuba y el mundo.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA BROCHA MECÁNICA Y SU EMPLEO EN EL DISEÑO DE UN APERO DE PREPARACIÓN DE SUELOS

2.1 Fundamentos teóricos del maquinado de metales y su similitud con la roturación de suelos.

El proceso de maquinado de metales tiene sus bases en el principio de arranque de virutas. El proceso de formación de la viruta, es un complejo fenómeno físico-mecánico, con un comportamiento no lineal, desde el punto de vista material y geométrico (Rodríguez, 2001) éste proceso está caracterizado por las siguientes etapas:

Compresión del material de la pieza por la acción de la herramienta de corte, con altos valores de deformación plástica y alta razón de deformación; Surgimiento de una zona de cizallamiento con fractura; Deslizamiento del material sobre la superficie de ataque de la herramienta, con superficies en contacto y fricción entre ellas.

Las investigaciones sobre el proceso de maquinado en metales comenzaron casi simultáneamente con la aparición de las primeras máquinas-herramientas. Los primeros trabajos que intentaron explicar el fenómeno de la formación de la viruta, fueron realizados en 1870 y 1873 respectivamente por Time y Tresca. El primero que sugirió la importancia del efecto de la fricción entre las superficies de contacto de la herramienta y la formación de viruta fue Mallock (1881) relacionando la característica de estas con los diferentes materiales que la generan. El modelo de corte ortogonal para caracterizar la herramienta de corte de metales, propuesto por Ernest y Merchant (1945), como el mostrado en la Figura 2.4a, y el principio de la cuña en su acción con el suelo de la Figura 2.4b Söhne (1956), presentan una gran similitud en su modo de análisis. Se caracterizan por tener un solo borde cortante, el desplazamiento de la pieza, (o del suelo) es ortogonal a dicho borde y la viruta fluye por la superficie de la herramienta. Esto significa que todo el análisis puede hacerse en el plano que contiene los dos vectores de desplazamiento. La mayoría de los trabajos de modelación se han

basado en este caso, donde están contenidos todos los elementos del proceso de corte real, lo mismo para metales que para el suelo (Rodríguez, 2001).

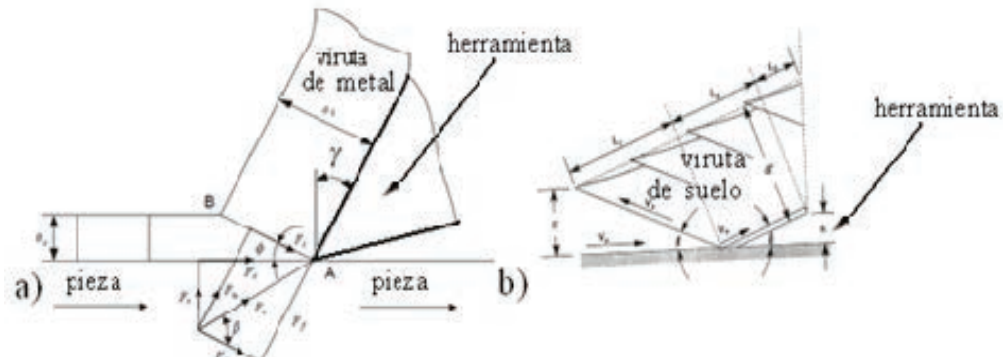


Figura 2.1. Similitud en el método de análisis entre el corte de metales y suelo.

a) Modelo de corte ortogonal en metales, propuesto por Ernest y Merchant (1945); b) Modelo de la acción de la cuña sobre el suelo propuesto por Söhne (1956).

Al colocar varias cuchillas de forma consecutiva incrementando progresivamente la profundidad realizando cortes ortogonales, se logra la geometría deseada y un acabado superficial de muy buena calidad. Esta herramienta recibe el nombre de brocha mecánica y al proceso de operación brochado. La acción de esta herramienta es definida por Alvarado:

“El brochado es el proceso de elaboración de metales con arranque de virutas utilizando la herramienta llamada brocha, la cual está formada por cuchillas múltiples transversales, montadas sobre una barra, con un aumento gradual de las dimensiones de estas. El perfil y las dimensiones de las cuchillas cambian gradualmente de tal manera que la primera tiene la forma de la superficie a elaborar y la última, la forma y las dimensiones de la superficie ya elaborada” (Alvarado y Marinov, 1985:220).

2.2 Factores a considerar en el diseño de la brocha mecánica.

La operación de brochado en metales es muy rápida, exacta y deja un acabado de buena calidad, puede ser utilizada para acabados interiores o exteriores, siendo las segundas las de interés analizar para este trabajo. La brocha es diseñada para una labor específica, lo que determina sus dimensiones y material a emplear. Cada diente debe cumplir los mismos requisitos de resistencia y disposición de cualquier cuchilla destinada al corte de metales.

Para el diseño de las brochas hay criterios que resultan determinantes en la calidad de la labor a realizar: El paso de los dientes, profundidad de corte por diente, ángulo de incidencia o de cara, ángulo de salida, ancho de la superficie de salida, profundidad de los dientes, y radio de redondeado del fondo del diente (Figura 2.2).

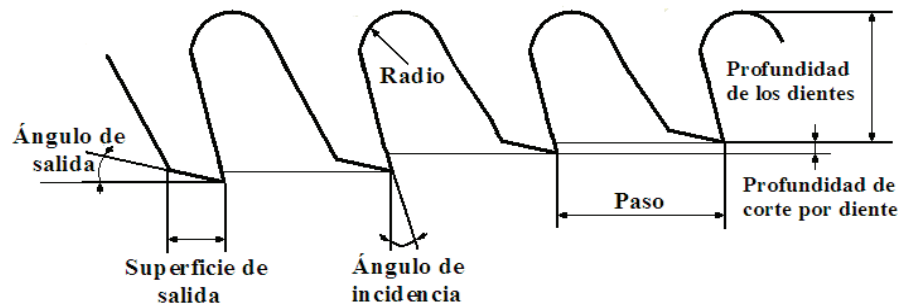


Figura 2.2. Parámetros fundamentales considerados en el diseño de la brocha mecánica.

El paso entre dientes depende de la profundidad del corte o grueso de la viruta a producir, longitud a cortar, fuerza de corte requerida y potencia de la máquina de brochar. La profundidad de corte se basa en la factibilidad de maquinado del material a laborar y representa la diferencia en altura de los dientes sucesivos, aunque, en algunos casos, el paso y la longitud de corte pueden variarse para reducir la fuerza de empuje; el ángulo de incidencia o de cara favorece el desprendimiento de la viruta y puede variar considerablemente para los diferentes materiales, mientras que el ángulo de salida reduce el efecto de fricción entre la pieza y la brocha posterior al corte. La superficie de salida se escoge a fin de obtener una conformidad adecuada entre la resistencia del diente y el espacio para almacenar la viruta.

La profundidad de los dientes, se ha establecido de forma experimental y en base a la experiencia, y suele variar unos 0,37...0,40 del paso. El radio de redondeo del fondo del diente, tiene la función de recipiente para virutas entre dientes, debiendo ser redondeado para reducir el esfuerzo de cada diente de la brocha.

Otro criterio de diseño es el ángulo de corte, su inclinación correcta garantiza obtener un corte de cizalla que proporcione una acción de corte más suave y una superficie más acabada. El ángulo de corte usualmente varía de 10...25°.

Los dientes de la brocha tienen frecuentemente unas ranuras o rompe virutas, como su nombre lo indica, para romper las virutas a intervalos a lo largo de su filo cortante, reduciéndose así la presión de corte y el esfuerzo de la brocha.

Para calcular la longitud total de la brocha, luego que se ha determinado la profundidad de corte por diente, se divide la cantidad total de material que se ha de arrancar con la brocha por la profundidad de los dientes, y así se tiene el número total de dientes activos necesarios (Oberg y Jones, 1962; Montaner, 1966; Alvarado y Marinov, 1985; Rodríguez, 2001; Albóniga et al.; 2011).

A pesar de la relativa baja velocidad de corte en el brochado ($1,5...2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) el proceso resulta muy productivo y con altísima calidad. El avance por diente es un valor muy importante en la construcción de las brochas; depende del esquema de corte, de las propiedades del material y de las exigencias de acabado de la superficie a laborar. Para garantizar un buen acabado, el avance, debe estar en una relación:

$$R_a = 1 \dots 2 \mu \quad (2.1)$$

Siendo: μ -índice de rugosidad del material a laborar.

A menudo el paso de los dientes se coloca de forma irregular, gracias a lo cual se evitan vibraciones en el trabajo y la superficie brochada se obtiene con mejor acabado.

Un factor importante en el diseño de la brocha es la comprobación de la resistencia de los dientes. La tensión en flexión se calcula por la fórmula:

$$S = \frac{P_z}{F_{min}} \leq S_{adm}, \text{ Pa} \quad (2.2)$$

Dónde: P_z - componente axial de la fuerza de corte, N; F_{min} - en el área de la sección más peligrosa (usualmente en el primer diente de corte), N; S_{adm} - tensión admisible a la flexión, (depende del material de la brocha) MPa.

La fuerza componente principal P_z se puede calcular por la fórmula siguiente:

$$P_z = pS_z B Z_{max}, N \quad (2.3)$$

Siendo: p -fuerza específica de corte por mm^2 de la viruta arrancada, N; S_z -tensión de avance por diente, Pa; B -ancho de la viruta arrancada por un diente, m; Z_{max} -número máximo de los dientes que se encuentran simultáneamente trabajando, número.

2.3 Fundamentación de la aplicación teórica del principio de trabajo de la brocha mecánica a un apero agrícola.

Los estudios y la experiencia acumulada en el diseño y utilización de la brocha mecánica en el conformado de metales y la ampliación de su empleo a otros materiales, inducen a pensar en la posibilidad de extender su principio de funcionamiento a un apero para la preparación del suelo para la plantación de caña de azúcar, considerando muchos de los conceptos básicos que intervienen en su diseño. A partir del principio de funcionamiento de las máquinas fresadoras, se llegó al diseño de la fresa agrícola, es posible bajo los fundamentos de funcionamiento de la brocha mecánica, poder establecer una transición entre un subsolador con saetas para labores profundas y el multirado, que su labor es superficial, introduciendo tantos escalones de corte como sean necesarios (Figura 2.3). De esa forma se logran reducir las dimensiones de los terrones o virutas de suelo a lograr, hasta crear una fragmentación del mismo aceptable para la plantación, con una profundidad adecuada, sin requerir ninguna operación de roturación previa. A diferencia de la fresa agrícola, este apero no requiere un suministro adicional de energía, solo el demandado para tracción, el cual debe reducirse

considerablemente, si se compara con un subsolador trabajando a la misma profundidad (Albóniga et al.; 2011).

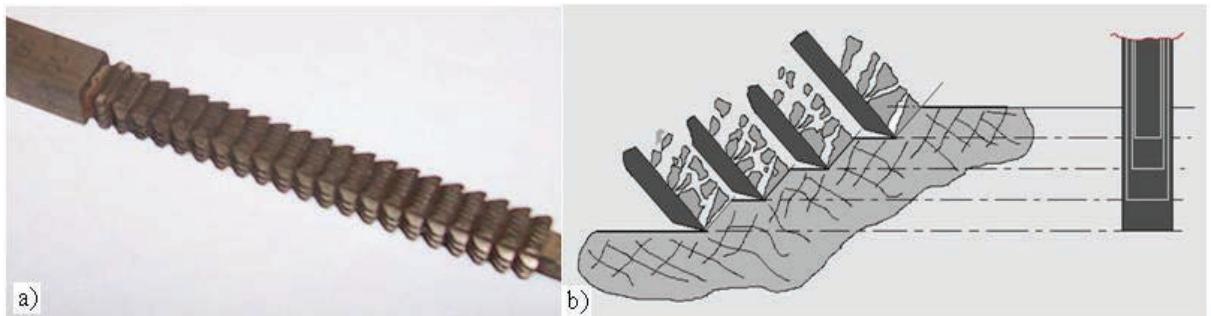


Figura 2.3. Similitud entre la brocha mecánica y el corte escalonado aplicado al suelo.
a) Brocha mecánica; b) Representación esquemática aplicada al suelo.

2.4 Fundamentos de implantación de los criterios de diseño de la brocha mecánica a un apero para la roturación de suelos.

Para reproducir los órganos de trabajo de un apero agrícola de preparación de suelos, de forma que su fundamento esté basado en los objetivos que se persiguen con la brocha mecánica, de lograr la geometría y calidad superficial requerida, se hace imprescindible analizar cada uno de los criterios básicos de su diseño y buscar la forma de extrapolarlos al apero, considerandolas características del material a “laborar” en cada caso.

Vasilenko (1956), al referirse a la similitud entre las operaciones de corte de metales y la labranza de suelo indicaba: en el corte de metales, la viruta representa un desperdicio, mientras que en la labranza un factor importante son los fragmentos de suelo resultantes de la labor. En esta investigación, el perfil generado y las dimensiones de los fragmentos de suelo obtenidos resultan de gran importancia, pues se persigue laborar solo el lugar donde se alojará el esqueje a plantar y con las condiciones idóneas para el desarrollo en su entorno.

Entre los elementos de diseño de la brocha mecánica a tomar en cuenta para un apero está el paso entre dientes, del que depende la relación que se establece entre la profundidad de corte y las dimensiones de las virutas generadas. Para un apero de preparación de suelos mediante cortes consecutivos, el paso lo va a determinar, la profundidad de corte total que se fije y la

altura que se le quiera dar a los escalones de corte. Mientras menor sea el paso, para lograr partículas de suelo menores y una profundidad dada, se hace necesario incrementar el número de brazos, lo que establece un compromiso directo entre cantidad de brazos y tamaños de las partículas a generar. Esta relación no es absoluta, pues está sujeta a las condiciones impuestas por las características del suelo a laborar.

Los ángulos de incidencia y de salida, así como las dimensiones en el ancho y altura de corte, son determinados durante el diseño de la cuña, atendiendo a las características de las funciones que va a realizar y los esfuerzos a los que va a estar sometida. Existen otros parámetros que resultan de menor importancia o que no son necesarios tomarlos en cuenta para laborar el suelo, como es el caso del radio de redondeo del fondo del diente y la longitud del corte, ya que se estaría tratando de un proceso continuo y los fragmentos de suelo cortados se trasladan por la superficie de los elementos de corte y se depositan sobre la misma franja de suelo cortado.

Otros factores, como la fuerza de corte requerida y la potencia demandada para realizar la labor se ajustan a las exigencias agrotécnicas del cultivo en cuestión y a las características del tipo de suelo, que son los factores que establecen la demanda traccional del apero, aspectos a considerar durante el diseño, donde se debe tomar en consideración además, el cálculo de resistencia estructural, no siendo objeto de esta investigación.

2.5 Fundamentos teóricos de los órganos que interactúan directamente con el suelo.

La cuña de dos caras.

La forma geométrica predominante para el cálculo y el diseño de los aperos de labranza, ha sido la cuña de dos o tres caras. Ella realiza dos funciones: corta, desorganiza la masa de suelo y la traslada ya fracturada. En la Figura 2.4 se muestra el esquema de fuerzas actuantes durante el movimiento del suelo fracturado por la cuña plana de dos caras. Este suelo cortado,

se desplaza desde el surgimiento de las grietas, por la superficie inclinada con un ángulo Ψ respecto al fondo del surco:

$$\Psi = \frac{90^\circ - (\beta + \varphi + \varphi')}{2}, \text{ rad} \quad (2.4)$$

Dónde: β -ángulo de corte, rad; φ -ángulo de fricción del suelo con la cuña sobre la superficie de traslado, rad; φ' -ángulo de fricción entre el prisma y el suelo aún sin cortar.

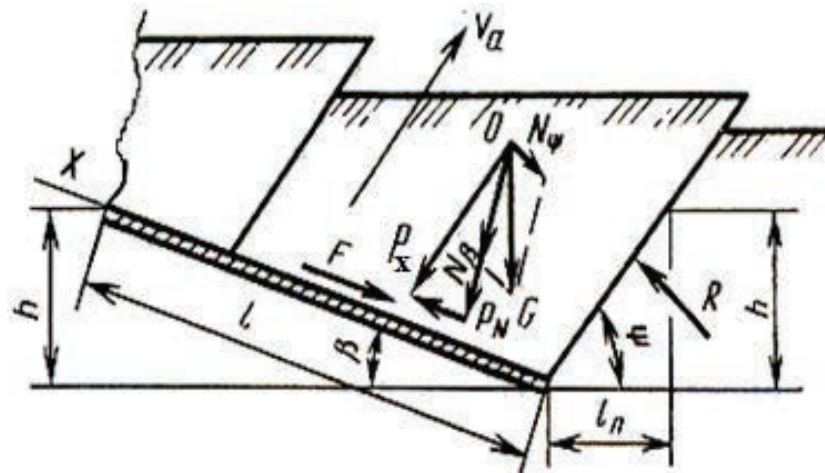


Figura 2.4. Sistema de fuerzas que actúan en la interacción de la cuña de dos caras con el suelo.

Estas fuerzas son las siguientes: G -fuerza de gravedad, N; P_x -fuerza de inercia, N; P_N -fuerza normal, N; F -fuerza de fricción del prisma sobre la superficie de la cuña, N; R -reacción del suelo que está en reposo respecto al suelo no deformado, N; N_Ψ -Normal a la superficie de fractura; N_β -Normal al plano de la cuña; l - largo de la cuña, m; l_n -longitud de acción de la proyección frontal de la cuña, m; h -altura de trabajo de la cuña, m; V_a - velocidad absoluta del prisma, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

De la propia Figura 2.4 se puede observar, que en dependencia del ángulo β se establecen dos regímenes de trabajo de la cuña: El suelo se desliza, trasladándose a lo largo de la superficie de trabajo, desplazándose junto a ella, o se mezcla, voltea y destruye delante de ella. Este movimiento del prisma a lo largo de la cuña es posible, si la sumatoria de las fuerzas en la superficie de trabajo de la misma, es mayor o igual a cero.

Para determinar la proyección de las fuerzas en el eje X, se calcula su magnitud descomponiéndola en sus componentes N_β y N_ψ las cuales actúan correspondientemente a la normal a la cara de trabajo de la cuña y superficie de desplazamiento del prisma con el suelo no cortado.

La presión ejercida por la fuerza de gravedad sobre la superficie de la cuña es considerada según Goriachkin (1935) como:

$$N_\beta = \frac{G \cdot \sin \psi}{\sin(\beta + \psi)}; N_\psi = \frac{G \cdot \sin \beta}{\sin(\beta - \psi)}, \text{ Pa} \quad (2.5)$$

Para determinar la presión que ejerce la cuña sobre el suelo de acuerdo a Sineokov, (1979):

$$P_d = \frac{a \cdot b \cdot v \cdot \rho \cdot v_a}{g}, \text{ Pa} \quad (2.6)$$

Donde: a – ancho de la cuña, m; b – largo de la cuña, m; v – velocidad de la cuña, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ – peso específico del suelo, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v_a – velocidad absoluta del prisma, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; g – aceleración de la caída libre, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Expresada de otra forma P_d :

$$P_d = \frac{v^2 \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot \sin \beta}{g \sin(\beta + \psi)}, \text{ N} \quad (2.7)$$

La velocidad absoluta del prisma de suelo se expresa como:

$$v_a = \frac{v \cdot \sin \beta}{\sin(\beta + \psi)}, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.8)$$

Su componente normales:

$$P_N = \frac{v^2 \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot \sin \beta}{g}, \text{ N} \quad (2.9)$$

La fuerza de fricción del prisma (F) sobre la superficie de trabajo de la cuña se determina:

$$F = (N_\beta + P_N) \tan \varphi, \text{ N} \quad (2.10)$$

Al descomponer la anterior:

$$F = \left(\frac{G \cdot \sin \psi}{\sin(\beta + \psi)} + \frac{v^2 \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot \sin \beta}{g} \right) \tan \varphi, \text{ N} \quad (2.11)$$

La máxima reacción de la superficie (R_{\max}) no deformada del suelo es igual a:

$$R_{\max} = S \sigma_{BP}, \text{ N} \quad (2.12)$$

Donde: S -superficie de desplazamiento, m^2 ; σ_{BP} -resistencia estática del suelo a la compresión, N.

Proyectando las fuerzas P_d y las de fricción F y descomponiéndola en su R_{\max} en el eje x, después de su transformación, obtenemos:

$$R_{\max} = \frac{v^2 \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot \sin \beta}{g \cdot \tan^{-1}(\beta + \psi)} + \frac{S \sigma_{BP} \cdot \sin(\beta + \psi)}{\sin \psi} - G \sin \beta - \left\{ \frac{v^3 \cdot a \cdot b \cdot \rho}{g \cdot \sin^{-1} \beta} - \frac{G \cdot \sin \psi}{\sin(\beta + \psi)} \right\} \tan \varphi \geq 0, \text{ N} \quad (2.13)$$

Sustituyendo S por $\frac{a \cdot b}{\sin \varphi}$ y G por $a \cdot b \cdot \rho \cdot l$, que es el largo de la cuña por la cual se desplaza el prisma sin adherencia, al resolver y despejando para poner toda la ecuación en función de l , se obtiene:

$$l \geq \left\{ \frac{\frac{\sigma_{BP} \cdot \sin^2(\beta + \psi)}{\rho \cdot \sin \psi} - \frac{v^2 \cdot \sin \beta}{g} [\sin(\beta + \psi) \tan \varphi - \cos(\beta + \psi)]}{\sin \beta \cdot \sin(\beta + \psi) + \sin \psi \cdot \tan \varphi} \right\}, \text{ m} \quad (2.14)$$

Del análisis de la ecuación 2.14 se desprende, que en el trabajo de la cuña influye grandemente la velocidad de movimiento, teniendo en cuenta que el carácter de su influencia lo determina el ángulo β . Además, del análisis del segundo miembro del numerador, se ve que tiene el signo menos cuando $\beta \leq 20^\circ$. Con el incremento de la velocidad de traslado de la cuña, aumenta también el recorrido del prisma de suelo sobre la superficie de trabajo; cuando

$\beta > 25^\circ$ con el aumento de la velocidad de movimiento, al prisma del suelo que se desplaza sobre la superficie de la cuña, se le opone una fuerza extra de fricción creada por las componentes normales de P_d . El significado del ángulo β de $20...25^\circ$ corresponde a una resistencia mínima de tracción a la cuña (Vinogradov y Shishkevich, 1959; Matsenpuro y Maniuta, 1959; Seleni, 1975; Bocoï et al.; 1978).

La cuña de tres caras en el diseño de las saetas o cuchillas laterales.

Cuando a cada lado de la cuña principal, se colocan sendas saetas o cuchillas laterales, incrementando el ancho de acción del apero sobre el suelo, se incorpora una resistencia adicional, acorde a sus dimensiones, ángulos de incidencia y disposición del filo. Estos parámetros serán los que incidirán en la función específica a realizar, en dependencia de la profundidad a que se coloquen y el resto de los factores externos, propios del suelo, que incidan sobre ellas.

El análisis a realizar corresponde al caso de la cuña de tres caras, donde un ángulo γ (Figura 2.5), hacia la dirección de movimiento de las saetas, va a incidir sobre el prisma de suelo que inicialmente ha entrado en contacto con la cuña y parte del suelo que se ha fragmentado producto de la propagación de las grietas ocasionadas por esta.

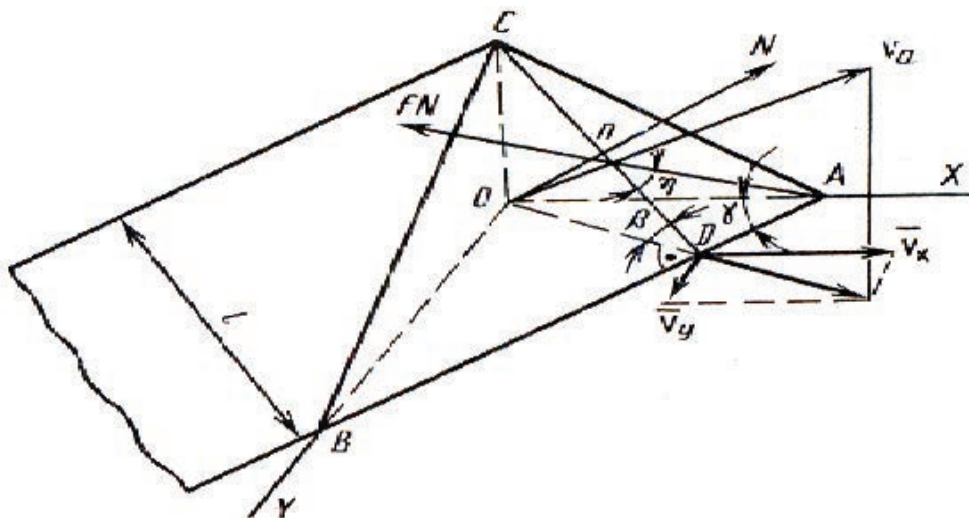


Figura 2.5 Presentación del sistema de fuerzas que actúan en la interacción de la cuña de tres caras con el suelo.

Este suelo no se enfrenta normal a la cuchilla, sino contra la línea DC, que describe el filo y con un ángulo η hacia él en dirección A_n . En esta dirección la fuerza de fricción en la dirección DC disminuye y es igual a:

$$F' = F \sen \eta, N \quad (2.15)$$

El ángulo η se determina a partir de la ecuación:

$$\tan \eta = \tan \gamma \cos \beta, \text{ rad} \quad (2.16)$$

Teniendo en cuenta las fórmulas 2.13 y 2.14 y sustituyendo para el caso de una cuña de tres caras se escribe como:

$$l \leq \left\{ \frac{\frac{\sigma_{BP} \sen^2(\beta+\psi)}{\rho \sin \psi} - \frac{v^2 \sen \beta}{g} [\sen(\beta-\psi) \sen \eta \tan \varphi - \cos(\beta+\varphi)]}{[\sen \psi \sen \eta \tan \varphi + \sen \beta \sen(\beta+\psi)]} \right\}, m \quad (2.17)$$

A partir del análisis de la Fórmula 2.17 tenemos por consiguiente, que a altas velocidades de movimiento, el suelo se mueve por la superficie de la cuña de tres caras, con el objetivo de proyectarse a ella mejor que con la de dos caras, con iguales ángulos de disposición de las mismas hacia el fondo del surco. Sin embargo, Goriachkin apuntó “La dificultad de la cuña de tres caras de mover el prisma con el desprendimiento y lanzamiento del suelo a los lados ocasiona un gasto de energía innecesario en dicho trabajo”.

Para la fundamentación del significado del ángulo γ en el cual el suelo se desplaza un mínimo para el lado, analicemos el movimiento absoluto del prisma en interacción con la cuña (etapa uno) y el vuelo libre que ocasionan las saetas (etapa dos).

Durante la correspondiente interacción de la cuña, el prisma se eleva una altura h al final de la cuña, (Figura 2.4) y pasa la cuchilla normal a la superficie del fondo del surco una distancia:

$$l_n = \frac{l \sen \beta}{\tan \Psi}, m \quad (2.18)$$

La que será igual para cualquier valor del ángulo γ en el intervalo de $0 \dots 90^\circ$. El tiempo de traslado del tramo recorrido es t , siendo l el ancho del ala de las saetas, este tiempo será:

$$t = \frac{l \operatorname{sen} \beta}{v \operatorname{sen} \gamma \tan \psi}, \text{ s} \quad (2.19)$$

En este tiempo, el prisma en dirección al eje oy , perpendicular a la dirección de movimiento de la cuña (Figura 2.5) recorre un camino:

$$S_I = v_y t, \text{ m} \quad (2.20)$$

Por lo que se deduce que, $v_y = v_a \cos \gamma$ representa la velocidad del prisma en dirección al eje oy y a su vez $v_a = v \operatorname{sen} \beta \frac{\operatorname{sen} \gamma}{\operatorname{sen}(\beta + \psi)}$, siendo la velocidad absoluta del prisma.

Sustituyendo el resultado de v_a y v_y en la fórmula (2.21) tendremos que:

$$S_I = \frac{l \operatorname{sen}^2 \beta \cos \gamma}{[\operatorname{sen}(\beta + \psi) \tan \psi]}, \text{ m} \quad (2.21)$$

Del análisis de la ecuación (2.21) tendremos que el desplazamiento del prisma en la etapa I y su movimiento no dependen de la velocidad de avance de la cuña. Su significado se determina por los parámetros geométricos de esta, sus propiedades y condiciones del suelo. Durante esto, con el aumento del ángulo γ disminuye el desplazamiento del suelo al lado y con el aumento del ángulo β el ancho de la franja crece.

En la etapa II el prisma se mueve libre como cuerpo, elevado por un ángulo ψ venciendo la resistencia del aire y limitado por la acción de la gravedad. La magnitud de la longitud de vuelo del prisma L se determina mediante:

$$L = \frac{v_a^2 \operatorname{sen} 2\psi}{g}, \text{ m} \quad (2.22)$$

Entonces,

$$S_{II} = \frac{v^2 \operatorname{sen}^2 \beta \operatorname{sen}^2 \gamma \operatorname{sen} 2\psi \cos \gamma}{g \operatorname{sen}^2(\beta + \psi)}, \text{ m} \quad (2.23)$$

El desplazamiento general del suelo hacia el lado ocasionados por las saetas se puede limitar reduciendo los valores de los ángulos β , γ y ψ , hasta el punto en que el desplazamiento del suelo se haga mínimo, depositándolo en la parte posterior de la saeta. De esta forma, la función de las saetas a ambos lados de la cuña, cumplirían una función de incrementar el desterronamiento, a la vez que facilitarían que el accionamiento del órgano de trabajo sobre el suelo pudiera realizarse a mayor velocidad, dejando todo el suelo promovido por detrás de donde pasó (Kliuchkov, 1984).

La fórmula general que resume la función de la acción de la cuña y las saetas puede ser expresada de la forma siguiente:

$$S_{\text{ox}} = \frac{l \sin^2 \beta \cos \gamma}{[\sin(\beta + \psi) \tan \psi]} + \frac{v^2 \sin^2 \beta \sin \gamma \sin 2\gamma \sin 2\psi}{2g \sin^2(\beta + \psi)}, m \quad (2.24)$$

El brazo escarificador.

El brazo es el órgano que se utiliza como soporte y ubicación en profundidad de la cuña y las saetas, se toman sus dimensiones, aceptando las propuestas por Norton (1987), como resultado de su trabajo en la evaluación de los brazos curvos en suelos Ferralíticos y utilizados con similares características en los aperos de producción nacional, con buenos resultados (Norton, 1979, 1982, 1985).

Su función en esta investigación se limita a la ubicación en escalonamiento y separación de las cuñas y saetas para lograr los diferentes escalones, ya que por su geometría y proyección contra el suelo tiene un enfrentamiento solamente con el suelo fragmentado previamente, no resultando significativa su actuación respecto a la calidad de labor, ni en el consumo energético.

La combinación del efecto de rotura primaria del suelo por la cuña de dos caras, con el incremento de la fragmentación que provocan las saetas laterales, cumpliendo con la similitud con la brocha mecánica de realizar cortes escalonados, garantiza: una fracturación

del suelo aceptable; pronosticar las dimensiones del perfil del suelo a generar y reducir el consumo energético en dicha labor, respecto a las tecnologías empleadas hasta ahora, cumpliendo con las exigencias agrotécnicas de preparación de suelos para la plantación de la caña de azúcar.

Conclusiones parciales de los estudios teóricos.

1. El fundamento teórico de la investigación se basa en el principio de trabajo de la brocha mecánica en el maquinado de metales, buscando generar un perfil y fragmentación del suelo con la mayor reducción posible del desplazamiento de este hacia los lados mediante cortes horizontales progresivos.
2. Los estudios y la experiencia acumulada, en el diseño y utilización de la brocha mecánica en el conformado de metales y la ampliación de sus principios a otros materiales, fundamentan la posibilidad de aplicarlo a un apero para la preparación del suelo para la plantación de caña de azúcar, considerando sus conceptos básicos.
3. La combinación del efecto de rotura primaria del suelo por la cuña de dos caras con el incremento de la fragmentación que provocan las saetas laterales, cumple con la similitud de acción con la brocha mecánica al realizar cortes escalonados, debiendo producir la fragmentación del suelo y permitiendo pronosticar las dimensiones del perfil del mismo a crear, que satisfaga las exigencias agrotécnicas de preparación de suelos para la plantación de la caña de azúcar con la reducción del consumo energético en dicha labor, respecto a las tecnologías empleadas hasta la actualidad.

CAPÍTULO III. PROGRAMA Y METODOLOGÍAS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

3.1 Programa de las investigaciones experimentales.

En el programa general de las investigaciones se planifica realizar con órganos experimentales a partir de los fundamentos teóricos, principios geométricos y aplicación de los preceptos de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento, en el Laboratorio Canal de Suelos, del Centro de Mecanización Agropecuaria, (CEMA), Universidad Agraria de la Habana (UNAH), municipio San José de las Lajas, provincia de Mayabeque. El período de investigación comprendido entre los años 2007...2012. El suelo base a emplear para la investigación en el canal de suelos es Ferralítico rojo.

Partiendo de las dimensiones y ángulos de incidencia de las saetas con el suelo, se generan dos variantes de modelos físicos. Se utilizan los mismos cuatro brazos escalonados en profundidad a los que se le colocan saetas con ancho variable de mayor a menor (Variante I) y saetas con similares dimensiones a la cuarta empleada en la variante I (Variante II). A partir de las mismas, se fabricaron los modelos experimentales. Se realiza la evaluación de la Variante I según plan factorial 2^k que caracterice los parámetros de calidad de labor y de resistencia traccional durante la roturación y la selección de los parámetros con menor rigor para la evaluación de la Variante II, siendo suficiente dicha selección para la comparación entre ambas variantes. Se evalúa comparativamente los modelos experimentales utilizados en las Variantes I y II, con la incorporación de un surcador de producción nacional a escala, dando lugar a las Variantes III y IV, donde se comparan los indicadores de calidad final del proceso de roturación y surcado en un solo pase, mediante los resultados de generación de

perfil surcado, uniformidad de la granulometría resultante y resistencia traccional de las dos primeras variantes.

Las tareas, objetos y aspectos a estudiar durante la investigación para caracterizar y comparar las variantes, aparecen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Programa General de las investigaciones experimentales.

Investigación	Objeto de investigación	Aspectos a estudiar
1	2	3
1- Fundamento de los modelos a investigar.	-Variante I -Variante II	-Fundamentación de los parámetros geométricos naturales del modelo base; -Aplicación de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento para la determinación de los parámetros constructivos y cinemáticos de las variantes a investigar.
2- Reproducción de las condiciones experimentales.	Parámetros para la experimentación.	-Reproducir las velocidades experimentales; -Crear las condiciones de humedad del suelo; -Crear las condiciones de compactación del suelo.
3- Investigación de modelo propuesto.	Variante I	-Índices de la calidad del trabajo: Perfil de suelo generado; Granulometría obtenida. -Evaluación energética: Fuerza; Velocidad.
4- Investigación de modelo propuesto.	Variante II	-Índices de la calidad del trabajo: Perfil de suelo generado; Granulometría obtenida. -Evaluación energética: Fuerza; Velocidad.
5- Evaluación comparativa entre las variantes.	Variante I vs. Variante II	Índices de la calidad del trabajo; Evaluación energética.
6- Evaluación comparativa de las dos variantes con surcador.	Variante III vs. Variante IV	Calidad de labor final; Resistencia tractiva total.

3.2 Diseño y construcción de los modelos de las variantes a investigar.

Partiendo de los parámetros reales considerados en el diseño de los órganos de trabajo del modelo propuesto se construyen los modelos experimentales, asumiendo los postulados de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento, considerándose un factor de escala 1:2, que involucra todas las magnitudes lineales dadas al diseño del modelo propuesto a escala real, denominándolo prototipo. El primer paso que tiene que ser definido es la escala longitud, magnitud de las consideradas inviolables y se aplica a todas las dimensiones involucradas en la investigación, relacionando el factor de escala establecido entre el modelo experimental y el prototipo. Esta teoría contempla que la forma del modelo, su ubicación espacial y las magnitudes angulares son invariables (Durán, 2000; Iglesias y Herrera, 2004; Martínez de la Calle, 2004; Ibarra, 2005).

El factor de escala ($\lambda_{(l)}$) para el modelo experimental se determinó a partir de la relación:

$$\lambda_{(l)} = \frac{l_p}{l_m} \quad (3.1)$$

Siendo: l_p -Longitudes del prototipo, m; l_m -Longitudes del modelo, m.

Partiendo de esta relación de longitud se determinan el resto de las escalas involucradas en la investigación: área, volumen, velocidad, masa y fuerza.

La escala de área para la sección de cualquier elemento involucrado en los ensayos se determina como:

$$A = L^2 \quad (3.2)$$

Por lo que:

$$\lambda_A = \lambda_{(l^2)} \quad (3.3)$$

Donde: λ_A -factor de escala del área.

Determinándose el área de un elemento (A_m) como:

$$A_m = \frac{A_p}{\lambda_A} = \frac{A_p}{\lambda_{l^2}} \quad (3.4)$$

Siendo: A_p -área del elemento componente del prototipo; λ_A -factor de escala del área.

La escala de la fuerza se calcula como,

$$F = m * a, \text{ N} \quad (3.5)$$

Entonces su factor de escala $\lambda_{(F)}$ será:

$$\lambda_{(F)} = (\lambda_p \lambda_v) \lambda_g = \lambda_{(E)} \lambda_l^2 \quad (3.6)$$

Donde: λ_p -factor de escala de resistencia a la penetración; λ_v -factor de escala de velocidad;

λ_g -factor de escala de aceleración de la gravedad; $\lambda_{(E)}$ -factor de escala de viscosidad.

Los factores de escala de aceleración de la gravedad λ_g y de viscosidad $\lambda_{(E)}$ se consideran iguales a la unidad. En el primero por existir una variación inapreciable y para el segundo por resultar condiciones similares.

La fuerza en el modelo se determina como:

$$F_m = \frac{F_p}{\lambda_{(E)} \lambda_{(l)}^2}, \text{ N} \quad (3.7)$$

La escala de velocidad que se establece entre el prototipo y el modelo se determina de la forma siguiente:

$$\frac{v_p}{\sqrt{l_p \cdot g_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{l_m \cdot g_m}} \quad (3.8)$$

Dónde: v_p -Velocidad del prototipo, ms^{-1} ; v_m -Velocidad del modelo, ms^{-1} ; l_p -Longitud del prototipo, m; l_m -Longitud del modelo, m; g_p - Gravedad en el prototipo, ms^{-2} ; g_m -Gravedad en el modelo, ms^{-2} .

Despejando v_m en la ecuación (3.8), y asumiendo que la acción de la gravedad en el prototipo es igual a la del modelo, quedando la expresión de la velocidad del modelo como:

$$v_m = v_p \cdot \frac{\sqrt{l_m}}{\sqrt{l_p}}, \text{ ms}^{-1} \quad (3.9)$$

Sustituyendo en (3.9) el inverso del factor de escala de longitud (ecuación 3.1) tenemos que:

$$v_m = \frac{v_p}{\lambda_l}, \text{ ms}^{-1} \quad (3.10)$$

Determinados todos los factores de escala, involucrados para los ensayos a ejecutar, se elaboran las metodologías para la reproducción de cada uno de los procedimientos y parámetros a cumplir.

3.3 Metodologías de las investigaciones experimentales.

Plan factorial para la realización de los experimentos. En el diseño del plan factorial para la realización de los ensayos se consideran como variables independientes: La humedad y la compactación del suelo, más la velocidad de desplazamiento del vehículo portaimplementos. Como variables dependientes se obtienen la calidad de labor, caracterizada por la granulometría y el perfil de suelo resultante, además, la resistencia traccional de cada brazo, siendo la sumatoria de estas, la resistencia tractiva total demandada en la labor al conjunto de órganos, que junto con la velocidad real registrada, permite determinar el consumo energético. Para la Variante I se ejecuta un Plan Factorial 2^3 , donde se incluyen las combinaciones de valores máximos y mínimos de cada una de las variables independientes. En la Tabla 3.2 se brindan los programas de las investigaciones experimentales por variantes.

Tabla 3.2. Programa de las investigaciones experimentales.

Variante I		
Humedad	Compactación	Velocidad
-1	-1	-1
-1	+1	-1
+1	-1	-1
+1	+1	-1
-1	-1	+1
-1	+1	+1
+1	-1	+1
+1	+1	+1
Variante II		
-1	-1	+1
-1	+1	+1
+1	-1	-1
+1	+1	-1

En la Variante II no se requieren realizar todos los ensayos, pues se utiliza a modo de confrontación, evaluando solamente las condiciones menos rigurosas a través de la selección de los parámetros que pueden ser más representativos de la labor de esta variante.

Velocidades de experimentación. Las velocidades seleccionadas como características del modelo en magnitud real, para la realización de los experimentos son $1,39 \dots 2,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($5 \dots 8 \text{ km/h}$) que se corresponden con las utilizadas en labores de roturación y se transforman mediante la metodología elaborada a la utilizada en los ensayos, según la relación que establece la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento.

La humedad tiene que ser homogénea respecto a los valores determinados en $\pm 1 \%$ (Tabla 3.3). Para cada rango de la misma, se suministra similar cantidad de agua a todo lo largo y ancho del canal a razón de 10 L/m^2 .

Tabla 3.3. Valores extremos de humedad a lograr en los ensayos.

Humedad teórica promedio por ensayo, %								
Tramos del canal	Variante I				Variante II		Variantes III y IV	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Menor compactación	<20	>28	<20	>28	<20	>28	<20	<20
Mayor compactación								

La compactación del suelo del canal se realiza hasta la profundidad de $17,5 \pm 2,5 \text{ cm}$ a todo lo largo del área a ensayar (Tabla 3.4). Después de fijada la humedad correspondiente se divide la longitud total del canal en dos secciones. Se aplican sucesivos pases del cilindro compactador, creando diferenciación entre la compactación de cada tramo. De esta forma en cada corrida experimental se logran dos ensayos: con humedad promedio similar dentro del entorno del valor planificado y dos niveles de compactación diferentes, con un rango menor, con valores entre $1\ 000 \dots 2\ 200 \text{ kPa}$ y otro mayor entre $2\ 500 \dots 3\ 500 \text{ kPa}$ creando una diferenciación entre secciones para cada corrida experimental mayor de $1\ 000 \text{ kPa}$.

Tabla 3.4. Valores de compactación para los ensayos

Rangos de compactación teórica promedio por ensayo, kPa			
Sección	Variante I	Variante II	Variantes III y IV
Menor	1 000 – 2 200		
Mayor	2 500 – 3 500		

El área correspondiente a cada ensayo, tiene una longitud efectiva de 4,5 m para la realización de los ensayos correspondientes a cada variante, correctamente enmarcados, descartando las partes en que se realiza la arrancada y parada del vehículo portaimplementos. En las áreas de ensayo se realizan tres evaluaciones del perfil resultante y de la granulometría del suelo.

Las mediciones se realizan con el empleo de instrumentos de precisión, debidamente calibrados cumpliendo los procedimientos y metodologías de preparación y realización de cada ensayo. Las características de estos se describen en el Anexo C.

La ejecución y registro de las mediciones de fuerza y velocidad se realizan directamente en la computadora mediante el programa de computación TENSOFIT (Albóniga, 2007), diseñado a tal efecto, donde son ajustados previamente los parámetros de tiempo de registro, velocidad de muestreo, canales a registrar, nombre de los ficheros de datos y ubicación donde serán guardados. El propio programa de computación, al concluir la medición, almacena cada registro de forma independiente y el resultado puede ser observado de forma gráfica, o pasado a columnas de datos en un procesador estadístico para su adecuación y procesamiento, antes de proceder al tratamiento final.

Los resultados de las mediciones de granulometría y perfil del suelo de cada ensayo se registran de forma independiente y son pasados a la computadora en forma de tablas, unificándolas en el mismo procesador estadístico empleado anteriormente para los registros de fuerza y velocidad.

3.4 Metodología para reproducir las velocidades del vehículo portaimplementos.

Para reproducir la velocidad del modelo en el canal de suelo, se requiere transformar la velocidad angular de salida del motorreductor, mostrado en la Figura 3.1, por la velocidad

lineal a la que se debe trasladar el vehículo portaimplementos, sobre la superficie del canal. Se requiere establecer las relaciones de transformación que son necesarias (Anexo B) y su comprobación práctica.

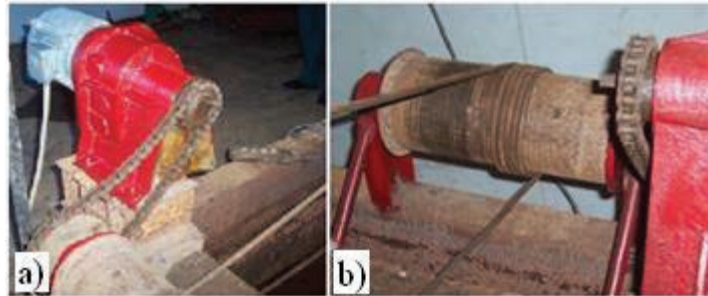


Figura 3.1. Motorreductor.

a) Transmisión por cadena; b) Transmisión por fricción tambor-cable.

El procedimiento para la obtención de la velocidad del modelo en el canal requiere establecer la relación de piñones necesaria en la transmisión. Por medio de esta relación se obtiene la velocidad teórica para la planificación de los experimentos, la velocidad real es resultado del registro durante los propios ensayos. Es importante durante la ejecución de los ensayos atender la tensión de la cadena, para evitar que se produzcan tirones, afectando la velocidad de desplazamiento del vehículo portaimplementos, pues ellos se incrementan al hacer oscilar el cable que une al tambor con dicho vehículo.

Las combinaciones de piñones que aparecen en la Tabla 3.5 son las requeridas para lograr las velocidades exigidas.

Tabla 3.5. Combinaciones de piñones y relación de transmisión

Velocidad	Piñones	No. de dientes	Relación de transmisión
Baja	Z_1	16	0,940
	Z_2	17	
Alta	Z_1	22	1,375
	Z_2	16	

Para determinar la velocidad en cada ensayo, se coloca un captador de revoluciones de tipo inductivo a una de las ruedas del vehículo portaimplementos (Figura 3.2). Este genera ocho

pulsos eléctricos por vuelta, dividiendo el desarrollo del perímetro de la rueda en igual número de veces, garantizando un registro de 40 cm por revolución, con una precisión ± 5 cm para todo el recorrido, durante la ejecución de los ensayos a lo largo del canal.



Figura 3.2. Captador inductivo para determinar la velocidad en los ensayos.

Este captador está conectado a una de las entradas del conversor analógico-digital (A/D), instalado en la computadora que realiza los registros de los ensayos y durante cada corrida experimental registra los pulsos que permiten calcular la distancia recorrida. Acorde a la velocidad del conversor A/D, se obtiene el tiempo de duración del ensayo para determinar la velocidad de desplazamiento del vehículo portaimplementos. (Argüelles, 1987; Figliola y Beasley, 2009).

3.5 Metodología de creación de las condiciones experimentales en el canal de suelos.

Al comenzar la preparación del canal para los ensayos, se fragmenta por completo el suelo, rompiendo la estructura existente, como resultado de ensayos anteriores. Para ello es necesario, al concluir cada ensayo, pasar varias veces los órganos desterronadores, colocados en la parte posterior del vehículo portaimplementos, (Figura 3.3a) comenzando a 5 ± 3 cm del nivel superficial e incrementando los sucesivos pases con igual dimensión hasta una profundidad de 25 ± 3 cm, tomada respecto al borde superior del canal; esta operación garantiza que el suelo no pierda la humedad y mantener a esa profundidad la característica de un piso de aradura, similar a las condiciones existentes en los campos a las profundidades de

30...40 cm. Posteriormente, con una pala (Figura 3.3c), se va removiendo todo el suelo del canal de un extremo al otro, hasta romper los terrones que superen las dimensiones entre 20...30 cm de diámetro. Completada esta labor, se pasa el órgano alisador colocado en la parte frontal del vehículo portaimplementos, (Figura 3.3b) tantas veces como sea necesario, hasta lograr emparejar la superficie superior del suelo, a 5 ± 2 cm por debajo del borde superior del canal.



Figura 3.3. Dispositivos acondicionadores del canal para los ensayos.

a) Órgano desterronador; b) Órgano alisador, c) Herramientas manuales.

Durante esta operación se comprueba que siempre se mantenga suelo arrastrado por delante del alisador, para garantizar la correcta nivelación y homogeneidad de la distribución del suelo a todos lo largo y ancho de la zona activa del canal.

Para comenzar las labores de acondicionamiento del canal se requiere evaluar el nivel de humedad existente en el suelo. Concluida esta comprobación, se suministra agua de forma uniforme, con una regadera con capacidad de $5 \pm 0,1$ L (Figura 3.3c) distribuyéndolo por cada 0,5 m del canal, reproduciendo un movimiento circular desde los bordes hasta el centro del mismo, de afuera hacia adentro, aprovechando la facilidad de percolar del suelo por el desterronamiento logrado.

El suelo se deja en reposo de 3...5 horas, en dependencia de la época del año y posteriormente se cubre con una banda de polietileno para comenzar el proceso de compactación.

3.6 Metodología para reproducir la humedad del suelo en el canal.

Para la realización de los ensayos se requiere un control estricto de la humedad antes de comenzar el proceso de compactación, determinándose la humedad con el instrumento Reflectómetro de Dominio Magnético de Tiempo (TDR) según las siglas en Inglés, de la firma Delta Devices modelo HH2, de fabricación Inglesa, basado en el método volumétrico de medición de la humedad, (Anexo C, Tabla 1), mostrado en las Figuras 3.4a y b. En la Figura 3.4c se muestra el modo de empleo. (Sciutto y Mascareña, 2000; Tapias et al.; 2001; Müller et al.; 2003; Walker et al.; 2004; Karovf et al.; 2007).

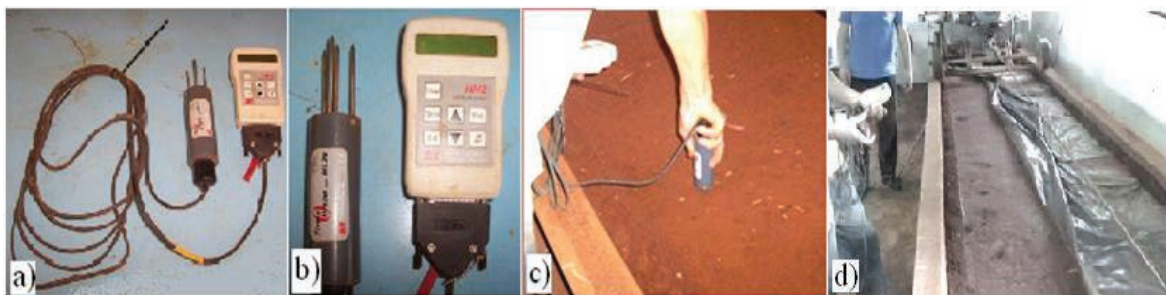


Figura 3.4. Determinación de la humedad del suelo.

- a) Reflectómetro de Dominio Magnético de Tiempo; b) Captador y unidad central;
c) Modo de empleo; d) Puntos de medición de la humedad previa al ensayo.

Al ser logrado el valor previsto de humedad del suelo se conserva cubriendo el canal con una banda de polietileno, la que además facilita pasar sobre ella el cilindro compactador con el suelo húmedo, para compactarlo sin alterar de forma significativa la humedad que ha sido fijada al suelo, evitando además, la adherencia de este al cilindro compactador. En el caso de excederse la humedad se retira la banda para facilitar la evaporación hasta el nivel de humedad requerido, en caso contrario se le incrementa el contenido de agua.

Los valores de humedad del suelo deben ser prefijados a los valores extremos inferior y superior respectivamente, de la condición de sazón o tempero del suelo Ferralítico rojo, que se encuentra en un rango de humedad entre 21...27 % (Domínguez, 1980; Klimes, 1980; Camacho, 1984).

Las mediciones para controlar la humedad durante la preparación del canal para los ensayos se realiza de conjunto con la compactación. Se mide en seis puntos escogidos al azar, como se muestra en la Figura 3.4d, a lo largo del canal, a una distancia media entre los bordes y el área por donde pasará el modelo de apero durante el ensayo, para evitar alterar el suelo por donde se realizará el experimento. Con los valores tomados se calcula el valor promedio de humedad contenida en el suelo por la expresión siguiente:

$$H_{\text{prom}} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n}, \% \quad (3.12)$$

Donde: H_{prom} -Humedad promedio del suelo a todo lo largo del canal, %; n - Número de mediciones realizadas; $H_1 \dots H_n$ -Valor de humedad en cada medición, %.

3.7 Metodología para reproducir la compactación del suelo en el canal.

Después de nivelado, humedecido y cubierto el suelo por la banda de polietileno, (Figura 3.5a) se procede a la compactación del suelo para los ensayos. Para esta acción el cilindro compactador es lastrado, como se muestra en la Figura 3.5b con dos masas con valor total de 870 N, estableciendo un sistema de fuerzas, mostrado en la Figura 3.5c.



Figura 3.5. Proceso de compactación del suelo del canal.

a) Canal humedecido y tapado el suelo durante la compactación; b) Rodillo y masas utilizadas como lastre; c) Representación del sistema de fuerzas aplicado al suelo; d) Comportamiento del suelo durante el proceso de compactación.

Desplazando el vehículo portainstrumentos en ambos sentidos, se realizan tantos pases del rodillo hasta lograr la compactación programada. El cálculo del sistema de fuerzas que actúa de forma estática y dinámica sobre el suelo para lograr la compactación es mostrado en el Anexo B. (Beer, 1967; Norton, 1999; Figliola y Beasley, 2009).

En dependencia de la humedad que posee el suelo, en el momento de su compactación, se requiere aplicar un mayor o menor número de pases del cilindro compactador, siendo necesario ir controlando constantemente el valor alcanzado mediante mediciones sucesivas.

Para medir la compactación se emplea el compactómetro (Figura 3.6a), fabricado por la firma Sueca, FIELDSCOUT, modelo SC 900, que permite obtener de forma inmediata las mediciones, mediante una pantalla de cristal líquido, o almacenarlas en su memoria para ser descargadas a una computadora posteriormente. Las características técnicas del instrumento se muestran en el Anexo C, Tabla 2.



Figura 3.6. Compactómetro utilizado durante las investigaciones.

a) Vista general; b) Midiendo en el Canal; c) Midiendo en el campo; d) Panel frontal del instrumento.

Se requiere mantener una correspondencia entre los valores de compactación y de humedad mediante mediciones de ambos parámetros, para lograr la relación que debe existir entre ellos en cada ensayo. Para reproducir la compactación se determina por cada metro lineal, la compactación que va adquiriendo el suelo cada tres pases del cilindro compactador sobre la superficie en preparación hasta una profundidad de 17,5 cm de acuerdo a la planificación de cada corrida experimental, mostrada con anterioridad en la Tabla 3.4.

3.8. Metodología para la preparación de la medición de fuerzas durante los ensayos.

Para la medición de la fuerza actuante en cada brazo del modelo experimental se utilizó el método extensométrico. En el diseño de los brazos se contempló en los mismos un concentrador de tensión mecánica, donde se colocan los extensómetros de resistencia eléctrica. Cada brazo cumple dos funciones: soporte del órgano de trabajo y como transductor

de fuerza (Dean y Douglas, 1962; Beer, 1967; Stiopin, 1976; Arguelles, 1987; Dally y Riley, 1991; Norton, 1999; Figliola y Beasley, 2009; Albóniga et al.; 2011; Bolton, 2012).

Los concentradores de tensión fueron calculados por el Método de los Elementos Finitos, como se puede apreciar en la Figura 3.7a; colocando los extensómetros en los puntos de máxima deformación, (Figura 3.7b y c), cumpliendo los procedimientos establecidos en el sistema de calidad del laboratorio de ensayo extensométricos del Centro de Investigaciones de Construcción de Maquinaria (CICMA) y regidos por la Norma NESM 6705: 006, 1994. Técnica de medición. Mediante el empleo de estos sensores se captan las deformaciones provocadas por la acción de las fuerzas actuantes, de forma dinámica, durante los ensayos (Figura 3.7d). Las características de los extensómetros utilizados en la construcción de los brazos dinamométricos aparecen en el Anexo C, Tabla 3.

Los extensómetros son colocados en configuración de puente completo o de Wheatstone, obteniéndose mayor diferencia de voltaje a la salida del puente, por actuar los cuatro extensómetros como resistencias activas, y por consiguiente lograr una sensibilidad mayor en cada punto de medición.

Cada transductor se somete a la comprobación del cumplimiento de los procedimientos de preparación, según la Norma NESM 6705: 007, (1994). Puntos de medición, evaluando: Corrimiento del balance; valor de resistencia de aislamiento eléctrico; estabilidad del valor cero y de máxima carga admisible; histéresis y relación señal-ruido. Cumplidos todos los requisitos, se realiza la calibración, utilizando masas calibradas, para obtener la relación de la deformación en función de la carga aplicada. Esta calibración reproduce los valores de deformación en carga y descarga en tres repeticiones y cuyos valores promediados representan el coeficiente de deformación o de calibración del transductor.

Para las calibraciones se utiliza el indicador de deformaciones estáticas modelo SM-60, de la firma japonesa KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENT, LTD, que posee un solo canal de

medición y sus características se brindan en el Anexo C, Tabla 4. Para ampliar sus posibilidades y facilitar la operación de calibración se conecta una caja de conmutación y balance SR-24 de la propia firma que permite la conexión de los cuatro transductores para ser balanceados y calibrados.

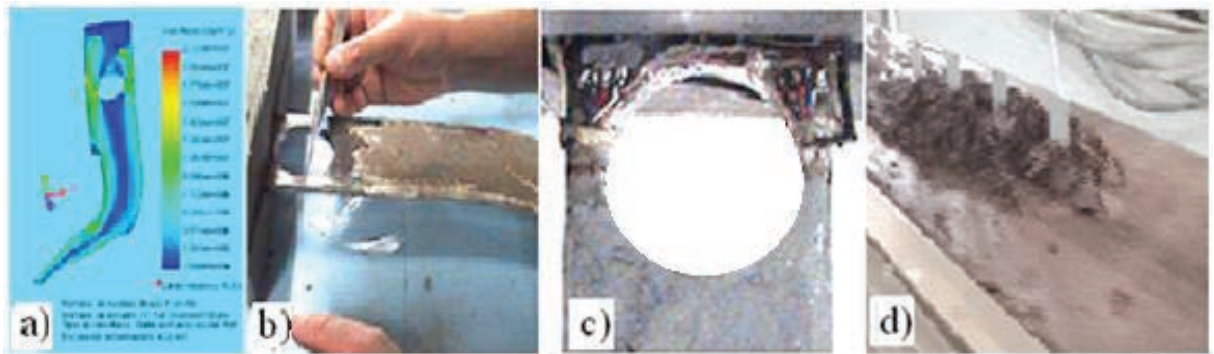


Figura 3.7. Brazos dinamométricos construidos para las mediciones de fuerza.

a) Concentrador de tensiones obtenido por el Método de Elementos Finitos; b) Preparación de uno de los brazos; c) Concentrador de tensión mecánica con los extensómetros pegados; d) Ensayo utilizando los cuatro brazos dinamométricos.

3.9. Metodología de calibración de los brazos extensométricos.

Los brazos montados sobre un bastidor, en la posición correspondiente para la realización de los ensayos, se colocan sobre el vehículo portaimplementos; el bastidor se gira 90° para situarlo en posición vertical (Figura 3.8a), perfectamente nivelado (Figura 3.8b), y fijado rígidamente; en esta posición se realiza la calibración de cada uno de ellos. Al amplificador de esfuerzos estáticos SM-60 y la caja de conmutación y balance SR-24, se conectan los puentes extensométricos de los cuatro brazos, correspondientes a los respectivos puntos de medición, balanceados cada uno de forma independiente al valor cero y conmutados al instrumento de medición en el momento de realizar cada calibración (Figura 3.8c).

En cada uno de los brazos, tomando como centro de apoyo, el pasador que fija la cuña a cada uno de ellos durante los ensayos, se colocan masas calibradas sobre un platillo para reproducir las fuerzas actuantes (Figura 3.8d), y obtener su calibración. Las masas empleadas en la calibración tienen un valor de $50 \pm 0,1$ N, cada una y fueron calibradas por el Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología (INIMET).

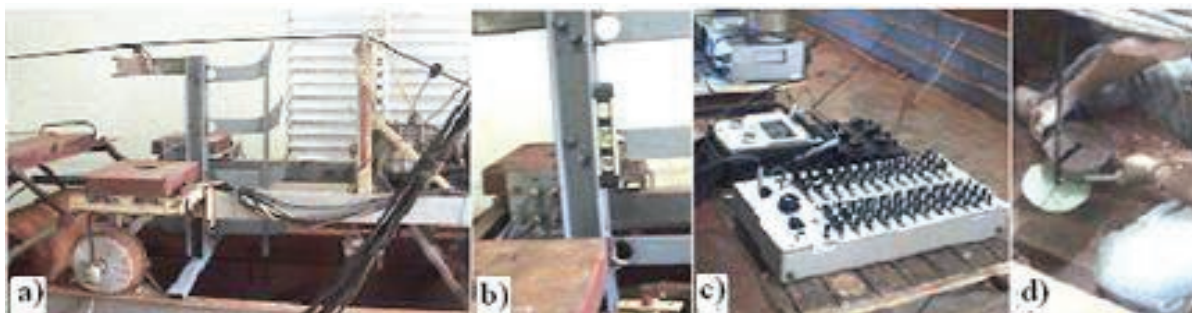


Figura 3.8. Proceso de calibración de los brazos extensométricos.

a) Fijación en posición vertical para la calibración; b) Comprobación de la perpendicularidad; c) Instrumentos empleados para la calibración; d) Colocación de las masas calibradas.

Durante la calibración se realiza la carga y descarga de las masas sobre el platillo en tres repeticiones; al colocar las masas se debe hacer suavemente hasta tocar el fondo de la ranura con la varilla, evitando vibraciones y balanceos. Los valores de carga y descarga obtenidos durante la calibración son anotados en la tabla correspondiente a cada brazo (Anexo B), reflejando en las tres primeras columnas los valores de carga y en las tres últimas los valores de descarga, calculando primero los promedios de carga y descarga por separado, con el interés de conocer la existencia de histéresis entre la respuesta de uno y otro proceso. Para los efectos del cálculo en la medición dinámica, se determina el promedio de los valores de deformación obtenidos en carga y descarga, dividiendo el valor de la carga aplicada entre el promedio de deformación correspondiente, obteniéndose el comportamiento de respuesta por deformación del transductor a cada carga. Este valor establece una relación entre carga y deformación, en correspondencia con la característica del material de que están contruidos los brazos. Promediando los valores determinados se obtiene el coeficiente de calibración de cada uno de ellos (Tabla 3.6). En la Figura 3.9 se brinda la gráfica que los representa.

Tabla 3.6. Resultado de la calibración.

Brazo	Coeficiente de calibración $N \cdot \mu\epsilon^{-1}$
I	1,0
II	0,897
III	0,734
IV	0,797

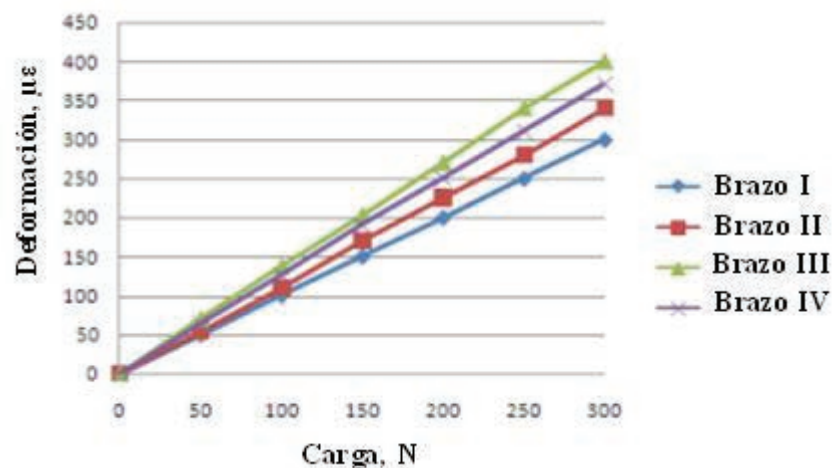


Figura 3.9 Respuesta de calibración de los cuatro brazos dinamométricos.

3.10 Metodología para la realización de la medición de fuerza en los ensayos.

La Figura 3.10 muestra una representación esquemática de cómo está estructurado el sistema de adquisición de datos.

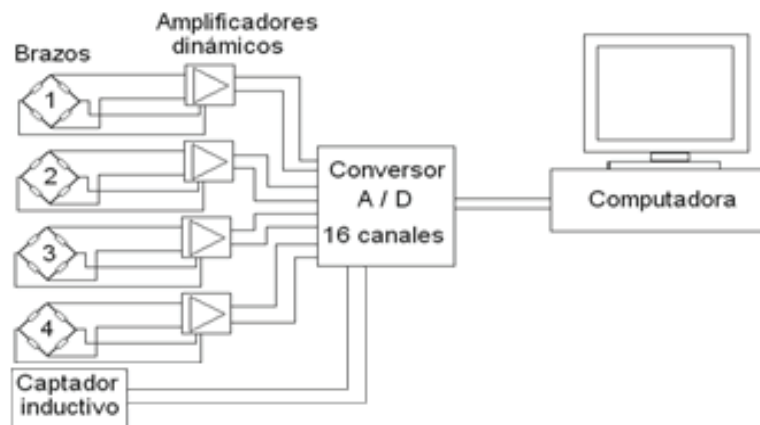


Figura 3.10. Representación esquemática del sistema de medición dinámica y adquisición de datos.

Para la medición de fuerza en los ensayos dinámicos, cada puente de medición se conecta a los canales de entrada del amplificador multicanal de deformaciones dinámicas DPM-602A, de la firma Kyowa. Los parámetros que caracterizan a este amplificador aparecen en el Anexo C, Tabla 5. La salida de voltaje de cada canal del amplificador, se conecta directamente a las entradas del conversor A/D, fabricada en los EEUU por la firma ADVANTECH, cuyas características y datos técnicos aparecen en el Anexo C, Tabla 6.

3.11 Metodología para el registro de datos durante los ensayos.

El registro de datos se realiza en una computadora Pentium III, que admite sea instalada la tarjeta A/D. El programa TENSOFIT (Albóniga, 2007) desarrollado para la adquisición de datos de ensayos extensométricos, permite controlar la velocidad de muestreo, tiempo de registro, cantidad de canales a registrar y su denominación antes de realizar el ensayo y captar, registrar y procesar la información de forma primaria.

La velocidad de muestreo del conversor A/D se fija a mil datos por segundo; el tiempo de registro se ajusta a 15 s. La denominación de los ficheros de datos generados se identifican por tipo de ensayo, y el número del canal de medición lo asigna el propio programa. Una vez concluido cada ensayo se guardan los datos, dando la posibilidad de visualizar los resultados de forma gráfica en la pantalla de la computadora. Cada registro, puede ser procesado de forma individual, colectiva o transformada a tablas en Excel u otro tipo de procesador estadístico.

3.12 Metodología para la determinación del perfil de suelo resultante.

Antes de comenzar cada corrida experimental, se determina el perfil inicial del canal, en seis localizaciones equidistantes, correspondientes a los dos ensayos a realizar, y posteriormente, en los mismos lugares seleccionados, se realiza la medición del perfil de suelo promovido después del paso del modelo evaluado. Para la medición se toman como referencia los bordes superiores del canal, colocando sobre ellos un perfilómetro conformado por una barra cuadrada con orificios verticales, separados a $10 \pm 0,3$ mm de distancia, por donde se introducen varillas calibradas de 300 ± 1 mm de largo, hasta lograr que toquen el perfil del suelo generado. Mediante una cinta métrica con apreciación ± 1 mm, se determina la altura que sobresalen las varillas por encima de la barra cuadrada. Estas mediciones se realizan antes y después de retirar el suelo promovido tras el paso de la herramienta, (Figura 3.11).

Para realizar la medición al finalizar el ensayo en los perfiles seleccionados, se introducen en la parte labrada de forma transversal dos láminas metálicas paralelas separadas 30 cm entre si, para delimitar el área donde se determina el perfil y extraer manualmente todo el suelo promovido para su evaluación granulométrica.



Figura 3.11. Medición del perfil de suelo.

a) Antes del ensayo; b) y c) Después de los ensayos.

Como resultado de estas actividades se obtiene el ancho y la profundidad de trabajo, para calcular el área labrada en m^2 , el volumen promovido en m^3 y con el suelo extraído entre las láminas paralelas se obtiene el 100 % del suelo a tamizar para determinar los porcentajes de fragmentos por dimensiones.

Para determinar el área labrada se realiza mediante el cálculo de la integral definida, empleando el método de integración aproximada, por la fórmula de las parábolas de Simpson propuesta por Bronshtein y Semendiaev (1971); expresión (3.13), cuando n es par:

$$\int_a^b y dx \approx \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 2y_{n-2} + y_{n-1} + y_n), m^2 \quad (3.13)$$

Determinándose h por la expresión:

$$h = \frac{b-a}{n}, m \quad (3.14)$$

Donde: $a = X_0$; $b = X_n$ -siendo X el ancho de trabajo, m; n -número de intervalos de integración; a, b -intervalos de integración.

3.13 Metodología para la determinación de la composición granulométrica del suelo.

A partir de lo señalado en el acápite 3.12 en lo referido a delimitar el área y extraer manualmente todo el suelo promovido se realiza su evaluación granulométrica por el método

de separación, según el diámetro de los fragmentos de suelo obtenidos, mediante un proceso de tamizado. Estos fragmentos se clasifican utilizando los tamices mostrados en la Figura 3.12, con diámetros de 40; 20 y 10 $\pm 0,1$ mm, lo que permite obtener cuatro rangos de clasificación de los fragmentos de suelo: > 40 ; $\leq 40 \dots > 20$; $\leq 20 \dots < 10$; ≤ 10 mm de diámetro.

Por cada experimento las muestras de suelo son tamizadas separándolas en los rangos antes referidos. El contenido pasado por cada tamiz, más el de los superiores a 40 mm son pesados, con una balanza Gedich de fabricación China, con una apreciación de 0,1 g la que ha sido certificada por el INIMET (Anexo C, Tabla 7). Obteniéndose el porcentaje de partículas de suelo en los rangos antes señalados.



Figura 3.12. Tamices utilizados para la evaluación de la granulometría.

a) Colocados en posición de trabajo; b) Apreciación visual de la relación entre sus dimensiones; c) Vista superior colocados en posición de trabajo.

El porcentaje de masa de suelo contenido en un tamiz es determinado mediante la expresión:

$$P_{f\phi} = \frac{(W_{1\phi > 40}) + (W_{2\phi \leq 40 \dots > 20}) + (W_{3\phi \leq 20 \dots > 10}) + (W_{4\phi \leq 10})}{W_t} * 100 \% \quad (3.15)$$

Donde: $W_{1\phi > 40}$; $W_{2\phi \leq 40 \dots > 20}$; $W_{3\phi \leq 20 \dots > 10}$; $W_{4\phi \leq 10}$ -masa de suelo retenida en cada tamiz respectivamente, kg; W_t -masa total de la muestra, kg.

3.14 Metodología para el procesamiento y evaluación estadística de los ensayos.

Para el procesamiento inicial de los resultados, se crea una carpeta para cada ensayo y tantas hojas de cálculo como requiera cada uno de los parámetros a evaluar, detallando en cada hoja las operaciones realizadas. Se utiliza como programa de cómputo Excel 2010, para organizar

y procesar los datos primarios. Para el procesamiento estadístico se transfieren todas las columnas de datos recopilados por ensayos, a las características de los programas Statgraphics versiones V y XVI, y al SPSS 11.5, para los diferentes tratamientos estadísticos. En los análisis estadísticos se comprueba que los datos provengan de una distribución normal. En la comparación múltiple de las medias se emplea la prueba t-Students para determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre las medias de los ensayos y la prueba t-Fischer para los análisis de la varianza. Con los resultados obtenidos se realiza un análisis de regresión múltiple por cada variable dependiente para analizar cuanto influyen la compactación, la humedad y la velocidad de trabajo como variables independientes sobre estas; también se determinan los modelos matemáticos que caracterizan los mismos, cumpliendo los supuestos requeridos para dichos análisis.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

4.1 Caracterización de las condiciones de realización de la investigación.

Las investigaciones experimentales sobre la fundamentación de los parámetros de diseño de órganos para la preparación de suelos, destinados a caña de azúcar, basados en los principios de la brocha mecánica se realizaron en el Laboratorio Canal de Suelo, del Centro de Mecanización Agropecuaria de la Universidad Agraria de La Habana, “Fructuoso Rodríguez Pérez”, en la Provincia de Mayabeque, entre los años 2009...2012.

La experimentación se realizó en modelos a escala 1:2, acorde a los preceptos de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento, a partir de los principios teóricos propuestos para la “brocha agrícola” y tomando en cuenta los logros y deficiencias de los órganos subsoladores de los aperos C-101 y la maqueta experimental C-101XV.

Los ensayos para la Variante I, que representa al modelo propuesto, se ejecutaron según plan factorial 2^k , asumiendo como variables independientes: velocidad (V), humedad (H) y compactación (C), con valores que representan las condiciones menos favorables a las que se enfrentan los aperos en la actualidad. Para la Variante II, que simula las características de diseño del C-101XV, se realizó una selección de los valores de las variables independientes, de forma que caractericen la labor que realizan sus órganos en condiciones menos rigurosas que las empleadas para la Variante I. Como parámetros de salida para ambos casos, se obtienen el perfil (P) y la granulometría (G) que caracterizan la calidad del trabajo realizado, respondiendo a las exigencias agrotécnicas para la preparación de suelos para caña de azúcar. Además, como indicador de los parámetros energéticos de las labores realizadas se obtiene la resistencia traccional (R_t).

4.2 Caracterización del canal de suelos.

El canal de suelos está constituido por cinco conjuntos fundamentales: estructura metálica que actúa como contenedor del suelo a evaluar; conjunto de locomoción; vehículo portaimplementos; equipamiento electrónico para la adquisición de datos y sistema energético de potencia, mando y control.

La estructura metálica (Figura 4.1a) de forma rectangular, cumple dos funciones: como contenedor del suelo, y soporte para la traslación del vehículo portaimplementos sobre su borde superior. Las dimensiones y parámetros principales del canal se muestran en la Tabla 4.1. En su extremo final, está fijado el conjunto de locomoción (Figura 4.1b), que da movimiento al vehículo portaimplementos en ambos sentidos.

El vehículo portaimplementos (Figura 4.1c), también cumple con dos funciones: montaje del objeto a investigar y crear las condiciones para la preparación del suelo, previo a la ejecución de los ensayos, descritas en el Capítulo III.



Figura 4.1. Canal de suelos.

a) Estructura metálica del canal; b) Conjunto de locomoción; c) Vehículo portaimplementos; d) Sistema energético de potencia, seguridad y control; e) Equipamiento electrónico para la adquisición de datos.

El sistema energético de potencia, seguridad y control, (Figura 4.1d) suministra la electricidad demandada para la realización de los ensayos y otras actividades que lo requieran.

La adquisición de datos se realiza con el empleo de un equipamiento electrónico de medición y registro (Figura 4.1e), compuesto por un amplificador de deformaciones dinámicas, un conversor de señal A/D, computadora para la obtención y registro de datos de los ensayos y un estabilizador del voltaje de línea para el suministro de energía eléctrica al equipamiento.

Tabla 4.1 Dimensiones y parámetros generales del canal de suelo.

Parámetros	Características y dimensiones, m
Largo total	13,2
Largo efectivo	8,3
Ancho total	1,3
Ancho de trabajo	1,0
Altura del cajón	0,6
Altura máxima	2,0
Largo total del vehículo portaimplementos	3,0
Largo del vehículo sin cilindro compactador	2,0
Ancho del vehículo portaimplementos	0,9
Velocidad del vehículo portaimplementos	-Motorreductor 220 V; 3Ø; 100 min ⁻¹ , -Según combinación de piñones.

4.3 Propiedades físico-mecánicas del suelo empleado en la investigación.

El suelo utilizado en el canal para los ensayos experimentales fue extraído en el perfil 15...30 ±5 cm de profundidad, de las áreas experimentales del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), en la zona agrícola de San José de las Lajas. Clasificado como Ferralítico rojo compactado, según la Segunda Clasificación Genética de los Suelos en Cuba, como un Rhodic Ferralsol según la clasificación de la FAO-UNESCO, y como un Oxisol según la clasificación USDA Soil Taxonomy. Cairo y Quintero, 1980; Hernández, 1985; FAO, 1988; Herrera, 2006; Betancourt, 2011.

Las humedades y densidades de remoldeo en el canal se establecen de forma tal que garanticen la validez de los ensayos para un amplio rango de condiciones físicas (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Características físicas del suelo utilizado para los ensayos.

Profundidad, cm	G _s , g/cm ³	Consistencia, %			Composición, %			Materia orgánica, %
15...30		LP	LL	IP	Arena	Limo	Arcilla	
Estadísticos	2,70	29,10	63,90	34,80	15,00	40,00	45,00	2,60
\bar{X}	2,60	30,10	63,70	33,70	18,50	40,60	40,80	2,90
S	0,00053	1,15	4,54	6,97	17,79	22,01	32,33	0,0003
S ²	0,023	1,07	2,13	2,94	4,21	4,69	7,89	0,0070
e	0,0054	0,25	0,50	0,62	0,99	1,10	1,86	0,0070
CV	0,8599	3,57	3,34	7,87	22,80	11,55	19,30	0,5210

Donde: G_s -Densidad; LL -Límite líquido; LP -Límite plástico; IP -Índice de plasticidad; \bar{X} -Media; S -Desviación estándar; S² -Varianza; e -Error estándar; CV -Coeficiente de variación.

Se toma como nivel máximo de densidad seca del suelo 1,4 g/cm³, debido a que los resultados obtenidos por Herrera, 2006 demuestran que esta es la máxima densidad alcanzable por este

suelo, en el intervalo de humedad prefijado, lo cual imposibilita lograr compactaciones con una mayor densificación.

El comportamiento de la relación esfuerzo-deformación de este suelo está condicionado por el estado de humedad y densificación del suelo. Cuando el contenido de humedad es bajo (20 %) la falla característica es del tipo frágil con un punto de ruptura bien definido, pasado dicho punto el suelo muestra una deformación por aplastamiento. Cuando el contenido de humedad se encuentra cercano al límite plástico (30 %) la falla comienza a ser del tipo plástica, disminuyendo la resistencia a partir de un punto que se considera como el que define el valor de resistencia para el cual el suelo falla. Cuando el contenido de humedad del suelo sobrepasa este límite se deforma elásticamente hasta un punto, a partir del cual comienza a fluir sin definirse un punto de falla.

Este suelo fue caracterizado por Herrera (2006); González et al.; (2008), como una arcilla muy plástica, según el triángulo de clasificación textural, así como los índices de plasticidad y contenido de materia orgánica propuestos por Cairo (1980) citado por Herrera (2006).

4.4 Programa experimental empleado en la investigación.

Para la realización de los experimentos se desarrolló un plan factorial 2^3 para ser aplicado a la Variante I, donde se contemplaba como variables independientes: dos velocidades de desplazamiento del órgano de trabajo, coincidentes con las empleadas para la ejecución de labores de roturación; dos valores extremos fuera del rango de humedad de 20...27 %, considerado para la condición de tempero del suelo Ferralítico rojo empleado, evaluado por Herrera (2006) y dos niveles de compactación del suelo, bien diferenciados para cada valor de humedad a la que se realizaría cada corrida experimental. Obteniendo como parámetros de salida: calidad de labor caracterizada por el perfil resultante y el nivel de fragmentación del suelo, expresado por su granulometría y la resistencia traccional en cada ensayo.

La experimentación de la Variante II se ejecutó de forma reducida, con valores que imponen

condiciones favorables para evaluar las características de la roturación con esta variante, teniendo como variables independientes y dependientes los mismos factores considerados en la Variante I.

Los valores teóricos planificados por variantes para cada ensayo se ofrecen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Programa de las investigaciones experimentales por variantes.

Ensayo	Humedad, %	Compactación, kPa	Velocidad, m·s ⁻¹
Variante I			
I	<20	1 000 – 2 200	1,39
II	<20	2 500 – 3 500	1,39
III	>28	1 000 – 2 200	1,39
IV	>28	2 500 – 3 500	1,39
V	<20	1 000 – 2 200	2,22
VI	<20	2 500 – 3 500	2,22
VII	>28	1 000 – 2 200	2,22
VIII	>28	2 500 – 3 500	2,22
Variante II			
IX	<20	1 000 – 2 200	2,22
X	<20	2 500 – 3 500	2,22
XI	>28	1 000 – 2 200	1,39
XII	>28	2 500 – 3 500	1,39

La razón de no realizar los experimentos en su totalidad está dada en que el resultado final para la comparación entre ambas variantes no requiere una evaluación total, pues las condiciones más exigentes para la Variante II no mejorarían sus resultados.

4.5 Resultados del diseño de la brocha agrícola para la preparación localizada de suelos destinados a caña de azúcar.

A partir del estudio realizado referente a la preparación de suelos para la caña de azúcar, que incluye: exigencias agrotécnicas para la plantación e indicaciones del INICA al respecto; antecedentes y estado actual de esta labor en Cuba y otros países; análisis de los órganos que interactúan directamente con el suelo en su preparación, con mayor énfasis en los que realizan el corte horizontal del mismo, llegando a la conclusión previa de la creación de un nuevo diseño, denominándolo brocha agrícola, a partir de los supuestos teóricos desarrollados en el

Capítulo II, bajo una nueva concepción de tecnología de preparación de suelo de forma localizada.

El modelo propuesto está fundamentado, teniendo en cuenta los logros y deficiencias, de aperos destinados a esta labor bajo el principio del corte horizontal. Para el diseño de los órganos de corte que componen el modelo a investigar, se consideraron sus parámetros dimensionales, partiendo de realizar el análisis de los fundamentos teóricos y la información obtenida en los referentes bibliográficos (Figura 4.2).

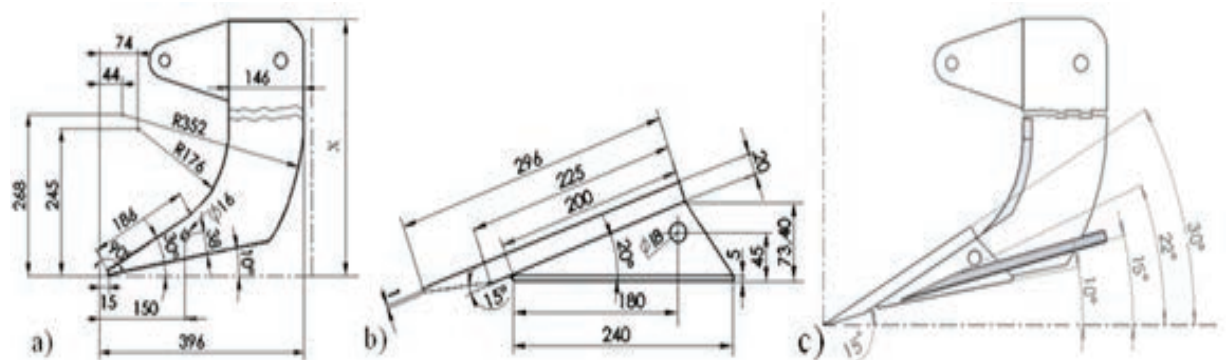


Figura 4.2 Parámetros del brazo y la cuña.

a) Dimensiones del brazo; b) Dimensiones de la cuña; c) Ángulos de incidencia de la cuña con respecto al suelo.

Los criterios anteriores sirvieron para establecer los parámetros de los modelos en escala natural para los brazos (Figura4.2a) y las cuñas (Figura4.2b) considerados como prototipo para el diseño de los órganos de los modelos experimentales de esta investigación, llevados a escala 1:2 mediante la aplicación de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento, y las dimensiones asumidas para los brazos, cuñas y los diferentes ángulos considerados son invariables entre ambos modelos, al ser corregidas respecto al modelo original (Figura 4.2c).

El diseño de las saetas, objeto controversial de la investigación (Figura 4.3) prevé, el estudio comparativo de dos variantes consistentes en: La variación consecutiva de las dimensiones del ancho de trabajo de las saetas (Variante I), buscando promover el suelo, de forma escalonada, en una dimensión similar al ancho efectivo a lograr en la geometría del surco, correspondiéndose con la proyección frontal del surcador a emplear, persiguiendo la

fracturación del suelo según el principio de Mohr-Coulomb; la otra variante, consiste en mantener el mismo ancho de corte en todas las saetas (Variante II), con la intención de realizar cortes rectos paralelos al suelo como lo realiza la maqueta experimental C-101XV.

En la Variante I, las dimensiones de las saetas varían su ancho de trabajo escalonadamente (Figura 4.3a y b), disminuyendo progresivamente entre el primer brazo y el cuarto, trazando una diagonal imaginaria entre sus extremos, reproduciendo el ángulo de fractura del suelo y buscando la proximidad a su pendiente natural (Herrera, 2006).

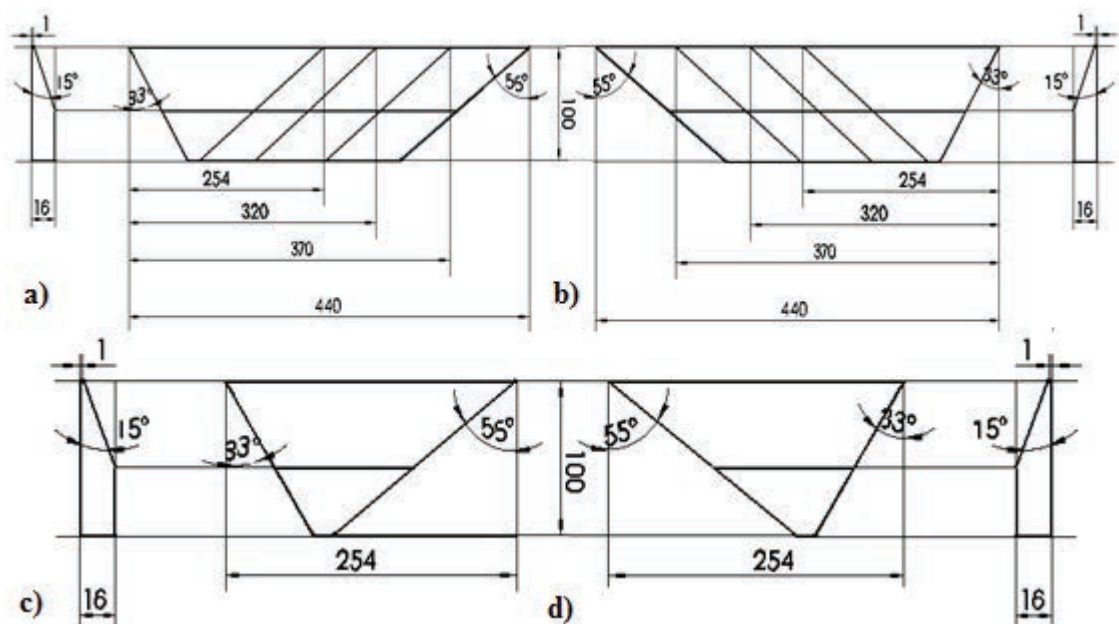


Figura 4.3 Dimensiones de las saetas izquierda y derecha en ambas variantes.
a) y b) Variante I; c) y d) Variante II.

En la Variante II, las dimensiones de las saetas (Figura 4.3c y d), tienen las mismas dimensiones en todos sus órganos de trabajo, buscando reproducir cortes perpendiculares al nivel superficial del suelo.

Considerando dichos supuestos teóricos, se concibió y diseñó el modelo de la brocha agrícola, asumiendo parámetros representativos de la brocha mecánica por su similitud y función, llevada a las dimensiones que debe poseer este apero para la preparación de suelos en caña de azúcar (Figura 4.4). Para ambas variantes, se utilizan las mismas dimensiones generales de los brazos y las cuñas, sólo existiendo variación en el largo de los brazos, magnitud indicada con

la letra X en la Figura 4.2a que establece la diferencia de escalonamiento en profundidad en la disposición de los órganos de corte.

Los parámetros como ángulo de incidencia con el suelo, superficie de corte y ángulo de salida de la cuña empleados en el diseño, son el resultado de investigaciones realizadas en suelos Ferralítico rojo y evaluados para determinar sus valores óptimos y empleados en la producción del subsolador-descepador C-101, subsoladores de la serie “Bayamo” y otros, siendo a su vez los valores típicos recomendados en los referentes bibliográficos (Norton, 1979, 1985, 1987; Ortiz y Rösell, 2007; Velarde et al.; 2010).

La cantidad de órganos de corte que integran el modelo, se fijó en cuatro, coincidiendo con el número de ellos empleados en el C-101XV con el cual se obtuvo un aceptable nivel de desterronamiento, pudiendo de esa forma establecer una adecuada base comparativa para ser utilizado como prototipo de referencia a utilizar en la Variante II. Como otro criterio a tomar en cuenta se consideró la relación que se establece entre la profundidad de corte total y la dimensión mayor de los fragmentos de suelo a lograr en cuatro cortes, resultado de dividir los 30 cm que se recomiendan en los instructivos técnicos del INICA como profundidad de plantación para la caña de azúcar. En tal sentido los fragmentos mayores que se logren, tendrán al menos una de sus dimensiones que no sobrepasarán los 7,5 cm, dimensión dada por el escalonamiento entre brazos. En correspondencia con lo indicado en las exigencias agrotécnicas para la preparación de suelos destinados a la plantación de la caña de azúcar... “La preparación de tierra será uniforme y a una profundidad mínima de 22 cm...” las dimensiones de los fragmentos de suelo no superarán los 50 mm en su dimensión mayor, ausencia de cantidades significativas de partículas mayores que 150 mm”, como lo refiere la Norma NRAG- 047, 1978 “evitar la aparición de crudos” (INICA, 2007). En concordancia con el análisis realizado en el Capítulo I se concluye que pueden resultar suficientes cuatro

órganos de corte para el diseño propuesto y lograr una granulometría aceptable en un suelo Ferralítico rojo.

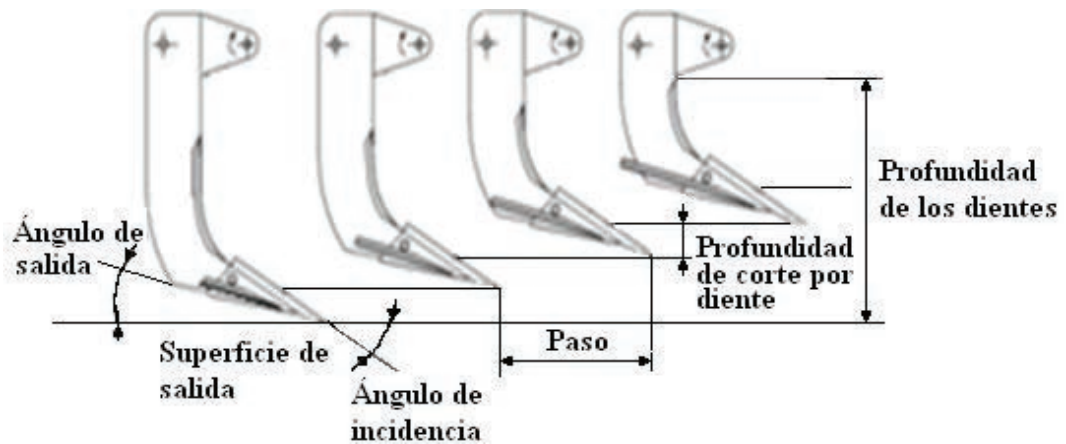


Figura 4.4 Parámetros característicos de la brocha agrícola.

Durante la ejecución de la labor, el control de la profundidad de corte del primer órgano, depende del valor que fije el operador del tractor, y su variabilidad está sujeta a las irregularidades del perfil superficial del suelo, por lo cual no es posible fijar un valor constante de profundidad de trabajo de éste órgano, como sucede con los sucesivos, donde la profundidad de corte es fijada a valores constantes. La condición de inestabilidad en la profundidad para el primer órgano, puede ser el causante de mayores dimensiones en los fragmentos de suelo cortado.

Siguiendo los criterios para el diseño de la brocha agrícola, el valor dado para la separación entre órganos de corte (o paso), y la profundidad asignada a cada corte por cuña (o diente), se sustenta en el criterio que los fragmentos (o virutas) del suelo cortados, no pueden exceder en al menos una dimensión, al tamaño del escalón de corte impuesto y tienen que pasar por el espacio libre existente, entre la proyección normal a la cara de la cuña, y la superficie inferior del órgano que la precede, para evitar atoros. La magnitud inferior que puede existir entre ambos órganos está dada, por el espacio libre para la salida de los fragmentos de suelo, y es determinada por la relación que se establece entre los ángulos de salida de cada órgano y de incidencia del siguiente. Sin embargo, la distancia entre órganos de corte exige asumir un

criterio práctico que la hace mayor por ser necesario considerar el ángulo de giro del brazo (señalado en color azul), al actuar el elemento de protección por sobrecarga (Figura 4.5a).

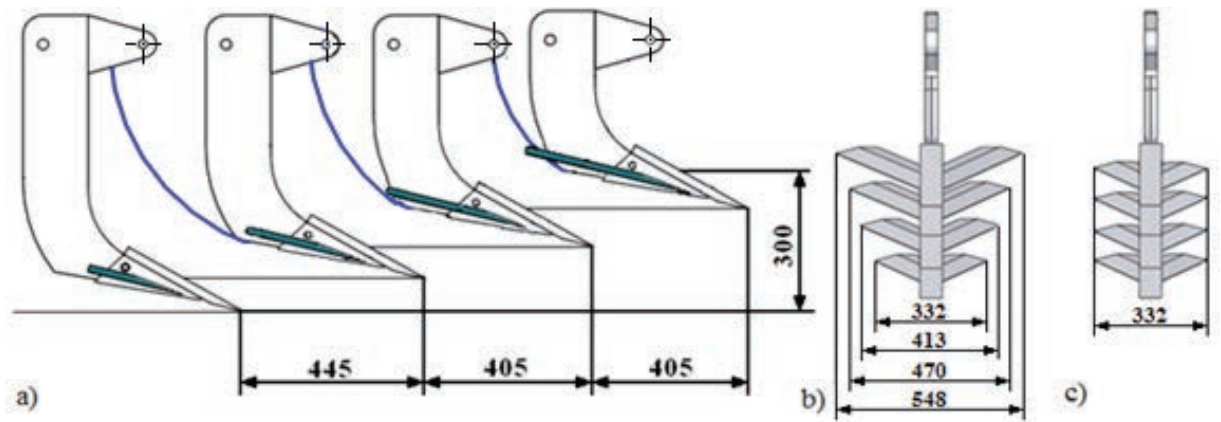


Figura 4.5 Dimensiones características de los modelos propuestos.

a) Criterio asumido para el distanciamiento entre brazos; b) Ancho máximo de cada saeta en la Variante I; c) Ancho máximo de las saetas en la Variante II.

En la Figura 4.5b y c) se puede apreciar la diferencia entre las dimensiones en el ancho y disposición de las saetas en las respectivas cuñas para las dos variantes.

En el diseño a escala natural para la Variante I (Figura 4.6a) la disposición de los brazos, cuñas y saetas propuestas se dispondrán sobre la propia estructura de la maqueta experimental utilizada de base comparativa para esta investigación, como se muestra en la Figura 4.6b para su experimentación en condiciones reales, con una disposición y dimensiones finales acorde a los resultados obtenidos en la experimentación a escala en el canal de suelos.

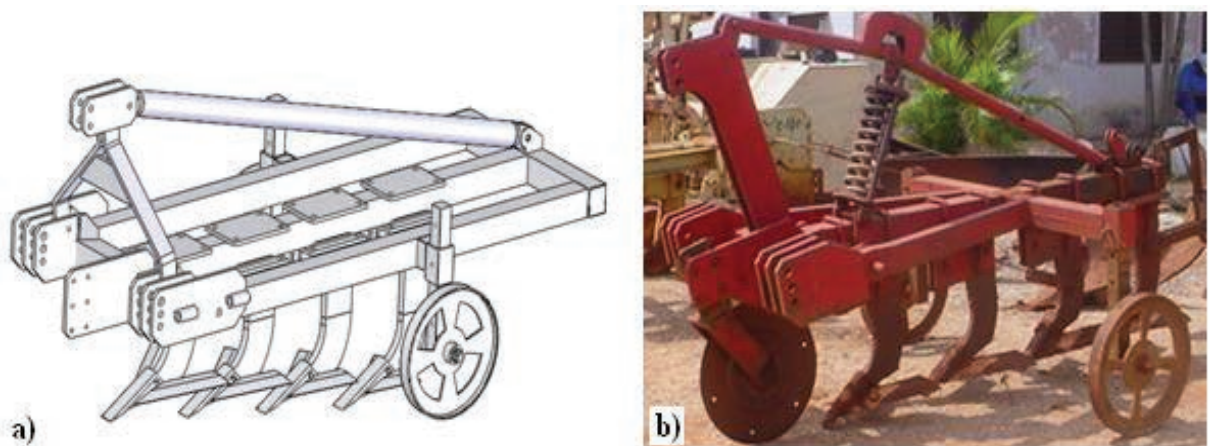


Figura 4.6. Montaje del diseño propuesto y disposición de los órganos de corte sobre el bastidor de la maqueta experimental.

a) Diseño propuesto para la Variante I; b) Maqueta experimental C-101XV empleada como base comparativa en la Variante II.

4.6 Modelo experimental fundamentado a partir de la aplicación de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento.

Para la creación del modelo experimental de la brocha agrícola, se utilizan las dimensiones propuestas en el modelo real, como diseño de referencia, para establecer a partir del factor de escala asumido, las dimensiones de los modelos experimentales en las dos variantes. Llevado a escala 1:2, a partir de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento (Figura 4.7).

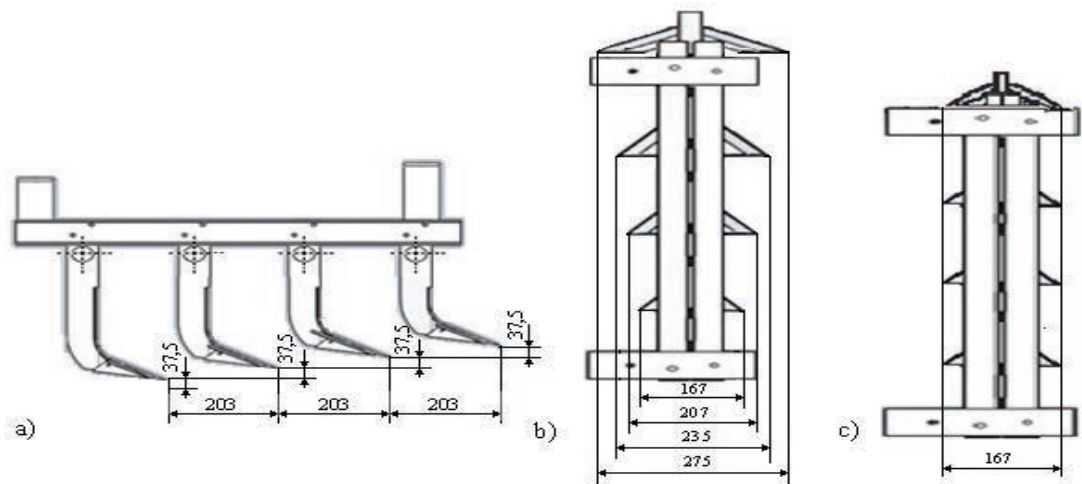


Figura 4.7. Dimensiones principales de las dos variantes de modelos experimentales.

a) Distribución de los brazos para ambas variantes experimentales; b) Variante I con ancho variable de las saetas; c) Variante II con igual ancho de las saetas.

Los cuatro brazos fueron montados de forma consecutiva sobre un bastidor rígido, y espaciados longitudinalmente de forma que respetara las dimensiones a escala del modelo original. El escalonamiento para los cortes en igual proporción, (Figura 4.8c) con cuatro cortes a $3,7 \pm 0,2$ cm como profundidad de trabajo.

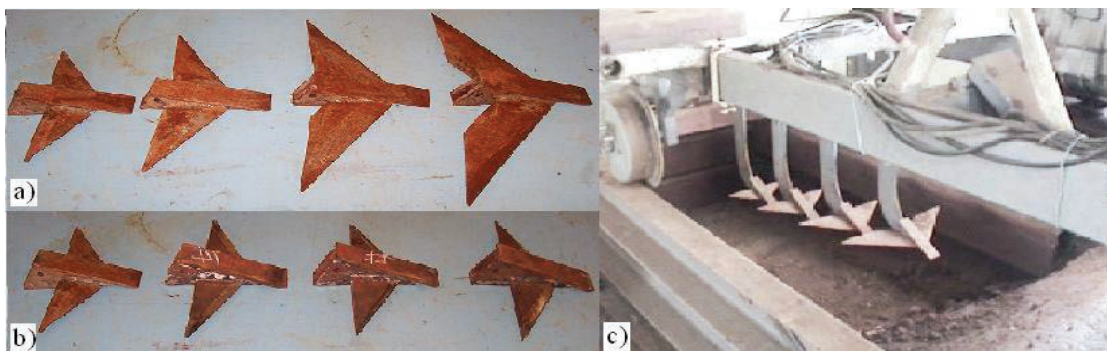


Figura 4.8. Cuñas con saetas utilizadas en las variantes experimentales.

a) Cuñas con saetas de la variante I; b) Cuñas con saetas de la variante II; c) Brazos y cuñas con saetas montadas en el vehículo portaimplementos.

4.7 Realización de los ensayos en el canal de suelos.

Velocidades obtenidas durante los ensayos.

La distancia recorrida durante los ensayos es obtenida como se muestra en la Figura 4.9.

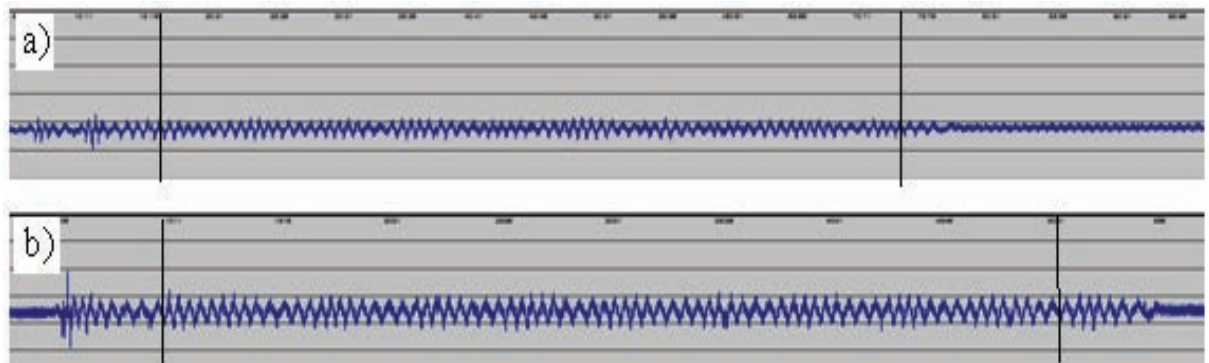


Figura 4.9. Registros de velocidades durante los experimentos.

a) Mayor velocidad; b) Menor velocidad.

En la Tabla 4.4 se brindan los valores teóricos de velocidad considerados en el diseño de experimento y los obtenidos en cada experimento de ambas variantes.

El rango de velocidades para cada experimento se fijó, según la relación establecida entre los valores seleccionados, acorde con las velocidades utilizadas en roturación y las transformaciones obtenidas según la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento.

Tabla 4.4. Velocidades teóricas propuestas y las desarrolladas en cada experimento.

Ensayo	Velocidad teórica		Velocidad real		Diferencia
	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	%
Variante I					
I	1,39	5,00	1,35	4,86	97,1
II	1,39	5,00	1,35	4,86	97,1
III	1,39	5,00	1,37	4,88	98,6
IV	1,39	5,00	1,37	4,88	98,6
V	2,22	7,99	2,06	7,41	92,8
VI	2,22	7,99	2,06	7,41	92,8
VII	2,22	7,99	2,12	7,63	95,5
VIII	2,22	7,99	2,12	7,63	95,5
Variante II					
IX	2,22	7,99	2,18	7,84	98,2
X	2,22	7,99	2,18	7,84	98,2
XI	1,39	5,00	1,38	7,91	99,1
XII	1,39	5,00	1,38	7,91	99,1

En ambas variantes la velocidad obtenida es la calculada mediante los registros de la distancia recorrida y tiempo de duración de la corrida experimental, la diferencia con respecto a los valores teóricos fijados, es motivada por la resistencia que ofrece el suelo al modelo experimental durante cada experimento, produciendo patinaje entre el cable y el tambor en el sistema de tracción del canal.

Resultado de la obtención de la humedad durante los ensayos.

Durante la preparación de las condiciones de humedad del suelo, para cada corrida experimental, se realizaron seis registros de esta por cada tramo experimental, antes de aplicar la compactación. Los valores promedio de humedad obtenidos para ambas variantes se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Valores de humedad promedio obtenidos por ensayo.

Variantes	I								II			
Corridas experimentales	1		2		3		4		5		6	
Ensayos	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Frecuencia, u	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Media, %	19,81	21,41	28,41	29,74	19,06	20,75	31,13	30,31	19,39	20,76	30,45	30,39
Varianza, %	2,005	0,14	3,98	5,82	2,20	2,65	4,38	0,007	0,39	6,34	0,39	0,37
Desviación típica, %	1,41	0,37	1,99	2,41	1,48	1,63	2,09	0,08	0,62	2,51	0,62	0,61
Mínimo, %	17,8	20,8	24,7	24,0	17,2	18,4	22,8	26,26	22,7	27,7	29,7	29,5
Máximo, %	21,7	21,7	31,0	30,6	20,9	22,6	27,7	26,48	24,3	34,7	31,1	30,9
Rango, %	3,9	0,9	6,3	6,6	3,7	4,2	4,9	0,22	1,6	7,0	1,4	1,4
Asimetría tipificada	-0,05	0,35	-0,26	-0,83	0,14	-0,36	-0,09	0,47	-0,53	-0,44	-0,21	-0,86
Curtosis tipificada	-0,37	-1,02	1,25	0,12	-0,92	-0,58	-1,26	-0,66	-0,64	-0,02	-1,30	-0,88

Al comparar el comportamiento de las mediciones, se puede observar la marcada diferenciación entre los valores que caracterizan los ensayos de mayor y menor humedad. Existe un 95 % de intervalos de confianza para las medias y las desviaciones típicas, no existiendo desviaciones significativas de la normalidad, valores de asimetría estandarizada fuera del rango esperado ni de la curtosis. El comportamiento de estos resultados de humedad está representado de forma gráfica en la Figura 4.10, donde existe un comportamiento uniforme entre los valores de cada ensayo, representados por las mediciones realizadas en los rangos: 1...6 correspondiente a menor compactación; 7...12 con mayor compactación.

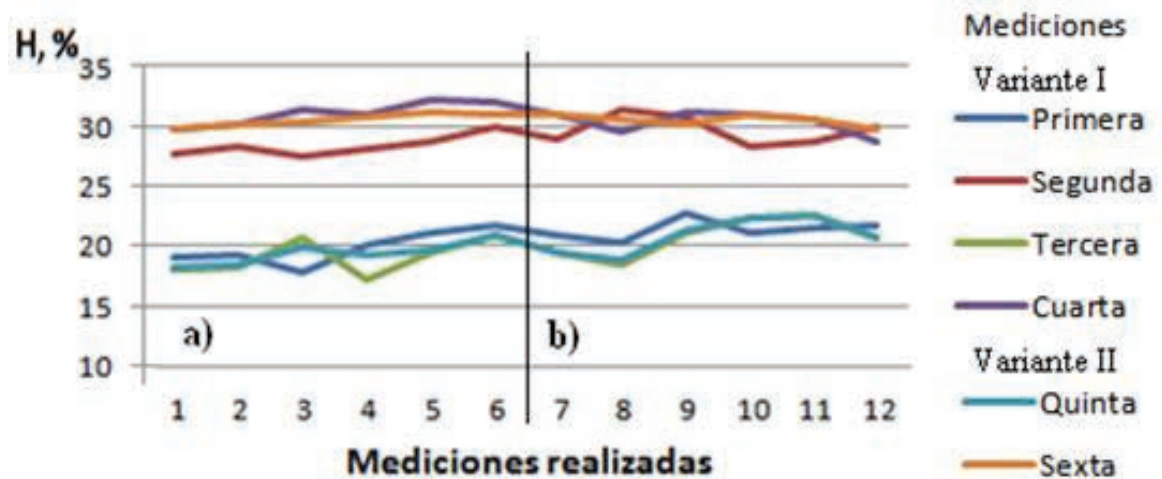


Figura 4.10 Distribución de la humedad a lo largo del canal.

a) Tramo de menor compactación; b) Tramo de mayor compactación.

Resultado de la compactación previa a los ensayos.

Después de obtener los valores fijados de humedad para todo el canal, y completado el proceso de compactación diferenciada entre las áreas de menor y mayor compactación que definen cada ensayo, se realizan los registros de resistencia a la penetración y humedad del suelo respectivamente (Figura 4.11).



Figura 4.11 Lugar de determinación de la humedad y la compactación previo a cada ensayo.

Estas mediciones se realizaron lo más próximo al lugar por donde pasaron los órganos de corte al ejecutar los experimentos, sin crear disturbios en la estructura del suelo compactado, que pudieran alterar los resultados. Los valores promedio de compactación obtenidos para cada variante por ensayo aparecen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Valores promedio de compactación obtenidos por ensayo.

Compactación promedio por ensayo, kPa						
Variante	I				II	
Corridas experimentales	1	2	3	4	5	6
Ensayo	I	III	V	VII	IX	XI
Menor compactación	1 979	1 115	2 182	1 922	1 712	1 701
Ensayo	II	IV	VI	VIII	X	XII
Mayor compactación	3 268	2 514	3 220	2 937	2 961	2 941

La distribución de la compactación resultante por perfil de suelo para las variantes estudiadas contemplan un rango amplio de compactación, notándose en todos los casos el incremento progresivo con la profundidad (Tabla 4.7), coincidiendo con los valores reportado por otros autores en suelo Ferralítico rojo, en plantaciones de caña de azúcar con 4...7 años (Córdoba, 2004; Albóniga, 2007; González, 2008; Pérez, 2009; Leyva 2010; Betancourt 2011).

Tabla 4.7 Comportamiento de la compactación obtenida por niveles de profundidad.

Profundidad, cm	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
Frecuencia, u	12	12	12	12	12	12	12
Media, cm	1578,42	1851,83	2085,83	2176,92	2497,08	2770,92	3218,08
Varianza, cm	$9,8 \times 10^5$	$1,06 \times 10^6$	$8,2 \times 10^5$	$6,7 \times 10^5$	$6,2 \times 10^5$	$6,1 \times 10^5$	$3,8 \times 10^5$
Desviación típica, cm	992,568	1031,01	906,279	818,638	789,819	777,927	617,251
Mínimo, cm	324,0	398,0	803,0	1043,0	1230,0	1516,0	2309,0
Máximo, cm	3139,0	3435,0	3467,0	3714,0	3820,0	3974,0	4150,0
Rango, cm	2815,0	3037,0	2664,0	2671,0	2590,0	2458,0	1841,0
Asimetría tipificada	0,489	0,150	0,059	0,547	-0,588	-0,598	-0,352
Curtosis tipificada	-0,865	-0,762	-0,878	-0,253	-0,250	-0,475	-0,912

El incremento del valor de la compactación por niveles de profundidad a lo largo del canal, para cada una de las corridas experimentales se muestra en la Figura 4.12, donde se observa el ascenso de la compactación alcanzada en la preparación del suelo en cada ensayo.

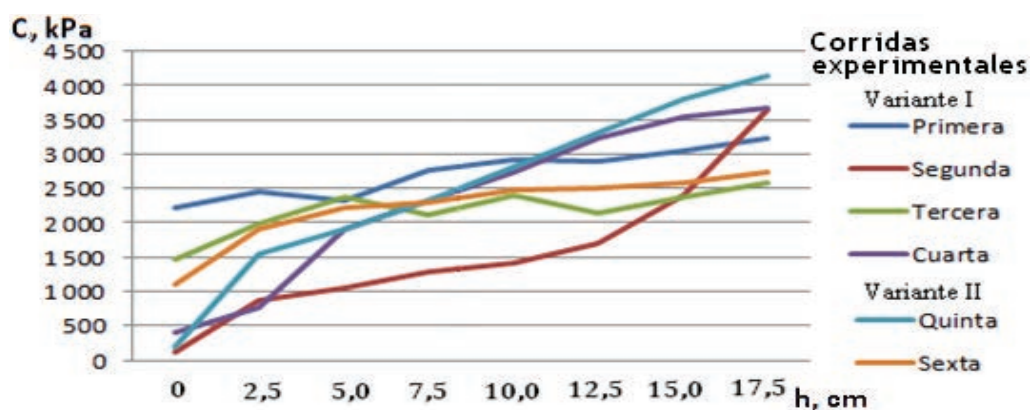


Figura 4.12 Comportamiento de la compactación a diferentes profundidades a lo largo del canal en cada corrida experimental.

4.8 Determinación de la calidad de labor de las variantes objeto de investigación.

Perfiles obtenidos por variantes.

Variante I.

Los perfiles obtenidos en los ensayos (Figura 4.13) se representan en las Figuras 4.14a y 4.14b, donde se observa el incremento del volumen total del suelo laborado, así como la reproducción superpuesta de todos los perfiles de suelo evaluados.



Figura 4.13 Determinación del perfil resultante.

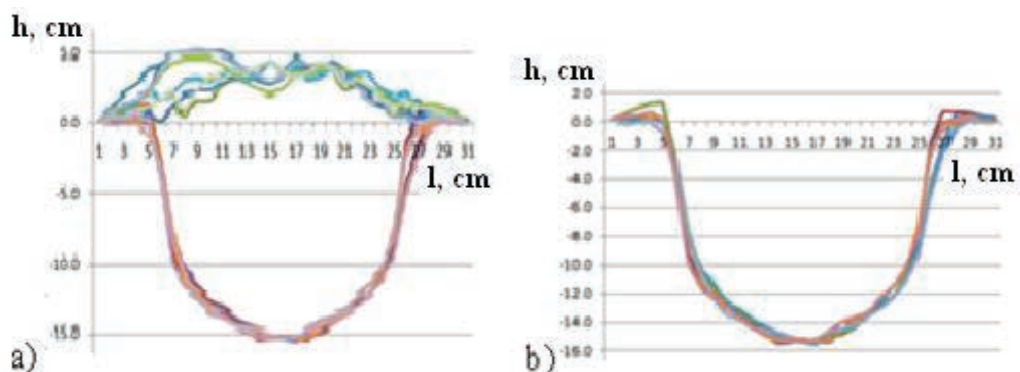


Figura 4.14 Perfil resultante en los ensayos.

a) Superpuesto los perfiles de suelo promovido; b) Vista frontal de todos los perfiles agrupados con el suelo retirado.

En cada ensayo se determinaron tres perfiles, llevando los valores obtenidos a tablas de Excel para su tratamiento primario y cálculo de las áreas generadas. Los valores promedio por ensayo aparecen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Valores promedio del área labrada por cada ensayo.

Valor medio de la superficie labrada por ensayo, cm ²									
Ensayo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Media
Área labrada	512,27	504,53	511,98	512,60	521,73	515,73	522,22	510,44	513,94
Valor medio de la superficie labrada transformados a escala real, m ²									
Ensayo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Media
Área labrada	0,205	0,202	0,205	0,205	0,209	0,206	0,209	0,204	0,206

La evaluación estadística de cada una de las áreas transversales del perfil del surco, se muestran en la Tabla 4.9. La superficie labrada, transformada a escala real asciende a 0,206 m², con una confianza del 95 % y error estándar de $\pm 0,009$ m².

Tabla 4.9 Estadígrafos del perfil resultante.

Media, cm ²	513,90	Varianza, cm ⁴	30,3
Desviación estándar, cm ²	5,50	Mínimo, cm ²	505,0
Coefficiente de variación, %	1,07	Máximo, cm ²	522,0
Sesgo, cm ²	0,18	Rango, cm ²	17,0
Sesgo estandarizado, cm ²	0,54	Valor -P	<0,05

Al realizar el análisis de regresión múltiple al perfil ($P_{Var I}$), contra la acción de las tres variables independientes muestra un comportamiento como el descrito por la ecuación (4.1), y reflejando los valores que aparecen en la Tabla 4.10. La ecuación del perfil ajustado del es:

$$P_{Var I} = 736,15 - 2,35V + 0,38H - 0,003C, \text{ cm}^2 \quad (4.1)$$

De dicho resultado se puede significar que la compactación es la variable independiente que ejerce influencia no significativa sobre el perfil, mientras que la velocidad tiene una mayor influencia en la estabilidad de su generación.

Tabla 4.10 Resultado del análisis de regresión del perfil.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Perfil, cm ²	736,16	27,07	27,20	0,0000
Velocidad, m·s ⁻¹	-2,35	0,29	-8,22	0,0000
Humedad, %	0,38	0,11	3,42	0,0012
Compactación, kPa	-0,003	0,0006	-4,25	0,0001

El estadístico $R^2 = 56,74$ % indica que el modelo ajustado explica 56,73 % de la variabilidad en el perfil, mientras que el estadístico R^2 ajustado para tres grados de libertad es igual a 54,24 %, resultando más apropiado para comparar los modelos con diferente número de variables independientes. Al realizar el ajuste de la ecuación, se puede comprobar que su mejor comportamiento respecto a la velocidad (P_{VI}) responde a un polinomio de 3^{er} orden (4.2):

$$P_{VI} = 253,09V^3 - 1470,5V^2 + 2789,7V - 1\,200,5, \text{ cm}^2 \quad (4.2)$$

En la Figura 4.15 aparecen representados los valores promedio de cada variable independiente respecto al perfil generado, así como la línea de mejor ajuste para cada una de las variables.

El comportamiento del perfil respecto la humedad (P_{HI}) y la compactación (P_{CI}) queda representado por las ecuaciones polinómicas de 5^{to} orden (4.3) y (4.4) y R^2 igual a 23,8 % y 6,29 % respectivamente, marcando una notable diferencia en la generación de perfil con respecto a la velocidad, dado por las ecuaciones:

$$P_{HI} = 6,0 * 10^{-4}H^5 - 6,9 * 10^{-2}H^4 + 3,4H^3 - 82,8H^2 + 990,5H - 4130,9, \text{ cm}^2 \quad (4.3)$$

$$P_{CI} = -1,0 * 10^{-15}C^5 + 1,0 * 10^{-11}C^4 - 5,0 * 10^{-8}C^3 + 8,0 * 10^{-5}C^2 - 5,31 * 10^{-2}C + 522,46, \text{ cm}^2 \quad (4.4)$$

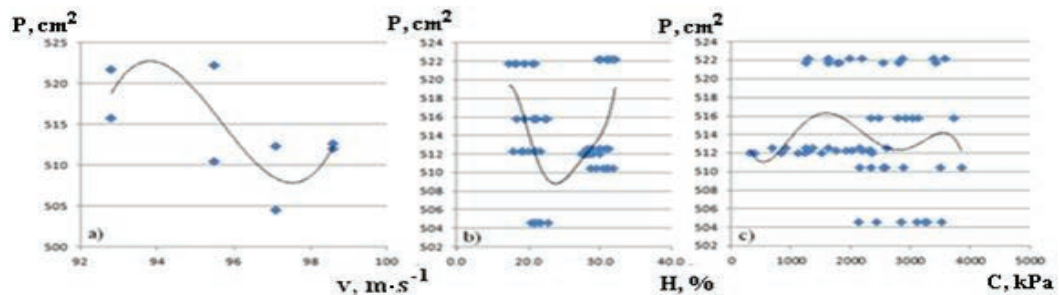


Figura 4.15 Resultado del análisis mediante regresión múltiple del perfil.
a) Velocidad vs perfil; b) Humedad vs perfil; c) Compactación vs perfil.

Variante II.

Los perfiles obtenidos en los ensayos IX...XII donde las saetas tienen el mismo ancho de labor (Figura 4.16) presentan como característica un cambio brusco en la profundidad respecto al nivel superior del suelo; estos valores medidos, reproducen paredes laterales próximas a la perpendicularidad respecto al nivel superficial del suelo en el canal antes de comenzar los ensayos.



Figura 4.16 Determinación del perfil de suelo.

Los valores promedio, obtenidos en los ensayos de esta variante, pueden ser analizados en la Tabla 4.11, donde al compararlos con los obtenidos en la Variante I se puede comprobar la diferencia en el área removida, como era de esperar, al tener todas las saetas con igual ancho.

Tabla 4.11 Valores promedio del área labrada.

Valor medio de la superficie labrada por ensayo, cm ²					
Ensayos	I	II	III	IV	Media
Área labrada	353,6	297,0	346,4	307,3	326,1
Valor medio de la superficie labrada transformados a escala real, m ²					
Ensayos	I	II	III	IV	Media
Área labrada	0,118	0,121	0,125	0,118	0,121

En las Figuras 4.17a y 4.17b están representados en forma superpuesta los promedios de los valores obtenidos de los doce perfiles.

En la Figura 4.17a se muestra el incremento del volumen total del suelo fracturado, así como el agrupamiento de los fragmentos del suelo cortado, que prácticamente se ubican sobre la propia área transversal por donde pasó el órgano de corte, no existiendo desplazamiento lateral de éste por la acción de las saetas. La similitud en la reproducción de los perfiles de suelo por debajo del borde superior, resulta más dispersa que en la Variante I, para condiciones similares del comportamiento de las variables independientes con las que fue evaluado.

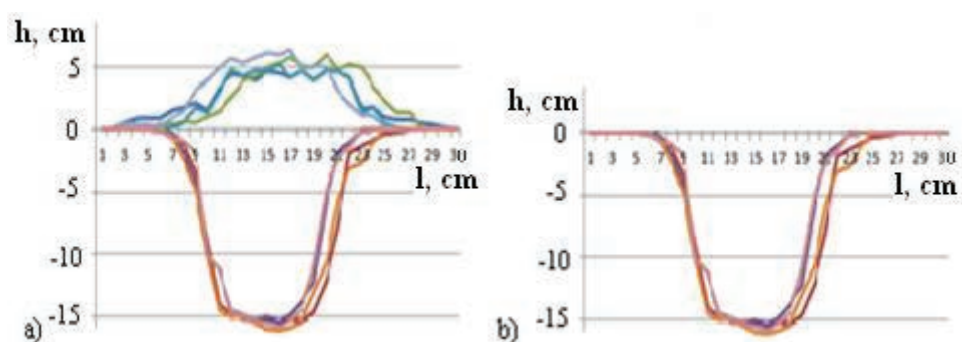


Figura 4.17 Perfil resultante en los ensayos.

- a) Superpuesto los perfiles antes de retirar el suelo promovido;
- b) Vista frontal después de retirar el suelo fragmentado.

En la Figura 4.17b se puede comprobar, que en la reproducción del perfil, existe una menor similitud entre ellos después de retirado el suelo fracturado, comparado con la Variante I. La causa es atribuible a dos comportamientos que se interrelacionan en esta variante: la

curvatura que se genera en el borde superior del surco, y el referente al desprendimiento del suelo en sus paredes laterales.

La primera causa, atribuible al criterio de fractura del suelo propuesto por Coulomb, donde el suelo al recibir una resistencia tractiva busca el ángulo de fractura de menor tensión y la segunda causa, la referente al desprendimiento del suelo en las paredes laterales del surco (Figura 4.18), no apreciable en los gráficos mostrados en la Figura 4.17, por quedar a ambos lados de las varillas del perfilómetro más próximas de las paredes interiores del surco. Estos desprendimientos son causados por la liberación de las tensiones activas y pasivas existentes en el suelo y que son liberadas al producirse el corte, teniendo su explicación en los criterios de Rankine sobre estas tensiones y la Teoría de la Espiral Logarítmica.

Un aspecto importante de las exigencias agrotécnicas en la preparación de suelo para caña de azúcar, es la estructura geométrica a la que debe quedar conformado el surco para la plantación, según la Norma Ramal NRAG-047 que data de 1978 y más reciente el Instructivo Técnico del INICA, 2007; 2012 donde se indica, que la geometría transversal del surco preparado para la plantaciones preferiblemente, en forma de U no de V.



Figura 4.18 Desprendimientos del suelo causados por la liberación de las tensiones internas.

Estas indicaciones no deben confundirse con el hecho de que geométricamente, sea similar a la obtenida con esta variante, en ambos documentos consideran toda la superficie del suelo a

plantar promovida. En este caso, sólo está fragmentada la parte del surco (Figura 4.17b) de donde se extrajo el suelo cortado, al que se le incorpora el suelo desprendido de las paredes laterales, provocado al liberarse las tensiones activas y pasivas que existen en él.

Al realizar la evaluación estadística, con los datos obtenidos durante el procesamiento primario del perfil de suelo, se muestran los resultados en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Estadígrafos del perfil resultante.

Media, cm ²	326,06	Varianza, cm ⁴	613,52
Desviación estándar, cm ²	24,77	Mínimo, cm ²	297,03
Coeficiente de variación, %	7,60	Máximo, cm ²	353,58
Sesgo, cm ²	0,03	Rango, cm ²	56,55
Sesgo estandarizado, cm ²	0,52	Valor-P	0,00

Al ajustar los valores obtenidos mediante un modelo de regresión lineal múltiple la relación entre el perfil resultante y las tres variables independientes se obtienen los resultados que aparecen en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Resultado del análisis de regresión del perfil.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Perfil, cm ²	607,37	216,82	2,80	0,01
Velocidad II, m·s ⁻¹	-0,49	0,64	-0,77	0,45
Humedad II, %	-6,17	4,38	-1,41	0,17
Compactación II, Pa	-0,02	0,006	-2,70	0,01

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

La ecuación que representa el modelo ajustado es:

$$P_{\text{Var II}} = 607,37 - 0,491V - 6,165H - 0,016C, \text{ cm}^2 \quad (4.5)$$

Para este caso resulta más significativo el efecto de la humedad sobre el perfil del suelo generado. El estadístico $R^2 = 36,75$ % de la variabilidad en el Perfil ($P_{V II}$), mientras que el modelo ajustado R^2 a tres grados de libertad es igual a 28,85 %. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del

95,0 %. Al realizar el ajuste de la ecuación, se puede comprobar que su mejor comportamiento responde a un modelo exponencial para la velocidad (4.6), Figura 4.19a:

$$P_{V\text{II}} = 330e^{-0,008V}, \text{cm}^2 \quad (4.6)$$

A pesar de representar el mejor ajuste matemáticamente, no posee un valor significativo en la generación del perfil, como quedó evidenciado, de igual forma cuando se evaluó la Variante I, donde la generación de perfil del suelo recaía más en la relación entre la compactación y la influencia que ejercen sobre ella la humedad.

El comportamiento del perfil respecto a la humedad y la compactación queda representado matemáticamente por las ecuaciones polinómicas de 6^{to} orden (4.7) y (4.8) y R² igual a 0,22 % y 0,32 % respectivamente, siendo las de mejor ajuste, marcando una notable diferencia en la generación de perfil con respecto a la velocidad.

$$P_{H\text{II}} = 0,002H^6 - 0,29H^5 + 17,12H^4 - 541,28H^3 + 9\,536,1H^2 - 8\,8776H + 341\,718, \text{cm}^2 \quad (4.7)$$

$$P_{C\text{II}} = 1,0 \cdot 10^{-18}C^6 - 1,0 \cdot 10^{-14}C^5 + 6,0 \cdot 10^{-11}C^4 - 1,0 \cdot 10^{-7}C^3 + 2,0 \cdot 10^{-4}C^2 - 0,17C + 386,16, \text{cm}^2 \quad (4.8)$$

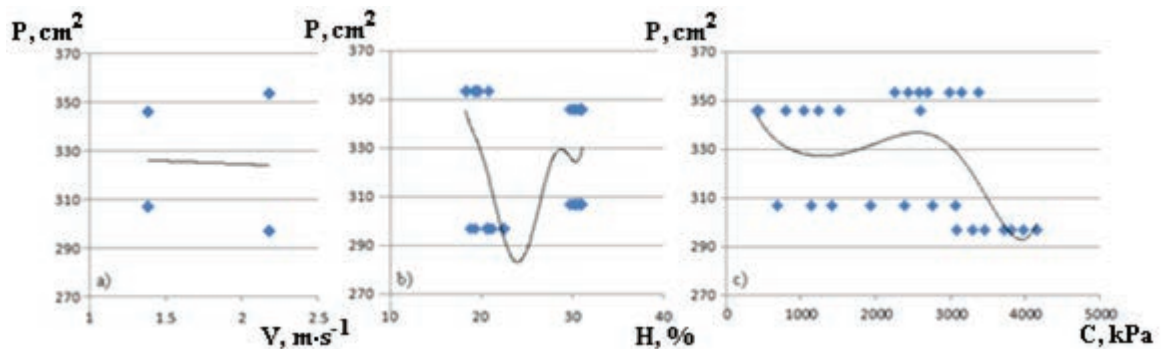


Figura 4.19 Resultado del análisis mediante Regresión Múltiple del Perfil.

a) Velocidad vs perfil; b) Humedad vs perfil; c) Compactación vs perfil.

Determinación de la granulometría en las variantes evaluadas.

El volumen de suelo extraído, en cada espacio seleccionado donde se realizó la evaluación del perfil, representa el 100 % a evaluar, fue pesado y tamizado para su clasificación según las dimensiones de >40, ≤40...>20, ≤20...>10 y ≤10 mm respectivamente (Figura 4.20).



Figura 4.20 Fragmentos de suelo clasificados.

Variante I.

El resultado de la clasificación del suelo, al ser pasado por los tamices, pesadas las muestras y procesados de forma estadística, arroja el resultado mostrado en la Tabla 4.14.

La característica predominante en los fragmentos del suelo con diámetros mayores de cuarenta milímetros y mayores de veinte milímetros, es que una o dos de sus dimensiones no pasaban libremente por los orificios del tamiz, y la apariencia brillante de una de sus caras, demostraba que pertenecían al nivel superficial del suelo, además que al extraerlos se encontraban situados por encima de todo el suelo promovido, lo que confirma su origen.

Tabla 4.14 Comportamiento de la fragmentación del suelo.

Rangos de fragmentos evaluados, mm	Valor medio de la fragmentación por experimento, %								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Media
R1(>40)	17,64	20,02	9,37	14,52	12,24	13,38	14,76	15,,82	14,72
R2($\leq 40 \dots > 20$)	19,69	14,21	17,26	16,78	14,53	12,96	11,95	10,56	14,74
R3($\leq 20 \dots > 10$)	14,53	13,63	15,92	19,09	12,98	12,42	11,11	13,57	14,16
R4(≤ 10)	48,14	52,15	57,45	49,61	60,25	61,23	62,18	60,04	56,38
Varianza	242,48	335,88	479,88	272,66	553,16	583,69	616,82	550,41	454,37
Desviación típica, %	15,57	18,33	21,91	16,51	23,51	24,16	24,84	23,46	21,04
Error estándar, %	7,79	9,16	10,95	8,26	11,76	12,08	12,42	11,73	10,52
Coefficiente de variación, %	62,29	73,30	87,63	66,05	94,08	96,64	99,34	93,85	84,14
Significación	p<0,05								

Existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes experimentos (Figura 4.21), respecto al grado de fragmentación del suelo, con un nivel de confianza del 95 %.

Esta misma relación porcentual se va a mantener al ser llevados los fragmentos de suelo, clasificados por sus respectivas masas, a valores en verdadera magnitud.

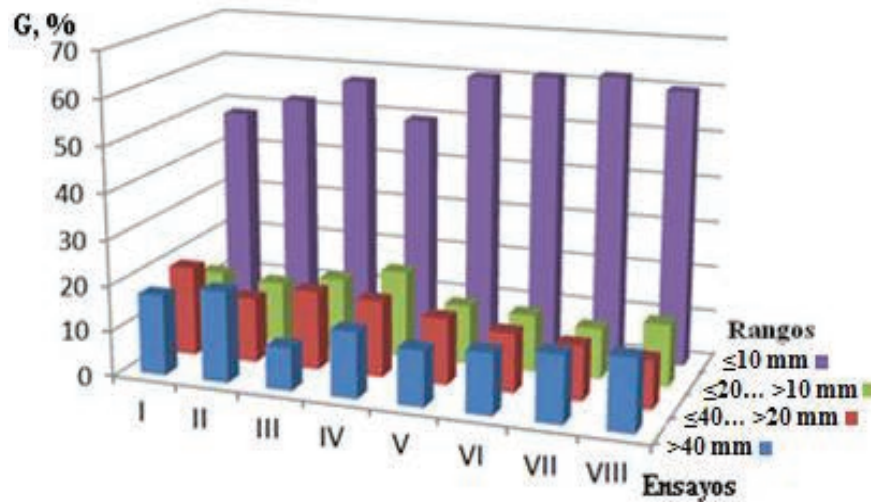


Figura 4.21 Distribución de fragmentos de suelo en cada corrida experimental.

Por tal motivo para ser procesados estadísticamente, se puede continuar con su clasificación y análisis en las dimensiones a escala. Fueron evaluados, estadísticamente de forma independiente (Tabla 4.15), cada una de las muestras y reunidas posteriormente las que clasifican dentro de los parámetros exigidos por las exigencias agrotécnicas para la plantación de caña de azúcar.

Tabla 4.15 Clasificación y evaluación estadística de las dimensiones de los fragmentos de suelo.

Estadígrafos, %	>40 mm	≤40...>20 mm	≤20...>10 mm	≤10 mm	≤40 mm
Media	14,72±0,8	14,74±0,8	14,16±0,16	56,38±1,4	85,28±0,8
Varianza	9,47	8,16	5,33	27,78	9,47
Desviación estándar	3,08	2,85	2,31	5,27	3,08
Coeficiente de variación	20,91	19,32	16,31	9,35	3,61
Mínimo	9,37	10,56	11,11	48,14	79,98
Máximo	20,02	19,69	19,09	62,18	90,63
Rango	10,65	9,13	7,98	14,04	10,65
Sesgo	0,02	0,26	0,97	-0,48	-0,02
Sesgo estandarizado	0,06	0,78	2,95	-1,46	-0,06
Curtosis	-0,44	-0,94	0,32	-1,49	-0,44
Curtosis estandarizada	-0,68	-1,44	0,49	-2,28	-0,68
Intervalo de confianza	95	95	95	95	95
Valor-P	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001

Como resultado del análisis de los datos obtenidos se destaca la existencia de 14,8 % de fragmentos descartados por el tamiz de diámetro 40 mm, pudiendo señalar que la geometría que caracterizaba a estos fragmentos, en una de sus dimensiones, no sobrepasaba ese diámetro, y durante los ensayos se pudo observar que su aparición se producía por el primer órgano de corte, que actúa directamente sobre la capa superficial, más compacta y que puede ser desprendida libremente, sin recibir compresión para su fractura. También resulta significativo el porcentaje de fragmentos con dimensiones menores de 10 mm (56,4 %) caracterizado por el tamaño de partículas con apariencia de fractura, no de mullición, incluso en los ensayos con bajo porcentaje de humedad, sin llegar a la dimensión de polvo, condición cuestionada por la Agricultura de Conservación, en que serían fácilmente erosionable por el agua y el viento.

Los valores promedio de tamaño de fragmentos del suelo, comprendidos entre $\leq 40 \dots > 20$ mm y $\leq 20 \dots > 10$ mm también cumplen con las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar y sus dimensiones resultan apropiadas para el tape de los esquejes. El comportamiento de ambos grupos de fragmentos de forma porcentual se comportó similar al de mayores de 40 mm, pero para un análisis estadístico, estos fragmentos resultan apropiados, y pueden ser agrupados junto a los de dimensiones ≤ 10 mm, separándose en dos grupos: > 40 mm y agrupados $\leq 40 \dots > 20$ mm, $\leq 20 \dots > 10$ mm y ≤ 10 mm.

La relación que se establece para la condición antes expuesta, para cada ensayo, se muestra en la Figura 4.22. Donde se puede observar la diferencia existente entre los porcentajes de fragmentos de suelo > 40 mm y los restantes de diferentes tamaños, que en lo sucesivo serán mencionados como ≤ 40 mm.

Al extraer el suelo fracturado en las áreas seleccionadas, para evaluar el perfil y la granulometría, se pudo comprobar su comportamiento semejante a un fluido, donde las partículas de mayor tamaño, se ubican más próximas al nivel superior y en la medida que se

alejaban de la superficie se reducía el tamaño de los fragmentos de suelo, típico de una clasificación natural.

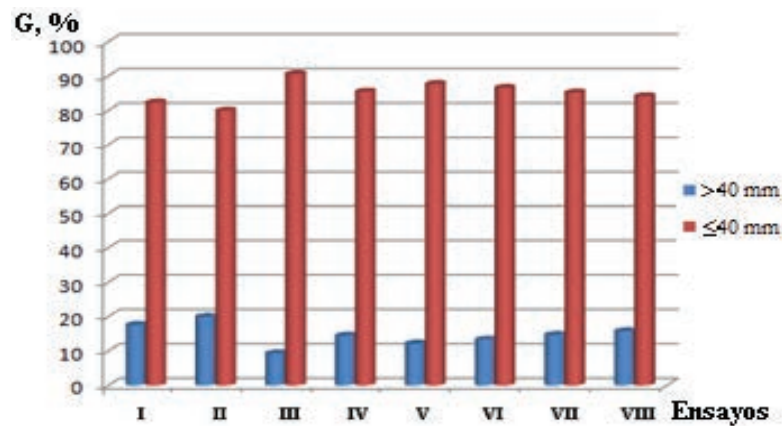


Figura 4.22 Relación entre los fragmentos de suelo >40mm y los restantes agrupados.

Evaluación de los fragmentos de suelo obtenidos >40mm ($F_{>40 \text{ Var I}}$).

Al realizar un análisis de regresión múltiple, considerando las tres variables independientes que caracterizan el presente diseño de experimento evaluado, y tomando como variable dependiente los fragmentos del suelo >40 mm, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 4.16:

Tabla 4.16 Resultado del análisis de regresión a los fragmentos de suelo >40 mm.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Fragmentos >40, %	17,622	2,322	7,589	0,0000
Velocidad, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	-3,701	1,024	-3,615	0,0007
Humedad, %	-0,046	0,071	-0,660	0,5123
Compactación, Pa	0,002	0,0004	4,764	0,0000

Puesto que el valor-P es menor que 0,05 existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$F_{>40 \text{ Var I}} = 17,62 - 3,70V - 0,05H + 0,002C, \% \quad (4.9)$$

De la ecuación de regresión obtenida se puede comprobar que la mayor dependencia en la generación de fragmentos del suelo >40 mm se relaciona con la velocidad a la que se produce la roturación.

Al realizar el análisis del comportamiento de la generación de fragmentos de suelo >40 mm ($F_{>40 V \text{ Var I}}$), dependiendo de cada una de las variables independientes por separado, se obtienen las ecuaciones de mejor ajuste. Para la velocidad, con $R^2=0,32$ su comportamiento (Ecuación 4.10) presenta una tendencia lineal con incremento del porcentaje de fragmentos >40 mm, representado de forma gráfica en la Figura 4.23a.

$$F_{>40 V \text{ Var I}} = 16,0V^{0,69}, \% \quad (4.10)$$

En el caso de la humedad ($F_{>40 H \text{ Var I}}$), para un $R^2= 0,59$ su mejor ajuste se realiza mediante una ecuación polinómica de 2^{do} orden (Ecuación 4.11) con tendencia negativa (Figura 4.23b), indicando la disminución del porcentaje de fragmentos >40 mm con el incremento de la humedad.

$$F_{>40 H \text{ Var I}} = -0,15H^2 + 6,01H - 24,68, \% \quad (4.11)$$

Al realizar el análisis del comportamiento de la compactación ($F_{>40 C \text{ Var I}}$) y su incidencia sobre la aparición de fragmentos del suelo >40 mm, el $R^2=0,002$ indica muy baja incidencia en la aparición de estos con esas dimensiones, siendo su comportamiento más lineal, representado por la Ecuación 4.12 y la Figura 4.23c.

$$F_{>40 C \text{ Var I}} = -0,32C + 30,51, \% \quad (4.12)$$

Como resultado de este análisis se puede destacar que la menor incidencia en la aparición de fragmentos >40 mm está en la compactación, a pesar de tener mayor dispersión de los valores obtenidos entre 2 500 y 3 500 kPa.

Para el caso de la velocidad, tiene una mayor homogeneidad la aparición de fragmentos >40 mm concentrados en un rango entre 30...40 mm, existiendo valores dentro de ese mismo rango (35 %) para el caso en que fue evaluado, coincidiendo los valores de menor humedad, velocidad y compactación.

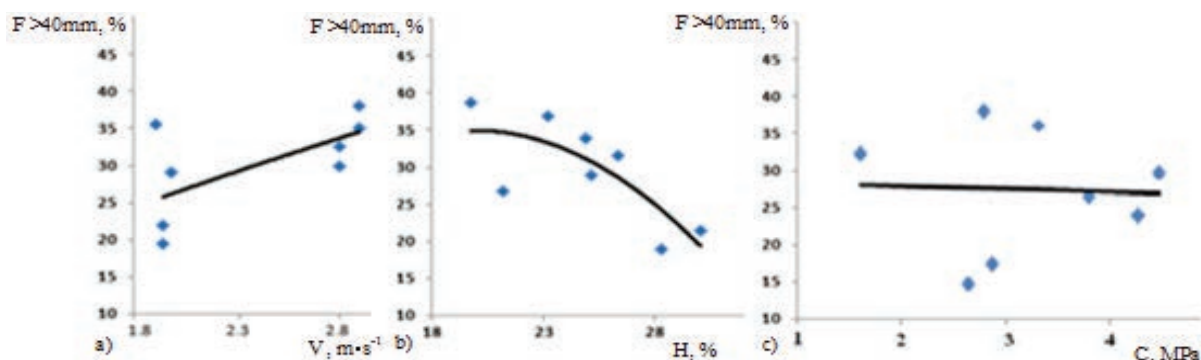


Figura 4.23 Resultado de la formación de fragmentos de suelo al aplicar un tratamiento estadístico de Regresión Múltiple a la granulometría del suelo >40mm.

a) Velocidad vs fragmentos >40mm; b) Humedad vs fragmentos >40mm; c) Compactación vs fragmentos >40mm.

Evaluación de los fragmentos de suelo ≤ 40 mm agrupados previamente.

Al realizar el análisis de regresión múltiple, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 4.17, siendo la ecuación del modelo ajustado para los fragmentos ≤ 40 mm:

$$F_{\leq 40 \text{ Var I}} = 82,38 + 3,70 V + 0,06 H - 0,002 C, \% \quad (4.13)$$

Puesto que el valor-P para la variable dependiente es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

De la ecuación de regresión obtenida se puede comprobar que la mayor dependencia en la generación de fragmentos de suelo ≤ 40 mm también se relaciona con la velocidad a la que se produce la roturación.

Tabla 4.17 Variable dependiente: granulometría ≤ 40 mm.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	Valor-P
Fragmentos ≤ 40 mm	82,38	2,32	35,48	0,0000
Velocidad	3,70	1,02	3,62	0,0007
Humedad	0,05	0,07	0,66	0,5123
Compactación	-0,002	0,0004	-4,76	0,0000

$R^2 = 36,33 \%$; R^2 (ajustado para tres grados de libertad) = 32,65 %.

Las ecuaciones de mejor ajuste obtenidas, dependiendo de cada una de las variables independientes por separado, según el comportamiento en la generación de fragmentos de suelo ≤ 40 mm, son las siguientes: Para la velocidad, con $R^2=0,05$ su comportamiento (Ecuación 4.14) presenta una tendencia lineal con un mínimo incremento del porcentaje de

fragmentos ≤ 40 mm, representado de forma gráfica en la Figura 4.24a, donde se puede observar que los valores de los datos experimentales están en un entorno limitado.

$$F_{\leq 40 \text{ Var I}} = 1,81V + 82,15, \% \quad (4.14)$$

En el caso de la humedad, para un $R^2 = 0,36$ su mejor ajuste se realiza mediante una ecuación polinómica de 5^{to} orden (Ecuación 4.15) con tendencia variable en las dimensiones de los fragmentos (Figura 4.24b), indicando la estabilidad del porcentaje de fragmentos ≤ 40 mm para el rango de humedad en el cual podrían trabajar de forma satisfactoria los órganos de corte del suelo evaluados.

$$F_{\leq 40 \text{ Var I}} = 0,001H^5 - 0,12H^4 + 5,65H^3 - 134,18H^2 + 1568,8H - 7137,9, \% \quad (4.15)$$

Al realizar el análisis del comportamiento de la compactación, y su incidencia sobre la aparición de fragmentos del suelo ≤ 40 mm, mediante la ecuación polinómica (4.16), con una bondad de ajuste $R^2 = 0,23$, justifica la alta incidencia en la aparición de fragmentos de esas dimensiones, representado por la ecuación y la Figura 4.24c.

$$F_{\leq 40 \text{ Var I}} = 8 * 10^{-7}C^2 - 5,0 * 10^{-3}C + 91,78, \% \quad (4.16)$$

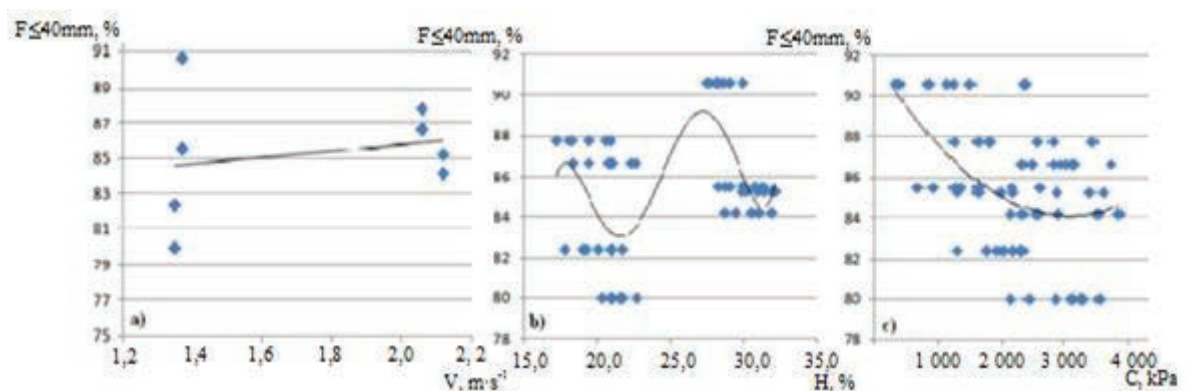


Figura 4.24 Resultado del comportamiento en la formación de fragmentos de suelo ≤ 40 mm al aplicar un tratamiento estadístico de Regresión Múltiple.

a) Velocidad vs porcentaje de fragmentos; b) Humedad vs porcentaje de fragmentos; c) Compactación vs porcentaje de fragmentos.

Como resultado se puede destacar que la mayor incidencia en la aparición de fragmentos ≤ 40 mm está en la compactación, con la mayor dispersión entre 2 500...3 500 kPa, pero todos

dentro del rango aceptado por las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar.

Variante II.

Al tener los órganos de corte el mismo ancho de labor, se reduce el área laborada, como fue analizado al evaluar el perfil. El resultado de la clasificación del suelo en cada ensayo, al ser pasado por los tamices, pesadas las muestras y procesados de forma estadística, arroja el resultado mostrado en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Comportamiento de la fragmentación del suelo.

Rangos de fragmentos evaluados, mm	Valor medio de la mulción por experimento, %				
	IX	X	XI	XII	Media
R1(>40)	19,8	16,0	15,8	12,4	16,0
R2(20,,,40)	16,4	15,8	15,0	14,5	15,4
R3(10,,,20)	20,3	13,5	14,7	13,5	15,5
R4(<10)	43,5	54,7	54,6	59,7	53,1
Desviación típica	2,66	0,74	2,87	6,04	18,7
Varianza	7,11	0,55	8,21	36,43	351,5
Coefficiente de variación, %	49,79	79,23	78,89	92,49	74,9
Significación	p<0,05				

Existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes experimentos (Figura 4.25), con un nivel de confianza del 95 %, lo que corrobora la variabilidad de la granulometría en función de las variables independientes analizadas, marcando una elevada diferencia entre la cantidad de fragmentos menores de 10 mm respecto a los restantes.

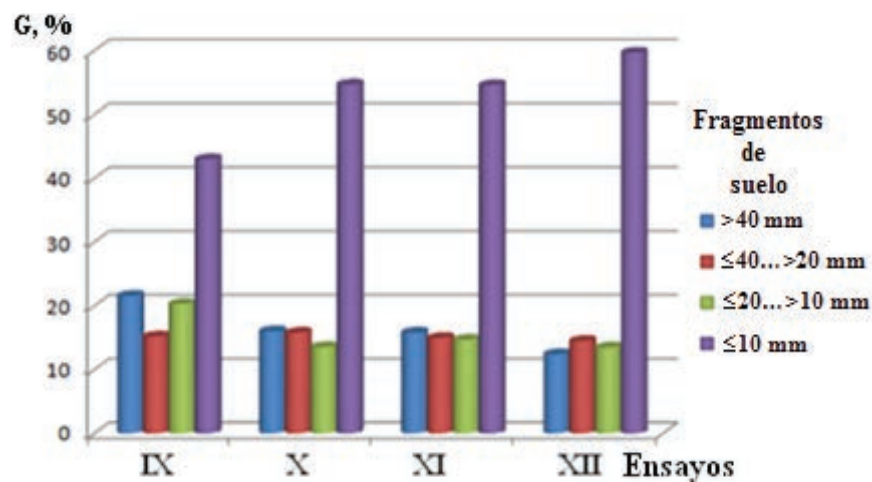


Figura 4.25 Distribución por tamaño de fragmentos de suelo logrados en los ensayos.

El procesamiento se realizó siguiendo el mismo procedimiento empleado para la Variante I. Fueron evaluados estadísticamente de forma independiente cada una de las muestras y reunidas posteriormente, las que clasifican dentro de los parámetros exigidos por las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar (Tabla 4.19).

Tabla 4.19 Clasificación y evaluación estadística de los fragmentos de suelo.

Estadígrafos, %	>40 mm	≤40...>20 mm	≤20...>10 mm	≤10 mm	≤40 mm
Media	16,00	15,42	15,49	53,10	84,01
Varianza	154,91	392,45	388,91	534,66	350,94
Desviación estándar	12,45	19,81	19,72	23,12	18,73
Coefficiente de variación	49,79	79,23	78,89	92,49	74,93
Mínimo	16,42	13,53	14,67	12,39	15,42
Máximo	43,49	54,67	54,57	59,66	53,1
Rango	27,07	41,14	39,9	47,27	37,68
Sesgo	1,88	1,98	2,00	1,99	2,00
Sesgo estandarizado	1,54	1,62	1,63	1,63	1,63
Curtosis	3,66	3,94	3,99	3,97	3,99
Curtosis estandarizada	1,49	1,61	1,63	1,62	1,63
Intervalo de confianza, %	95	95	95	95	95
Valor-P	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las variantes, en cuanto al grado de desterronamiento, con una confianza del 95 %, solo mostrándose entre los rangos R1, R2 y R3 respecto a R4, donde los fragmentos de suelo con diámetro inferior a 10 mm constituyen el 53,10 %. Como resultado del análisis de los datos obtenidos se destaca la existencia de 16,0 % de fragmentos que no pasaron por el tamiz de diámetro 40 mm, que al igual que en la Variante I, la geometría que caracterizaba a estos fragmentos, en una de sus dimensiones, no sobrepasaba ese diámetro, y durante los ensayos se pudo observar que su aparición era provocada por el primer órgano de corte, al actuar directamente sobre la capa superficial; también resulta significativo el elevado porcentaje de fragmentos <10 mm, más de la mitad del obtenido con los otros fragmentos.

Como los fragmentos del suelo, comprendidos entre ≤40 mm y >10 mm cumplen con las exigencias agrotécnicas para plantación de la caña de azúcar y sus dimensiones resultan apropiadas para el tape del esqueje, se procedió como en los casos anteriores a agruparlos,

reuniendo los $\leq 40 \dots > 20$, $\leq 20 \dots > 10$ y ≤ 10 para el análisis estadístico, quedando en una proporción de 84 y 16 % respectivamente (Figura 4.26).

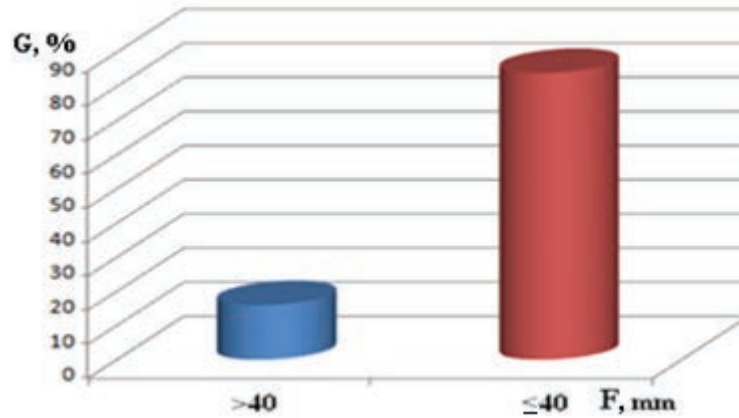


Figura 4.26. Relación entre fragmentos >40 mm y ≤40 mm.

Evaluación de los fragmentos de suelo >40mm.

Al realizar el análisis de regresión múltiple, considerando las tres variables independientes que caracterizan a esta variante, y tomando como variable dependiente los fragmentos de suelo >40 mm, se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Resultado del análisis de regresión.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Fragmentos >40mm	23,41	16,26	1,44	0,163
Velocidad, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2,63	4,78	0,55	0,587
Humedad, %	-0,36	0,33	-1,10	0,282
Compactación, kPa	-0,001	$4,42 \times 10^{-4}$	-2,80	0,010

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %. El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 36,33 % de la variabilidad en granulometría >40 mm. El estadístico R^2 ajustado, es 32,65 %.

De la ecuación de regresión obtenida (4.17) se puede comprobar que la mayor dependencia en la generación de fragmentos de suelo >40 mm se relaciona con la velocidad a la que se produce la roturación, resultando poco significativa la compactación.

$$F_{>40 \text{ var II}} = 23,41 + 2,63V - 0,36H - 1,2 \times 10^{-4} C, \% \quad (4.17)$$

Al realizar el análisis del comportamiento de la generación de fragmentos de suelo >40 mm, dependiendo de cada una de las variables independientes por separado, se obtienen las ecuaciones de mejor ajuste siguientes:

Para la velocidad ($F_{>40V}$ varII), con $R^2 = 0,53$ su comportamiento (Ecuación 4.18) presenta una tendencia lineal con incremento porcentual de fragmentos >40 mm, representado de forma gráfica en la Figura 4.27a.

$$F_{>40V \text{ varII}} = 4,76V + 7,5, \% \quad (4.18)$$

En el caso de la humedad, para un $R^2 = 0,61$ su mejor ajuste se realiza mediante una ecuación polinómica de orden dos (Ecuación 4.19) con tendencia negativa (Figura 4.27b), indicando la disminución del porcentaje de fragmentos >40 mm con el incremento de la humedad.

$$F_{>40H \text{ varII}} = 4,69 * 10^{-2}H^2 - 2,74H + 53,85, \% \quad (4.19)$$

Al realizar el análisis del comportamiento de la compactación y su incidencia sobre la aparición de fragmentos del suelo >40 mm, el $R^2 = 0,18$ indica muy baja incidencia en la aparición de fragmentos de esas dimensiones, siendo su comportamiento más lineal, representado por la ecuación 4.20 y la Figura 4.27c.

$$F_{>40C \text{ varII}} = 2,0 * 10^{-13}C^4 - 3,0 * 10^{-9}C^3 + 1,0 * 10^{-5}C^2 - 1,37 * 10^{-2}C + 19,83, \% \quad (4.20)$$

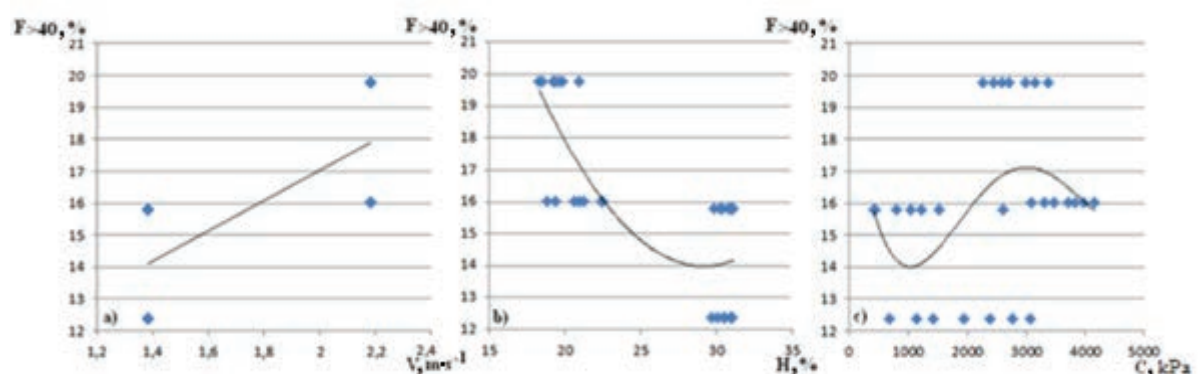


Figura 4.27. Resultado del comportamiento de la formación de fragmentos de suelo >40mm al aplicar un tratamiento estadístico de regresión múltiple a la granulometría. a) Velocidad vs perfil; b) Humedad vs perfil; c) Compactación vs perfil.

Como resultado de este análisis se puede destacar que la menor incidencia en la aparición de fragmentos >40 mm está en la compactación, a pesar de tener mayor dispersión de los valores obtenidos entre 900...4 200 kPa. Para el caso de la velocidad, tiene una mayor homogeneidad la aparición de fragmentos >40 mm concentrados en un rango entre 30...40 mm, existiendo valores dentro de ese mismo rango (35 %) para el caso en que se evaluó coincidiendo los valores de menor humedad, velocidad y compactación.

Evaluación de los fragmentos de suelo ≤ 40 mm ($F_{\leq 40 \text{ Var II}}$).

Al tomar como variable dependiente los fragmentos del suelo ≤ 40 mm, y las tres variables independientes, al realizar el análisis estadístico (Tabla 4.21), con los datos obtenidos, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.21 Resultado del análisis de regresión.

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
Fragmentos, ≤ 40	76,86	16,21	4,74	0,0001
Velocidad, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	-2,70	4,76	-0,57	0,5
Humedad, %	0,36	0,33	1,09	0,3
Compactación, kPa	0,001	$4,41 \times 10^{-4}$	2,80	0,01

Puesto que el valor-P obtenido es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %. El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 69,50 % de la variabilidad en la granulometría ≤ 40 mm. El estadístico R^2 ajustado, es 65,69 %.

Al realizar el análisis de Regresión Múltiple se obtiene la ecuación 4.21:

$$F_{\leq 40 \text{ Var II}} = 76,86 - 2,70V + 0,36H + 1,2 \cdot 10^{-3} C, \% \quad (4.21)$$

De la ecuación de regresión obtenida se puede comprobar que la mayor dependencia en la generación de fragmentos del suelo ≤ 40 mm se relaciona con la velocidad a la que se produce la roturación, resultando poco significativa la compactación.

Al realizar el análisis del comportamiento de la generación de fragmentos de suelo ≤ 40 mm, dependiendo de cada una de las variables independientes por separado, se obtienen las

ecuaciones de mejor ajuste que aparecen a continuación. Para la velocidad, con $R^2=0,53$ su comportamiento (Ecuación 4.22) presenta una tendencia lineal con incremento del porcentaje de fragmentos ≤ 40 mm, representado de forma gráfica en la Figura 4.28a.

$$F_{\leq 40V \text{ Var II}} = 4,76V + 92,48, \% \quad (4.22)$$

En el caso de la humedad, para un $R^2=0,61$ su mejor ajuste se realiza mediante una ecuación polinómica de orden dos (Ecuación 4.23) con tendencia negativa (Figura 4.28b), indicando la disminución del porcentaje de agregados ≤ 40 mm con el incremento de la humedad.

$$F_{\leq 40H \text{ Var II}} = 4,6 * 10^{-2}H^2 - 2,74H + 46,15, \% \quad (4.23)$$

Al realizar el análisis del comportamiento de la compactación y su incidencia sobre la aparición de fragmentos de suelo <40 mm, el $R^2= 0,17$ indica muy baja incidencia en la aparición de fragmentos de esas dimensiones, siendo su comportamiento más lineal, representado por la Ecuación 4.24 y la Figura 4.28c.

$$F_{\leq 40C \text{ Var II}} = 6,0 * 10^{-10}C^3 - 4,0 * 10^{-6}C^2 + 6,3 * 10^{-3}C + 82,63, \% \quad (4.24)$$

Como resultado de este análisis se puede destacar que la menor incidencia en la aparición de fragmentos >40 mm está en la compactación, a pesar de tener mayor dispersión de los valores obtenidos entre 850 y 4 200 kPa.

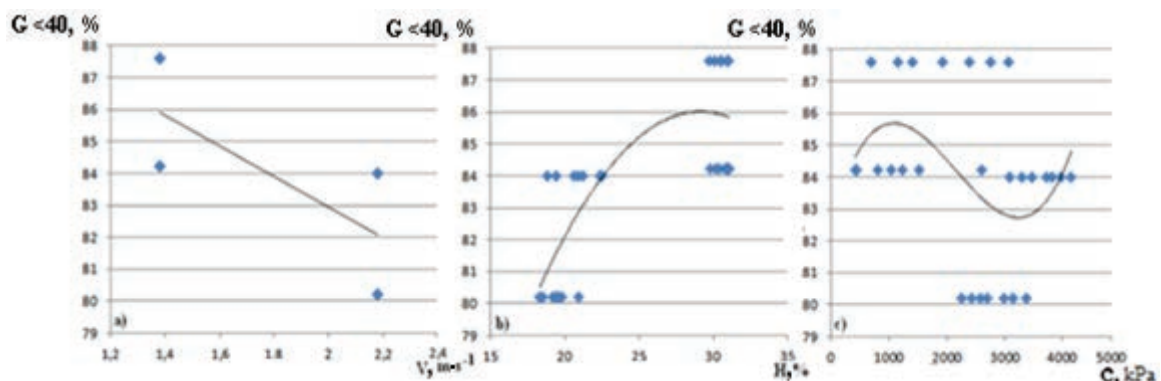


Figura 4.28 Resultado del comportamiento de la formación de fragmentos de suelo ≤ 40 mm al aplicar un tratamiento estadístico de regresión múltiple a la granulometría.
a) Velocidad vs perfil; b) Humedad vs perfil; c) Compactación vs perfil.

Para el caso de la velocidad, tiene una mayor homogeneidad la aparición de fragmentos ≤ 40 mm concentrados en un rango entre 30...40 mm, existiendo valores dentro de ese mismo

rango (35 %) para el caso en que se evaluó, coincidiendo los valores de menor humedad, velocidad y compactación.

El comportamiento de la distribución de los fragmentos de suelo clasificados, demuestra la capacidad de fragmentar el suelo de este modelo. La notable diferencia entre los agrupamientos de fragmentos generados ≤ 40 mm con relación a los >40 mm demuestra la capacidad de fragmentar al suelo dentro de los parámetros asumidos de velocidad de los órganos de trabajo así como de humedad y compactación del suelo.

Con estos resultados en la evaluación de la granulometría en ambas variantes, queda demostrada la capacidad de fragmentación del suelo por el empleo de cuatro brazos de escarificadores colocados de forma consecutiva, independientemente de la geometría que generen y de las condiciones de humedad y compactación que presente el suelo, dentro de los rangos evaluados.

Determinación de la resistencia tractiva durante el corte del suelo en las variantes evaluadas.

La resistencia tractiva (R_T) ejercida por cada brazo durante los ensayos como variaciones de voltaje analógico y registrada en sus respectivos archivos de datos de forma digital en la computadora, tiene un comportamiento como el mostrado en la Figura 4.29.

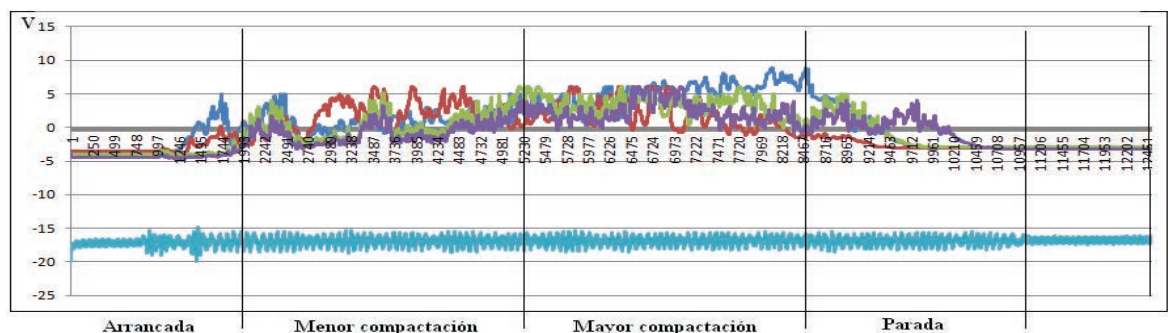


Figura 4.29 Representación gráfica del resultado de una corrida experimental.

Los datos obtenidos durante cada corrida experimental son pasados a tablas de Excel, donde son separados en cada uno de los ensayos correspondiente a menor y mayor compactación, descartando los tramos correspondientes a arrancada y parada para no afectar los valores que

representan los resultados de ambas compactaciones. Posteriormente son transformados a sus respectivos valores de resistencia tractiva para su procesamiento y análisis.

En la Tabla 4.22 aparecen por columnas, los valores medios de la resistencia tractiva demandada por cada brazo durante los ensayos y el valor total producto de la suma de la resistencia de los cuatro brazos en su conjunto.

Tabla 4.22 Valor medio de la resistencia tractiva demandada por cada brazo y total del modelo, así como la potencia por cada ensayo.

Variante	Ensayos	Resistencia tractiva, N					Potencia, kW	
		Brazo 1	Brazo 2	Brazo 3	Brazo 4	Total	Escala	Real
I	I	316,8	389,9	304,5	294,5	1305,7	1,76	3,53
	II	639,1	469,2	612,0	470,5	2190,8	2,96	5,92
	III	385,5	484,8	314,6	344,7	1529,5	2,10	4,19
	IV	494,5	493,1	334,0	383,6	1705,1	2,34	4,67
	V	696,8	446,6	231,5	636,1	1995,3	3,72	7,44
	VI	730,2	547,5	277,5	682,0	2237,2	4,61	9,22
	VII	671,9	743,6	701,7	656,2	2773,4	5,88	11,76
	VIII	714,0	779,3	711,5	798,9	3003,6	6,37	12,74
II	IX	605,5	567,6	515,0	500,9	2189,2	4,77	9,55
	X	620,4	543,8	561,0	584,9	2310,4	5,04	10,07
	XI	480,7	433,7	392,2	346,5	1653,0	2,28	4,56
	XII	595,8	428,4	457,3	437,6	1919,4	2,65	5,30

En la propia Tabla 4.21 se muestra la potencia demandada por cada uno de los brazos en los diferentes ensayos realizados, relacionando la resistencia tractiva en función de la velocidad real a que se desarrollaron los mismos y su equivalente al transformarla a su magnitud real.

Variante I.

El comportamiento de la potencia por ensayo muestra una notable diferencia entre los realizados a menor velocidad (I al IV) respecto a los de mayor velocidad (V al VIII), para las condiciones experimentales impuestas y su efecto por la variabilidad en el ancho de trabajo de las saetas.

En la Figura 4.30 se observa el comportamiento del valor medio de la resistencia traccional en los ensayos, representando en azul los correspondientes a menor compactación respecto al

rojo, que representa a los de mayor compactación, siendo los cuatro primeros los que se desarrollaron a las velocidades inferiores, donde se puede apreciar la diferencia de comportamiento traccional respecto a los cuatro últimos. A su vez, los valores de las columnas azules y rojas muestran la diferencia entre la compactación en cada corrida experimental con similar humedad; esto demuestra la variación del consumo energético como consecuencia del incremento de la compactación del suelo en cada ensayo.

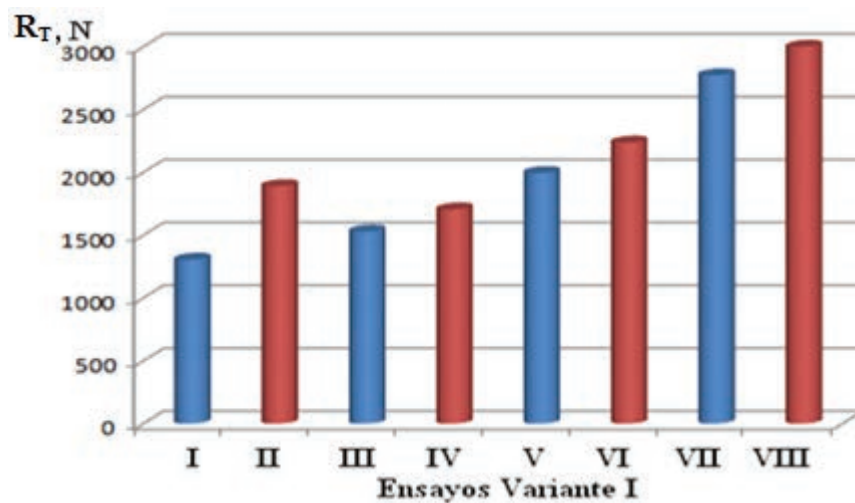


Figura 4.30 Comportamiento de la resistencia tractiva en los ensayos.

El orden ascendente en el valor de resistencia tractiva alcanzado en cada ensayo, es motivado por la relación inversa que se establece entre la humedad y la compactación, con una marcada incidencia de la velocidad a la que se realizan los ensayos. De lo antes expuesto se puede indicar, que la mayor dependencia en la variación del consumo energético, está dada por el incremento de la velocidad para similar compactación.

Al realizar el procesamiento estadístico de los resultados experimentales (Tabla 4.23) se obtienen los valores siguientes:

Tabla 4.23 Resultado del análisis de la resistencia tractiva media.

Parámetro	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Resistencia tractiva, N	251,6	-4,5	0,000
Velocidad, m·s ⁻¹	110,9	7,2	0,000
Humedad, %	7,54	6,8	0,000
Compactación, kPa	0,05	5,1	0,000

Dado que el p-valor es inferior a 0,01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99 %. El estadístico R^2 indica que el modelo explica un 77,63 % de la variabilidad de la resistencia tractiva y el estadístico R^2 ajustado para tres grados de libertad, lo realiza para 76,34 %.

Relacionando la resistencia tractiva como variable dependiente, respecto a las tres variables independientes, se obtuvo la ecuación de regresión, con los siguientes valores de estimación:

$$R_{T(Var I)} = -1\,133,31 + 800,1V + 51,08H + 0,24C, N \quad (4.21)$$

Al realizar el análisis de regresión de cada una de las variables independientes, para comprobar su incidencia en el comportamiento de la variable R_T , se obtienen las ecuaciones 4.22; 4.23 y 4.24 para la velocidad (R_{TV}), humedad (R_{TH}) y compactación (R_{TC}), respectivamente. La resistencia tractiva como función dependiente de la velocidad se presenta como:

$$R_{TV} = 1\,159,4V + 92,59, N \quad (4.22)$$

Con un nivel de confianza igual a 59 %, y su representación gráfica (Figura 4.31a) muestra un comportamiento lineal ascendente, típico de la resistencia que ofrece el suelo; la incidencia de la humedad se manifiesta según la expresión:

$$R_{TH} = 10,78H^2 - 495,54H + 7\,466,9, N \quad (4.23)$$

Caracterizado por un R^2 igual a 0,31 y un comportamiento que responde a un polinomio de 2^{do} orden como mejor ajuste, representado en la Figura 4.31b, característico del incremento en la humedad del suelo en interacción con los órganos de corte, propiciando un estado más plástico de este, incrementando el coeficiente de fricción y la adherencia del suelo a la superficie de estos. La compactación está representada por un polinomio de 5^{to} orden, (ecuación 4.24), con una alta variabilidad y tendencia ascendente y un nivel de confianza del 27 %, (Figura 4.31c).

$$R_{Tc} = 5 * 10^{-14}C^5 - 6 * 10^{-10}C^4 + 2 * 10^{-6}C^3 - 3,5 * 10^{-3}C^2 + 2,71C + 897,14, N \quad (4.24)$$

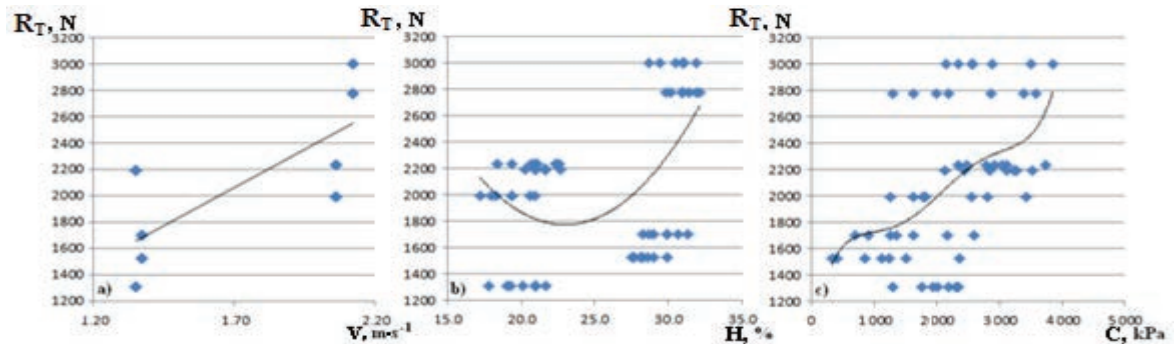


Figura 4.31 Relación que se establece entre la resistencia tractiva como variable dependiente y las tres variables independientes.
a) Resistencia tractiva vs velocidad; b) Resistencia tractiva vs humedad; c) Resistencia tractiva vs compactación.

La tendencia de la velocidad y la compactación es al incremento de los valores de resistencia tractiva, mientras que la humedad describe una trayectoria parabólica, demandando el menor valor de resistencia tractiva al aproximarse al 24 % de ella, precisamente donde se encuentra el estado de sazón o tempero del suelo Ferralítico rojo, empleado en esta experimentación.

Variante II.

La Figura 4.32 muestra el comportamiento del valor medio de la resistencia traccional en los ensayos, representando en rojo los correspondientes a menor compactación con respecto al azul que aparece a continuación, siendo los dos primeros, resultado de la primera corrida experimental de esta variante.

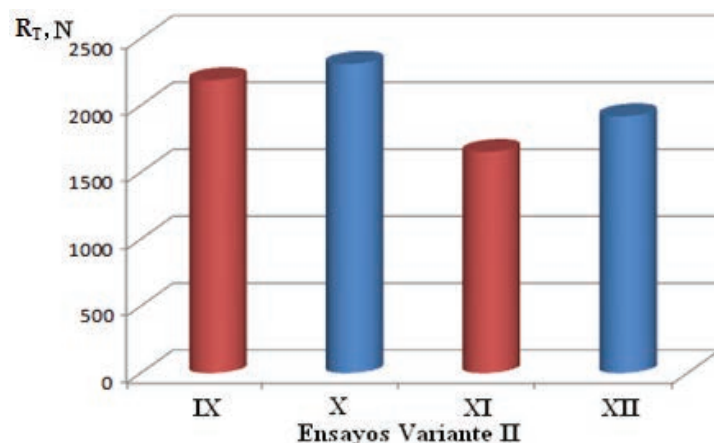


Figura 4.32. Comportamiento de la resistencia traccional.

Estos ensayos se desarrollaron a la velocidad mayor seleccionada, donde se puede apreciar el incremento de la resistencia traccional respecto a los dos últimos realizados en las dos condiciones de compactación previstas y dentro de los rangos de humedad establecidos, en que fueron evaluados los ensayos de la Variante I.

La poca diferencia en la resistencia traccional entre los ensayos IX y X, al igual que entre los ensayos XI y XII, es motivada por tener todas las saetas laterales el mismo ancho de labor, esto ocasiona que el corte se produzca en un marco muy estrecho y la fractura del suelo no se realice por un ángulo natural de ruptura del suelo, según el criterio de Mohr-Coulomb, sino buscando la proyección vertical siguiendo el sentido de menor resistencia al corte. Por tal motivo, el paso de los órganos de corte provoca paredes empinadas, y sólo próximo a la superficie, por el empuje del suelo desplazado desde el fondo, ocasiona el desplazamiento lateral y su fractura, haciéndose presente el criterio antes señalado. No obstante entre los dos primeros (IX y X) y los dos últimos (XI y XII) si existe una diferencia energética significativa, al variar las condiciones de velocidad, humedad y compactación.

Al realizar el análisis de regresión a los datos obtenidos de resistencia tractiva, relacionándolo con las tres variables independientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_{T_{Var II}} = 1\,056,93 + 432,21V + 0,63H + 0,07C, N \quad (4.25)$$

Esta ecuación representa un 87,9 % de la variabilidad en la resistencia tractiva, dándole el mayor peso a la velocidad, quedando para un segundo plano de significación la humedad, justificado plenamente por la acción inversa que la relaciona con la compactación. El resto de los estadígrafos que caracterizan este proceso aparecen en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Resultado del análisis de la resistencia tractiva media en los ensayos.

Parámetro	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Resistencia tractiva, N	991,1	1,10	0,29
Velocidad, m·s ⁻¹	291,1	1,50	0,15
Humedad, %	20,0	0,03	0,98
Compactación, kPa	0,03	2,70	0,01

Al analizar por separado la representatividad de cada una de las variables independientes, obtenemos las ecuaciones de regresión que se muestran a continuación:

$$R_{TV\text{varII}} = 579,38V + 986,46, N \quad (4.26)$$

Para un $R^2 = 0,8 \%$, con el mejor ajuste a una tendencia lineal;

$$R_{TH\text{varII}} = 10\,594^{-0,5}H, N \quad (4.27)$$

Para $R^2 = 0,7 \%$, con un comportamiento caracterizado por una potencia elevada a un valor negativo, representativo de la disminución de la resistencia tractiva con el incremento de la humedad.

El comportamiento de la resistencia tractiva con respecto a la compactación responde a la Ecuación 4.28 como se señala a continuación:

$$R_{TC\text{varII}} = -2,0 * 10^{-8}C^3 + 1,0 * 10^{-4}C^2 - 5,8 * 10^{-2}C + 1702, N \quad (4.28)$$

Para $R^2 = 0,7 \%$, con su mejor ajuste representado por un polinomio de tercer orden.

La gráfica de estas tres ecuaciones (Figura 4.33), caracterizan el comportamiento de la resistencia tractiva y su tendencia al incremento cuando aumentan la velocidad y la compactación, mientras que la acción de la humedad tiende a disminuir la resistencia tractiva, con un comportamiento diferente a la Variante I.

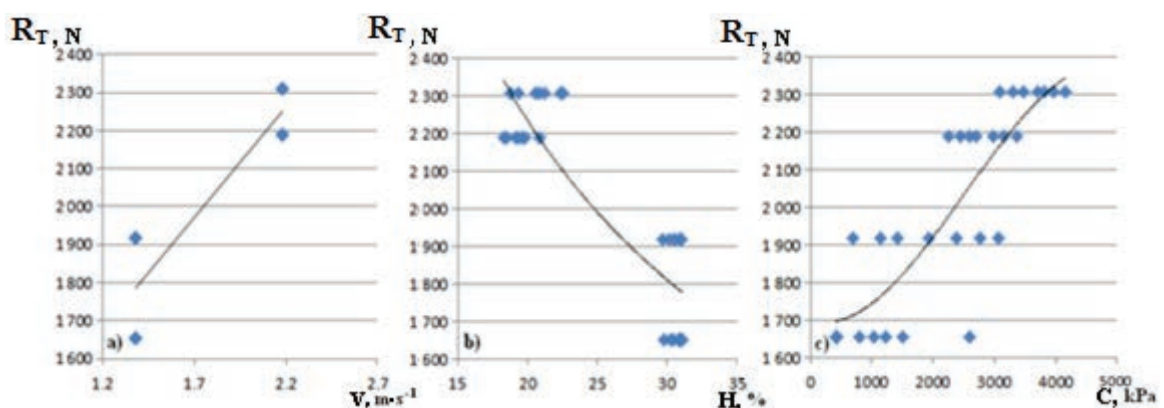


Figura 4.33 Relación que se establece entre la resistencia tractiva como variable dependiente y las tres variables independientes.

a) Resistencia tractiva vs velocidad; b) Resistencia tractiva vs humedad; c) Resistencia tractiva vs compactación.

Este comportamiento es atribuible a existir menor superficie de contacto entre el suelo y la superficie de los órganos de corte y por producirse la fractura del mismo buscando un ángulo de corte próximo a los noventa grados respecto a la superficie, como fue demostrado cuando se analizó la generación del perfil en esta variante.

Comparación de la resistencia tractiva entre las Variantes I y II.

La comprobación de los resultados de resistencia tractiva entre las variantes estudiadas, se puede realizar comparando las potencias demandadas para cada ensayo; su expresión numérica fue expuesta en la Tabla 4.21, donde en sendas columnas, se muestran los valores obtenidos en los ensayos y los calculados en verdadera magnitud; para su mejor comprensión y comparación se pueden analizar de forma gráfica en la Figura 4.34.

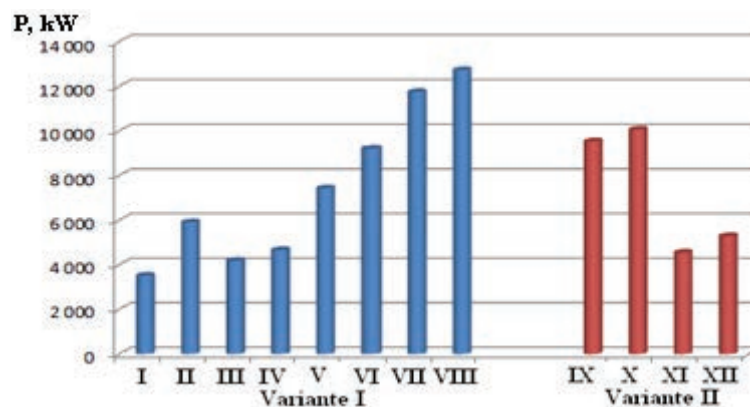


Figura 4.34 Demanda de potencia por las dos variantes.

El comportamiento de la resistencia tractiva observado en ambas variantes se corresponde con los niveles de humedad y compactación que fueron impuestos para los ensayos. En la Variante I, producto de tener un mayor ancho de trabajo las saetas, en los tres niveles más próximos a la superficie, deben enfrentar un volumen mayor de suelo a cortar, como lo demuestra el análisis realizado en la evaluación del perfil, mientras que en la Variante II, bajo los mismos escalones de corte, por mantener el mismo ancho de trabajo, la resistencia que ofrece el suelo al corte es menor.

El mayor consumo energético demandado por la Variante I está justificado por el principio de

trabajo de estos órganos, que al igual que para el caso del perfil y la granulometría, se fundamentan sobre la base teórica de la brocha agrícola: el corte progresivo del suelo en pequeñas capas, buscando que los órganos de corte se enfrenten a escalones de pequeñas dimensiones, para minimizar el esfuerzo a realizar, contrarrestar el efecto aglutinante presente en un suelo arcilloso compactado y que la combinación de presión y corte sobre el suelo, producido por estos órganos favorezcan su fragmentación.

4.9 Evaluación comparativa entre la Variante III y Variante IV con surcador acoplado.

Después de evaluada la labor de roturación en las Variantes I y II, se requiere evaluar el comportamiento del modelo experimental realizando en un solo pase roturación y surcado. En tal sentido, se incluye en esta investigación la evaluación de las Variantes III y IV, consistente en incorporar a los modelos antes evaluados un surcador a escala, tomando como prototipo el producido en la fábrica de implementos agrícolas “Mártires del 26 de julio”, en la provincia de Holguín, para los aperos C-101 (Figura 4.35), muy difundidos y con buenos resultados en la labor de surcado en la agricultura cañera cubana.



Figura 4.35 C-101 con surcador acoplado.

El objetivo que se persigue con realizar esta evaluación es demostrar que con la geometría del perfil desarrollado en la Variante I se logra, con el surcador acoplado, la reproducción del perfil y la granulometría que demandan las exigencias agrotécnicas de preparación del suelo para la plantación de la caña de azúcar con muy buena calidad, incluyendo la disminución del consumo energético como resultado final de la labor, aspectos que no fueron posible lograr

con el C-101XV en condiciones reales. Este resultado se deriva a su vez en dos posibilidades: la factibilidad de poder realizar esta labor en un solo pase, cuando las condiciones del estado del campo a plantar lo permitan, buscando reducir el número de acciones previas al surcado, empleando para ello la fuente energética más apropiada y crear una nueva tecnología de laboreo mínimo con una visión más acorde a los preceptos de la Agricultura de Conservación. El surcador para su construcción a escala fue reproducido en verdadera magnitud aplicando ingeniería inversa (Figura 4.36a) y llevado a un modelo a escala 1:2 mediante la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento (Figura 4.36b).

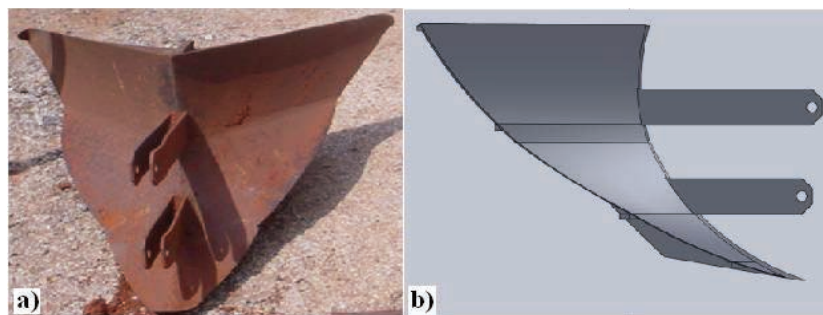


Figura 4.36. a) Surcador de producción nacional; b) Diseño obtenido mediante ingeniería inversa.

Este surcador fue acoplado al cuarto brazo del modelo experimental, para trabajar en la generación del perfil, a la profundidad de 15 cm respecto al nivel superior del suelo en el canal, para las dos variantes evaluadas con anterioridad (Figura 4.37).

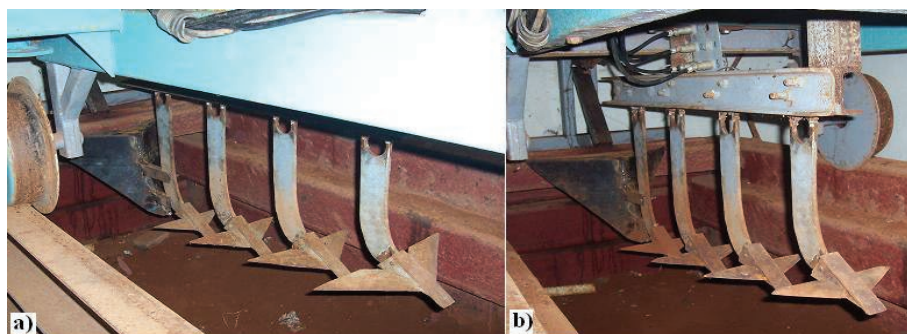


Figura 4.37 Montaje del surcador en el cuarto brazo del modelo experimental. a) Variante III; b) Variante IV.

Para la evaluación se ejecutaron dos ensayos para cada una de las variantes experimentales, imponiendo dos condiciones de compactación y dos humedades del suelo y la velocidad

asumida como alta durante los primeros ensayos.

La ejecución de los ensayos, se realizaron dividiendo la longitud del canal de suelos en dos tramos, de forma similar a como se realizaron los ensayos en las Variantes I y II. Los valores propuestos para las variables independientes a imponer aparecen en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Valores a reproducir para las variables independientes.

Condiciones experimentales propuestas				
Variante	III		IV	
Velocidad, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2,22 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)		2,22 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	
Humedad, %	20	28	20	28
Compactación, kPa	1500	2500	1500	2500

Los valores obtenidos en la preparación del canal para la realización de los ensayos aparecen en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26 Valores promedio obtenidos para las variables independientes.

Condiciones experimentales logradas				
Variante	III		IV	
Ensayo	XIII	XIV	XV	XVI
Velocidad, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2,16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (7,78 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)		2,10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (7,56 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	
Humedad, %	18,7	29,2	19,4	29,8
Compactación, kPa	2250	3148	1938	2975

Perfiles obtenidos por variantes.

Variante III.

Al realizar los ensayos (Variante I + surcador acoplado), se reprodujo un perfil uniforme a todo lo largo del canal de suelo (Figura 4.38a), independientemente de la diferenciación de compactación y humedad a la que fue preparado, definiendo los ensayos XIII y XIV.

Al procesar los resultados de la medición del perfil en los seis puntos evaluados se obtuvo una variabilidad poco significativa, diferencia caracterizada por la irregularidad de la superficie del suelo donde se apoyaban las varillas del perfilómetro (Figura 4.38b). El procesamiento estadístico de los datos obtenidos de la medición del perfil demostró la reproducción uniforme de dichos valores, mostrados en la Figura 4.38c, donde se solapan las seis mediciones realizadas, correspondiendo tres a cada uno de los ensayos descritos

anteriormente. El resumen estadístico del comportamiento del perfil en las seis posiciones evaluadas aparece en la Tabla 4.27, donde se muestran intervalos de confianza del 95 % para las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables. Estos intervalos acotan el error de muestreo en los estimados de los parámetros de las poblaciones de las cuales provienen los datos.



Figura 4.38 Perfil laborado.

a) Uniformidad del perfil; b) Evaluación del perfil; c) Resultados de la medición.

El valor indicado por el sesgo y la curtosis resultan de particular interés, los cuales determinan que la muestra proviene de una distribución normal, dentro del rango de ± 2 , indicando que no existen desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla 4.27 Resumen Estadístico del comportamiento de las seis posiciones que evalúan el perfil.

Ensayo	XIII			XIV		
Ubicación	1	2	3	4	5	6
Promedio, cm	-5,7	-4,1	-3,7	-3,6	-5,7	-6,0
Varianza, cm^2	6932,4	6800,2	7039,6	7065,7	6907,3	7039,7
Desv. Estándar, cm	83,2	82,4	83,9	84,0	83,1	83,9
Mínimo, cm	-154,0	-151,0	-150,0	-152,0	-154,0	-153,0
Máximo, cm	97,0	96,0	97,0	98,0	100,0	97,0
Error, cm	12,8	12,7	12,9	12,9	12,8	12,9
Rango, cm	251,0	247,0	247,0	250,0	254,0	250,0
Sesgo, cm	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
Curtosis	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-0,9	-1,0

Los intervalos asumen que las poblaciones de las cuales provienen las muestras pueden ser representadas por distribuciones normales. Mientras que los intervalos de confianza para las medias son bastante robustos y no muy sensibles a violaciones de este supuesto.

La Figura 4.39 representa el diagrama de dispersión resultante del análisis, donde la mayor dispersión se obtiene, en las crestas formadas en la parte superior del surco.

Esta dispersión tiene su origen en la concentración de los fragmentos mayores desplazados por el surcador, mientras que los menores se ubican en los niveles inferiores buscando los espacios libres para su acomodo.

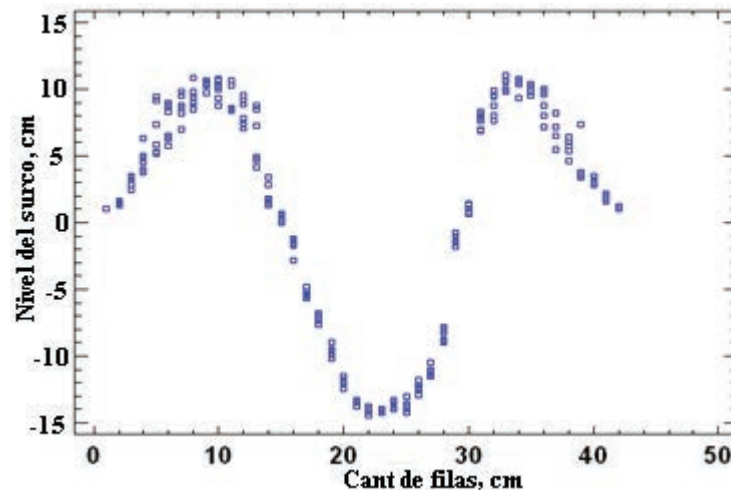


Figura 4.39 Diagrama de dispersión de los perfiles evaluados.

La granulometría lograda, no difiere de la obtenida durante los ensayos de roturación, al coincidir el área fracturada por el paso de las saetas con la proyección frontal del surcador. La combinación del perfil generado por el modelo evaluado en la Variante I con el surcador acoplado, favorecen la formación de un talud natural que garantiza la estabilidad del surco creado. El paso del surcador no aporta una fracturación adicional significativa, por no encontrar oposición al desplazamiento del suelo promovido y fracturado por el paso de las cuñas y saetas que lo precedieron.

Variante IV.

Al realizar los ensayos (Variante II + surcador acoplado), se reprodujo también un perfil del suelo uniforme, a todo lo largo del canal (Figura 4.40a), sin existir diferenciación atribuible a la compactación y humedad a la que fue preparado el suelo antes de comenzar los ensayos.

El perfil obtenido estaba caracterizado por una gran irregularidad en su superficie (Figura

4.40b), con la presencia de gran cantidad de terrones de diversos tamaños (Figura 4.40c), no presentes en los ensayos de roturación de la Variante II.

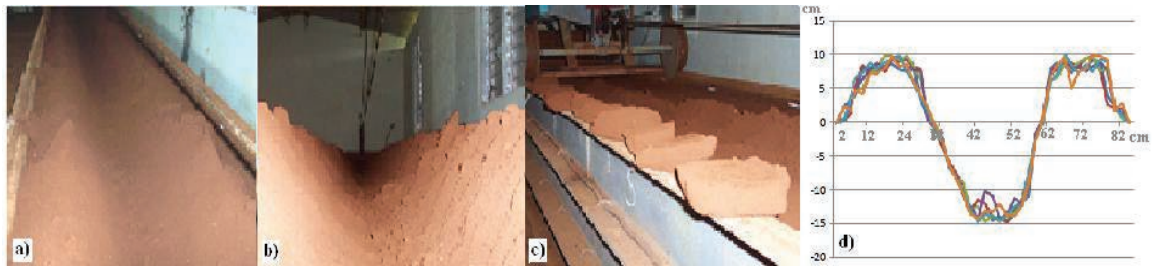


Figura 4.40. Perfil obtenido. a) Homogeneidad a todo lo largo del canal; b) Superficie irregular con fragmentos de suelo de diferentes tamaños; c) Terrones de gran tamaño; d) Variabilidad en el perfil evaluado.

Al procesar los datos obtenidos del perfil en los seis puntos evaluados, dio como resultado una variabilidad más significativa que en la Variante III, caracterizada por la mayor irregularidad de la superficie del suelo, donde se apoyaban las varillas del perfilómetro y la ocurrencia de desprendimientos de fragmentos de suelo hacia el fondo del surco (Figura 4.40d), los cuales no fueron retirados para la evaluación por formar parte del proceso natural.

Evaluación comparativa entre los perfiles generados por las Variantes III y IV.

El resumen estadístico del comportamiento del perfil en las seis posiciones evaluadas aparece en la Tabla 4.28. Las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables se obtuvieron con intervalos de confianza del 95 %. Por estar los valores del sesgo y la curtosis dentro del rango de ± 2 indican que no existen desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla 4.28 Resumen Estadístico del comportamiento de las seis posiciones que evalúan el perfil.

Ensayo	XV			XVI		
Ubicación	1	2	3	4	5	6
Promedio, cm	0,38	3,22	2,6	4,64	2,57	0,51
Varianza, cm ²	7 357,5	7 026,9	7 406,8	6 885,8	7 328,5	7 083,5
Desv. Estándar, cm	85,7	83,8	86,1	83,0	85,6	84,2
Mínimo, cm	-148,0	-148,0	-148,0	-143,0	-148,0	-144,0
Máximo, cm	94,0	98,0	99,0	98,0	100,0	99,0
Error, cm	13,2	12,9	13,3	12,8	13,2	12,9
Rango, cm	242,0	246,0	247,0	241,0	248,0	242,0
Sesgo, %	-0,6	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
Curtosis	-1,1	-1,2	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1

La Figura 4.41 presenta el diagrama de dispersión del análisis de los perfiles. La geometría resultante es muy similar a la obtenida en la Variante III, producto de la acción del surcador contra las paredes del surco que va generando. Gran parte del suelo que entra en contacto con la superficie del surcador no ha sido fracturada previamente, por no coincidir el perfil fracturado con la geometría frontal del surcador y estar este a su vez imposibilitado de salir de su trayectoria, al estar unido al vehículo portaimplementos lastrado.

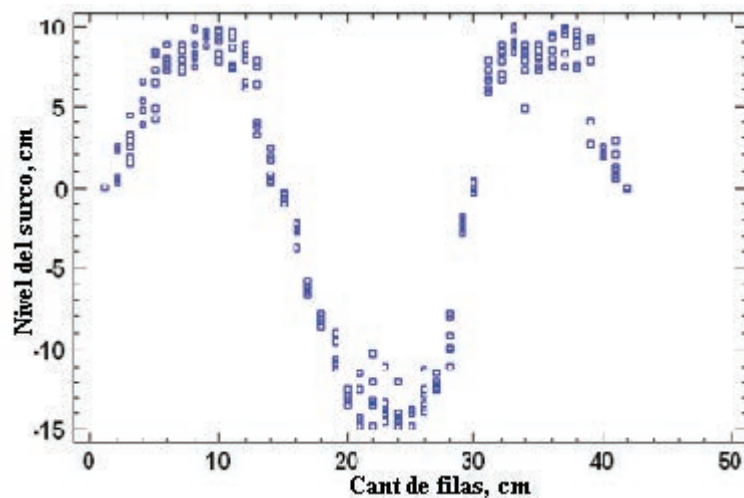


Figura 4.41. Diagrama de dispersión del perfil resultante en la Variante IV.

Por tal razón, este suelo no fracturado es empujado a la superficie en forma de terrones de gran tamaño. De realizarse esta operación en condiciones reales se pueden presentar dos situaciones diferentes, en dependencia de la masa del tractor: ocurrir este mismo efecto de extraer a la superficie terrones de gran tamaño o no llegar a la profundidad requerida, en dependencia de la reacción del suelo acorde a la compactación presente en el mismo no promovido.

Evaluación comparativa entre las granulometrías generadas por las Variantes III y IV.

Al realizar la evaluación de la granulometría, procediendo de forma similar a la realizada con las Variantes I y II, se pudo comprobar por simple inspección que en la Variante III se notaba una disminución de la cantidad de fragmentos de suelo de mayor tamaño; sin embargo, durante los ensayos de la Variante IV la cantidad de terrones de gran tamaño, predominaron a

todo lo largo del canal. Después de realizado el tamizado y pesaje del suelo en las posiciones previamente seleccionadas fueron clasificados los fragmentos por porcentaje, partiendo de considerar cada muestra como el 100 % (Tabla 2.29).

Tabla 4.29 Evaluación de los fragmentos de suelo en las Variantes III y IV.

Fragmentos	Ensayos					
	XIII	XIV	Promedio I	XV	XVI	Promedio II
> 40 mm	8,24	7,63	7,94	25,44	27,63	26,54
≤40...>20 mm	16,53	23,82	20,17	18,86	19,82	19,34
≤20...>10 mm	14,98	11,44	13,21	18,48	17,42	17,95
≤ 10 mm	60,25	57,10	58,68	37,21	35,12	36,17

La representación gráfica de los resultados obtenidos durante el proceso de tamizado y pesado de los fragmentos de suelo clasificados se pueden observar en la Figura 4.42.

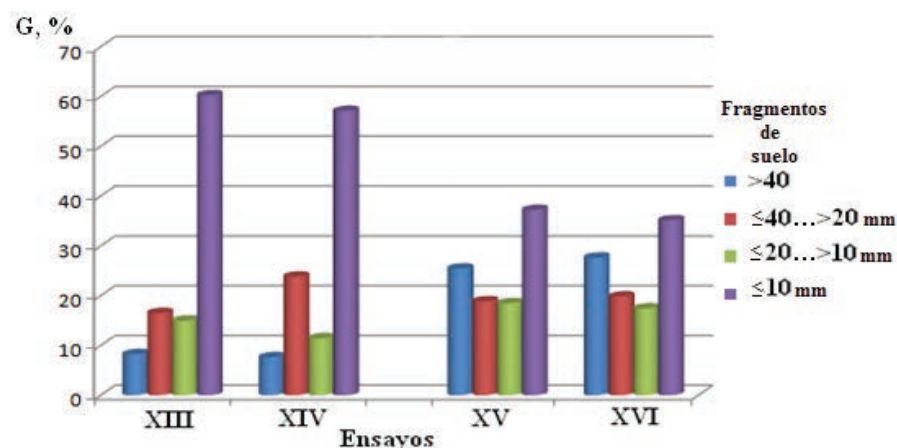


Figura 4.42. Representación de la distribución del promedio de fragmentos de suelo por ensayos de las Variantes III y IV.

Este resultado, hace evidente que la Variante I roturando, proporciona un perfil de suelo acorde al área transversal que abarca el surcador de producción nacional, al generar un surco, acorde a los requerimientos de las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar, acompañado de una granulometría que resulta idónea para el tape de los esquejes y dimensiones de fragmentos que limitan la posibilidad de ser arrastrados por el aire y el agua. Por otra parte, aunque la Variante II al roturar, realiza una mayor fragmentación del suelo, durante el proceso de surcado, el apero se ve obligado a empujar hacia los lados el suelo no promovido previamente, dando lugar a la aparición de terrones de gran tamaño, superiores en

dimensiones al escalón entre saetas.

Resultado de la resistencia tractiva en los ensayos de las Variantes III y IV.

El registro de datos en las Variante III y IV se comportó de forma similar a como aparece en la Figura 4.43, donde la resistencia traccional de los brazos 1, 2 y 3 presentan magnitudes similares a las obtenidas en los ensayos de las variantes I y II, debido a que mantienen uniformidad en la altura de corte del suelo por escalones, mientras que al cuarto brazo además de mantener invariable la altura de corte del suelo se le suma la resistencia tractiva que ofrece el suelo, al estar el surcador acoplado directamente a este brazo.

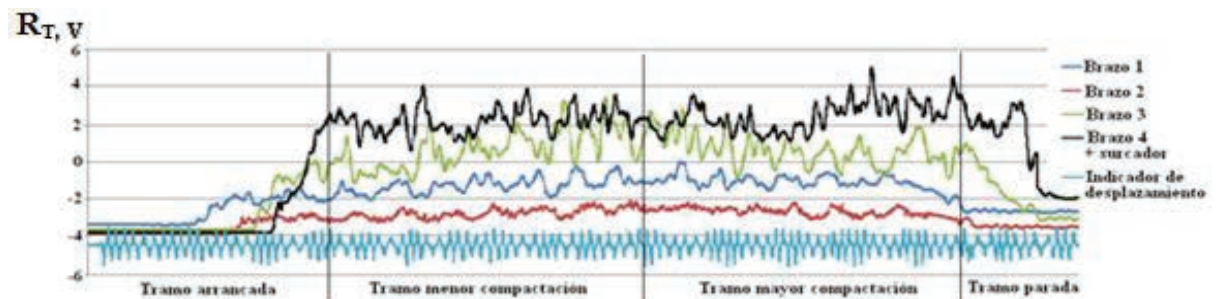


Figura 4.43 Registro característico de los ensayos de la Variante IV.

Los valores de resistencia tractiva obtenidos en los ensayos aparecen en la Tabla 4.30. Se puede comprobar la diferencia existente entre el brazo número cuatro de la Variante IV en comparación con los ensayos de la Variante III, motivado por tener que enfrentar la superficie de empuje del surcador al suelo no promovido por los órganos de corte que le anteceden.

Tabla 4.30 Resultado de los ensayos.

Resistencia tractiva, N							
Variante	Ensayos	Brazo 1	Brazo 2	Brazo 3	Brazo 4	Escala	Real
III	XIII	771,9	643,6	711,7	856,2	2 983,4	11 933,6
	XIV	810,3	793,9	831,5	998,9	3 434,6	13 738,4
IV	XV	725,5	597,6	645,0	1 668,9	3 637,0	14 548,0
	XVI	720,4	665,8	692,0	1 994,9	4 073,1	16 292,4

Como fue analizado anteriormente al evaluar la granulometría en la Variante IV se agrupan en la misma variante dos resultados adversos en un mismo modelo, una mala calidad en la granulometría y un mayor consumo energético. Esto justifica evaluar comparativamente las Variantes I y II roturando y Variantes III y IV roturando y surcando.

4.10 Análisis de la evaluación comparativa entre las variantes estudiadas.

Análisis de los resultados de la evaluación del perfil.

Al realizar un análisis comparativo del perfil resultante entre las cuatro variante objeto de estudio se arriba a las conclusiones siguientes:

Variante I:

- Para todos los valores de compactación, no existe diferencia significativa en el perfil generado, el cual mantiene uniformidad en su geometría, con tendencia a ser más estable su reproducción al incrementarse la velocidad (Tabla 4.7);
- Dentro del rango de humedad estudiado, su incidencia sobre el perfil, demuestra un comportamiento muy similar, con tendencia a su mejor reproducción al 24 % de su valor, en la condición de tempero del suelo Ferralítico rojo;
- Para valores menores de 20 % de humedad se producen paredes laterales rugosas y compactas, mientras que al sobrepasar los valores próximos al 32 % las paredes laterales del perfil, son más lisas, característico de un suelo arcilloso húmedo.

Variante II:

- De igual forma como sucedió con la Variante I, no existen diferencias significativas entre la variación del perfil generado por el incremento de la velocidad, lo que demuestra que dentro de los rangos de las variables independientes estudiadas, para las dos disposiciones de los órganos de corte en los modelos investigados, la variación de la velocidad no es influyente en la generación del perfil;
- La relación entre el perfil generado y la humedad del suelo mantiene una característica similar a la Variante I, reproduciendo la mejor geometría próxima al 24 % de humedad, y un comportamiento similar en las paredes laterales conformadas cuando se incrementa la humedad, no siendo así su comportamiento cuando la humedad disminuye, apareciendo

desprendimientos característicos de la liberación de tensiones internas en el suelo, buscando su estabilidad, cumpliéndose los principios enunciados por Rankine y Tersagui;

- La reproducción del perfil no sufre variación significativa si se incrementa la compactación, producto de la cohesión entre las partículas de suelo, independientemente del desprendimiento de fragmentos de este, en las paredes laterales y fondo del surco provocado por liberación de las tensiones internas del suelo.

Comparación entre ambas variantes.

Realizando la roturación, el perfil generado cumple con lo esperado de su reproducción, acorde a la geometría propuesta para la brocha agrícola, se observa la influencia de las tensiones internas en la generación del perfil, así como el carácter plástico del suelo y su comportamiento con el incremento de la humedad.

Para todo el rango de humedad y compactación estudiado la reproducción del perfil se ha mantenido sin una variación que difiera de las exigencias agrotécnicas para la preparación de suelos para la plantación de la caña de azúcar, como lo demuestra la evaluación estadística de los resultados, donde la tendencia hacia valores superiores de compactación no afecta su reproducción.

Como resultado de la evaluación del perfil en las Variantes III y IV roturando y surcando al unísono:

- El perfil obtenido en los ensayos de la Variante III (Figura 4.25) comparado con el generado en roturación en la Variante I (Figura 4.14) no sufre alteración por el paso del surcador, reproduciendo la geometría del surcador cumpliendo con las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar.
- El perfil obtenido en los ensayos de la Variante IV (Figura 4.27) comparado con el generado en roturación en la Variante II (Figura 4.17) demuestra que no coincidían los perfiles

generados por las saetas con el requerido por el surcador de producción nacional teniendo este que enfrentar la acción del suelo no fragmentado contra su superficie.

La situación antes expuesta llevó a los diseñadores del C-101XV a buscar la solución de la generación del perfil en el diseño de otro surcador sin un resultado favorable (Figura 4.44).



Figura 4.44. Surcador diseñado para el C-101XV

Análisis de los resultados de la evaluación de la granulometría.

Los valores obtenidos en la fase experimental, mantienen la misma proporción porcentual al realizar la transformación inversa de los resultados a magnitud real. Las dimensiones que se obtuvieron con un 14,82 % de fragmentos de suelo que superan las dimensiones de 150 mm contra 85,28 % con dimensiones inferiores a los 50 mm, en la Variante I y los 16 % mayores de 150 mm contra los 84 % inferiores a los 50 mm de la Variante II demuestran que ambas variantes son capaces de producir un desterronamiento acorde a las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar, si se realizara la labor por estos órganos en su magnitud real. Esto demuestra la efectividad del empleo de cuatro brazos para realizar la fragmentación del suelo.

La tendencia en el comportamiento de la Variante I, indica que puede trabajar en condiciones de alta compactación y velocidad, con baja humedad, porque aun así, es capaz de lograr resultados dentro de los límites permisibles en la preparación de suelo de forma localizada.

Entre las Variantes I y II.

- Existe una tendencia marcada a disminuir el porcentaje de fragmentos de suelo >40 mm, en la medida que disminuye la humedad del suelo y aumenta la velocidad de trabajo.

Coincidiendo con los resultados obtenidos por Kliuchkov en el año 1984 al evaluar la probabilidad de destrucción de los terrones en condiciones de campo, en un suelo Ferralítico rojo durante la roturación; un comportamiento similar lo reportaron Rajaram y Erbach, (1991) en investigaciones realizadas en el mismo tipo de suelo, durante estudios de labranza, en los que obtuvieron que el tamaño de los fragmentos de suelo, expresados por la masa y el diámetro medio de los mismos, aumenta al disminuir el contenido de humedad;

- La influencia de la compactación en la formación de fragmentos de suelo >40 mm es muy baja, contrario a lo que ocurre cuando se usan aperos como el arado de vertedera o de discos.

Entre las Variantes III y IV.

Al realizar los ensayos con surcador evaluando el comportamiento de la granulometría respecto a los ensayos de roturación se concluye lo siguiente:

- La granulometría obtenida durante los ensayos de roturación en la Variante I (Tabla 4.11) no se afecta con el paso del surcador, favoreciendo la generación del perfil, como lo demuestran los resultados obtenidos en los ensayos de la Variante III (Tabla 4.21).
- Por el contrario, los resultados de fragmentación obtenidos en la Variante II (Tabla 4.13) se deterioran por el paso del surcador, como lo demuestran los resultados obtenidos en la Variante IV (Tabla 4.21) con la aparición de grandes terrones (Figura 4.40c) producidos al empujar el surcador la sección de suelo no fracturado previamente.

Comportamiento de la resistencia tractiva en los ensayos realizados de las cuatro variantes objeto de investigación.

Al comparar los resultados del comportamiento de la resistencia traccional al investigar las Variantes I y II se puede señalar:

- Se comprobó que la resistencia traccional en la Variante I es superior a la Variante II en 3,56 % (Tabla 4.15), por el incremento del ancho de las saetas.
- Cuando se combinan las operaciones de roturación y surcado para ambas variantes (integrando las operaciones tecnológicas en un solo pase), en la Variante III se obtiene un incremento de la calidad del trabajo y se reduce el requerimiento traccional en 25,93 %, mientras que en la Variante IV se deteriora la granulometría significativamente.

Resumiendo los objetivos principales a alcanzar, basados en los fundamentos teóricos propuestos para la brocha agrícola, se cumplen al lograr:

- ✓ Pronosticar la geometría transversal del perfil del surco a crear;
- ✓ Minimizar el desplazamiento lateral del suelo durante el corte;
- ✓ Incrementar la fragmentación del suelo a valores que satisfagan las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar;
- ✓ Producir una granulometría en el suelo acorde a los preceptos de la Agricultura de Conservación;
- ✓ Reducir el consumo energético en la realización de la labor;
- ✓ Crear las bases para la propuesta de una tecnología de preparación de suelos para la plantación de la caña de azúcar con visión conservacionista y ecológica.

CONCLUSIONES

1. Los fundamentos teóricos e investigaciones experimentales, permiten afirmar que el principio de trabajo de la herramienta multidientes para la elaboración de metales, denominado brocha mecánica, es totalmente extrapolable a la elaboración de suelos Ferralíticos, en virtud de que al utilizarse, se obtienen resultados similares en lo que respecta a la posibilidad de definir los parámetros de la sección cortada y las dimensiones de los fragmentos de material, variando el ancho de los dientes y el escalón de altura entre los mismos, así como que se incrementan las ventajas tecnológicas derivadas de minimizar las operaciones de trabajo;
2. El programa y metodologías, elaborados sobre bases científicas permitió el desarrollo exitoso de la investigación en su concepción y ejecución. Se confirma el empleo de los canales de suelos como medios de investigación idóneos y la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento para la modelación a escala de órganos de preparación de suelos, considerando la similitud de los resultados obtenidos cuando son llevados a su verdadera magnitud con respecto a los ensayos realizados en condiciones reales de trabajo;
3. Las investigaciones realizadas muestran, en consecuencia, la posibilidad de crear un apero para la labranza localizada y surcado de suelos Ferralíticos dedicados a la plantación de la caña de azúcar cumpliendo con las exigencias agrotécnicas requeridas, avalado por los resultados siguientes:
 - En la Variante I, se genera un perfil en forma de pirámide truncada invertida para todos los valores de compactación y velocidad, no existiendo diferencias significativas en el perfil del surco generado, con tendencia a la mejor reproducción de sus parámetros geométricos

al 24 % de humedad del suelo. Para valores menores del 20 % de humedad se obtienen paredes laterales rugosas y compactas, al sobrepasar los valores próximos al 32 % de humedad las paredes laterales del perfil, son más lisas, cumpliéndose en todos los casos con las exigencias agrotécnicas para esta labor.

- Analizando ambas variantes, para los rangos estudiados de velocidad, humedad y compactación, los perfiles generados cumplen su reproducción acorde a la geometría propia de cada variante, con similar comportamiento a la brocha mecánica.
 - En el modelo propuesto, las dimensiones de fragmentos de suelo que superan las dimensiones de 150 mm no sobrepasan el 14,82 %, logrando un 85,28 % con dimensiones inferiores a los 50 mm, propias para el tape del esqueje de caña de azúcar; Así mismo, en la Variante II se logra un 16 % de fragmentos de suelo mayores de 150 mm y un 84 % inferiores a los 50 mm lo que demuestra que ambas variantes son capaces de producir un desterronamiento acorde a las exigencias agrotécnicas para la plantación de la caña de azúcar, siendo suficiente el empleo de cuatro brazos para este tipo de suelo;
4. Se comprobó que la resistencia traccional roturando, en el modelo propuesto (Variante I), es superior a la Variante II en 3,56 %, por el incremento del ancho de las saetas. Sin embargo, cuando se combinan las operaciones de roturación y surcado, aunque se requiera un segundo pase, se logra una disminución de la resistencia tractiva de 25,93 % sin deterioro en el cumplimiento de las exigencias agrotécnicas;
- La tendencia en el comportamiento del modelo propuesto, indica que puede trabajar en condiciones de alta compactación y velocidad, con humedades inferiores a 20 %, porque aun así, es capaz de lograr resultados dentro de los límites permisibles en la preparación de suelo de forma localizada, al situar el suelo cortado sobre la propia hilera con un desplazamiento mínimo.

5. Se demostró teórica, experimental y prácticamente la utilidad de crear aperos para labranza localizada de suelos a partir del laboreo en bandas de la capa de suelo a profundidades de 30 cm, lográndose economía en gastos de explotación.

RECOMENDACIONES

Considerando los resultados arriba expuestos se recomienda:

1. Construir un prototipo de apero, para labranza localizada, con 4 órganos escarificadores como el diseñado para esta investigación, para generalizar los resultados de este trabajo y evaluar su comportamiento en suelo Ferralítico rojo en condiciones reales;
2. Continuar investigaciones encaminadas a utilizar el principio de trabajo de la brocha mecánica al desarrollo de aperos para caña de azúcar, por las ventajas que brinda el poder pronosticar y reproducir la geometría del perfil del surco más adecuado;
3. Estudiar la posibilidad de crear aperos para la preparación de suelos destinados a los cultivos “no cañeros” de diferentes portes y área radicular, creándose un diseño adecuado a partir de los principios fundamentados para la brocha agrícola propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albóniga, R. A. (2004). *Validación mediante ensayos extensométricos del diseño por elementos finitos de órganos de trabajo agrícolas*. Memorias del X Congreso AGROMEC 2004. La Habana, Cuba: PUBLISIME.
2. Albóniga, R. A. (2006). Diseño y construcción de equipo de medición y procesamiento multicanal de ensayos extensométricos dinámicos, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(4), 59-62. Cuba.
3. Albóniga, R. A. (2007). *Diseño de una herramienta de múltiples escalones para aperos agrícolas*. Ciudad de La Habana: CICMA. Informe de evaluación energética en caña de azúcar. Condiciones naturales.
4. Albóniga, R. A. (2007). TENSOFIT. Software para la medición y procesamiento de datos de ensayos extensométricos. Registro 2806-2007. Depósito legal, CENDA, La Habana. Cuba.
5. Albóniga, R. A. (2007). *Diseño y construcción de equipo de medición y procesamiento multicanal de ensayos extensométricos dinámicos*. MEMORIAS DEL CONGRESO AGROCIENCIAS 2007. La Habana, Cuba: UNAH.
6. Albóniga, R. A. (2007). *Diseño de una herramientas de múltiples escalones para aperos agrícolas de preparación de tierras para la siembra de caña de azúcar*. Memorias AGROMEC 2007. La Habana, Cuba: PUBLISIME.
7. Albóniga, R. A. (2009). *Diseño y construcción de un canal de suelos para ensayos de laboratorio*. Memorias del Congreso AGROMEC, 2009. La Habana, Cuba: PUBLISIME.

8. Albóniga, R. A. (2009). *Diseño y construcción de instrumentos de medición como apoyo a la actividad de investigación agrícola*. Memorias del Congreso AGROMEC 2009. La Habana, Cuba: PUBLISIME.
9. Albóniga, R. A. (2009). *Optimización de aperos de múltiples escalones para la preparación de campos para la siembra de caña de azúcar*. Memorias del Congreso AGROMEC, 2009. La Habana, Cuba: PUBLISIME.
10. Albóniga, R. A. (2009). *Optimización de apero de múltiples escalones para la preparación de campos para la siembra de caña de azúcar, aplicando Métodos de Agricultura de Conservación*. Memorias del Congreso AGROCIENCIAS 2009. La Habana, Cuba: UNAH.
11. Albóniga, R. A. (2010). *Evaluación energética en canal de suelos a modelos a escala de subsolador escalonado*. CONVENCION METANICA 2010. La Habana, Cuba: PUBLISIME.
12. Albóniga, R. A. (2011). *Construcción de cuatro brazos de subsolador dinamométricos para la ejecución de ensayos en canal de suelos*. MEMORIAS DEL CONGRESO AGROCIENCIAS 2011. Mayabeque, Cuba: UNAH.
13. Albóniga, R. A. (2011). *Diseño de brazos de subsolador dinamométricos para la ejecución de ensayos en canal de suelos*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20 (3), 49-52.
14. Albóniga, R. A. (2011). *Principio de la brocha mecánica aplicado a un apero de preparación de suelo*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuaria*, 20 (4), 17-21.
15. Albóniga, R.A. (2012). *Construcción de cuatro brazos de subsolador dinamométricos para la ejecución de ensayos en canal de suelos*. Memorias de AGROCENTRO 2012. UCLV.
16. Albóniga, R.A. (2012). *Principio de la brocha mecánica aplicado a un apero de preparación de suelo*. Convención Internacional Ingeniería Agrícola 2012. V Congreso de Mecanización Agrícola. Octubre 2012. La Habana, Cuba.

17. Almarales, E. (1998). *Resultados de la generalización de diferentes variantes de laboreo mínimo en Santiago de Cuba*. Santiago de Cuba, Cuba: INICA.
18. Alt, R. (2005). *Es hora de la cero labranza* [en línea]. Australia. Disponible en: <http://www.australosorno.cl/site/edic/20050326060525/pags/25.html> [Consulta: 15 noviembre 2007].
19. Altieri, M. (1996). *Rotación de cultivos y labranza mínima: Curso para diplomado de postgrado Agroecología y Agricultura sostenible. Módulo 2. Diseño y manejo de sistemas agrícolas sostenibles*. La Habana, Cuba: CLADES-Programa de Educación a distancia. pp. 74-81.
20. Alvarado, O. y Marinov, Z. (1985). *Diseño y construcción de herramientas de corte*. Cuba: Pueblo y Educación. p. 221.
21. Álvarez, D. (1997). Para plantar bien la caña. *Cañaveral*, 3 (2), 8-10.
22. Álvarez, D. (2000). Reducir costos y ganar calidad. *Cañaveral*, 6 (2), 3-8.
23. Angás, P., Lampurlanés, J. y Cantero-Martínez, C. (2006). Tillage and fertilization effects on dynamics and barley yield under semiarid Mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research*, 3 (87), 59-71.
24. Arana, M. y Valdés, Y. R. (1999). *Tecnología y Sociedad: tecnología apropiada: concepción para una cultura*. Ciudad de La Habana: Félix Varela. pp. 19-22. ISBN 959-258-075-8.
25. Arzola, N. (2004). Influencia del cultivo de la caña de azúcar sobre el contenido de carbono orgánico del suelo. En: *40 Aniversario del INICA*. Santiago de Cuba, Cuba: INICA, p. 5.
26. ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2006). ASABE STANDARDS ASAE ep 236.1 FEB 03:06 *Planning and Reporting Tillage Experiments*. USA.

27. ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2006). ASABE STANDARDS ASAE EP291.3 FEB05:06 *Terminology and definitions for soil Tillage and Soil-Tool Relationships*. USA.
28. ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2006). ASABE STANDARDS ASAE S477 DEC01:06 *Terminology for Soil-Engaging Components for Conservation-Tillage Planters, drills, and seeders*. USA.
29. ASABE American Society of Agricultural Tillage Implements. (2006). ASABE STANDARDS ASAE S414.1 FEB04:06 *Terminology and Definitions for Agricultural Tillage Implements*. USA.
30. Aysen, A. (2002). *Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Applications d. A.* Tokyo, Japón: A. Balakema Publishers.
31. Balatón, J. (1980). *Investigación y elaboración de métodos para disminuir la resistencia a la tracción de los subsoladores*. Trabajo de Diploma. Moscú, URSS, Instituto de Ingeniería Agrícola de Moscú "P. Goriachkin".
32. Barahona, E. (2007). *Tipos de degradación. Degradación del suelo. El suelo. Edafología* [en línea]. USA. Disponible en: www.edafologia.net [Consulta: 22 diciembre 2007].
33. Barber, R. (2006). *Consultor de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Roma: FAO.
34. Barber, R. (2006). *Consultoría de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Roma, Italia: FAO.
35. BB Bigham Brothers Tillage equipment. (2008). *Subsoilers: Shear Bolt Paratill* [en línea]. USA. Disponible en: <http://www.bighambrothers.com/ptillshr.htm> [Consulta: 3 abril 2008].
36. BB Bigham Brothers Tillage Equipment. (2008). *Why use conservation tillage* [en línea]. USA. Disponible en: <http://www.bighambrothers.com/whycon.htm> [Consulta: 31 diciembre 2008].

37. Bekker, M. (1956). *Theory of land locomotion*. Ann Arbor, USA: The University Michigan. p. 520.
38. Bertolí, M. (1981). Influencia de diferentes números de labores mecánicas de cultivo sobre el rendimiento de la caña de azúcar y la densidad aparente de un suelo ferralítico rojo compactado. *Cultivos Tropicales*, 3 (3), 23.
39. Betancourt, Y. (2011). *Escarificación localizada primaria para el perfeccionamiento de la tecnología de preparación de suelos arcillosos pesados con superficie acanterada dedicados a la caña de azúcar*. Tesis de Doctorado. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, UNAH. h. 178.
40. Betancourt, Y., Gutiérrez, A., García, I., Cairo, P., Herrera, L., Aday, O. y Pineda, E. (2010). *Perfeccionamiento y generalización de las tecnologías mecanizadas de labranza mínima con manejo sostenible de los residuos agrícolas de caña de azúcar en los suelos arcillosos pesados de Villa Clara*. Villa Clara, Cuba: Informe Final de Proyecto de Investigación. 28.
41. Betancourt, Y., Rodríguez, M., Gutiérrez, A., Velarde, E. y García, I. (2007). Evaluación del mullido y el perfil descompactado de diferentes tecnologías de laboreo mínimo en suelos arcillosos pesados del norte de Villa Clara. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16 (3), 70-73.
42. Betancourt, Y., Rodríguez, M., León, L., Gutiérrez, A. y García, I. (2007). Variantes tecnológicas de laboreo mínimo para la plantación de caña de azúcar en los suelos de mal drenaje del Norte de Villa Clara. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16 (4), 53-57.
43. Betancourt, Y., Velarde, E. y García, I. (2007). El laboreo localizado en los suelos arcillosos pesados para la plantación de caña de azúcar. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16 (2), 31-34.

44. Blanco, G. (2007). *Maquinarias y equipos para el laboreo mínimo y convencional* [en línea]. INTERNET. Disponible en: <http://www.eumedia.es/user/articulo490> [Consulta: 05 mayo 2007].
45. Bolaños, J. (1989). *Suelos en relación a la labranza de conservación: aspectos físicos. Labranza de conservación de maíz*. Distrito Federal, México: El Batán.
46. Borgman, J. (1991). Acerca de la metodología de investigación para experimentos tecnológicos de gran escala en la preparación del suelo para el cultivo de la caña de azúcar en Cuba. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3 (1), 57-68.
47. Borgman, J. (1991). Acerca de los problemas de las tecnología utilizadas para la preparación del suelo para el cultivo de la caña de azúcar en la región occidental de Cuba. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3 (2), 25-33.
48. Bouza, H. (1981). La labranza mínima, nueva tecnología para el cultivo de la caña de azúcar. *Ciencias de la Agricultura*, 9 (2), 115.
49. Bouza, H. (1996). Nueva tecnología de labranza mínima en la CPA "Amistad Cuba-Laos". *Cañaveral*, 2 (2), 4-9.
50. Bowen, J. y Kvatky, B. (1982). Labranza reducida. *Agricultura de las Américas*, 31 (6), 14-16,22.
51. Braunack, M. (2000). *Strategic tillage, can it work for you? : Bases bulleting*. 69 ed. USA: Advancing Sugar. pp. 8-9.
52. Britto, A. y Gunn, M. (1987). *Critical State Soil Mechanics via Finite Elements*. USA: Ellis Horwood Limited.
53. Brizuela, M., Ríos, A. y Villarino, L. (2006). *Tecnologías para las producciones agrícolas en Cuba: Tecnología Mecanizada para la producción de caña de azúcar (Tema 7)*. La Habana, Cuba: IIMA. MINAGRI. p. 10.

54. Bucman, H. y Brandy, N. (1967). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. La Habana, Cuba: Edición Revolucionaria.
55. Cadena, M., Gaytan, T. y Zenneño, A. (2004). Desempeño de Aperos de labranza en Términos de Consumo de Energía y Calidad de Trabajo. *Revista Agraria-Nueva Época*, 1 (3), 12-17.
56. Cairo, P. y Quintero, G (1985). *Suelos*. Editorial Pueblo y Educación.
57. Cairo, P. (1985). Algunos aspectos relacionados con las labores en suelos pesados bajo de caña de azúcar. *Centro Agrícola*, 12 (3), 51-62.
58. Cairo, P., Carvajal, M. y Machado, J. (2001). Efecto de diferentes métodos de mejoramiento sobre la fertilidad de los suelos degradados dedicados al cultivo de la caña de azúcar. *Centro Azúcar*, 1 (2), 37-42.
59. Camacho, E. (1984). Propiedades físicas, hidrofísicas y físico mecánicas de los suelos ferralíticos compactados en Cuba. *Ciencia de la Agricultura*, (20), 89.
60. Campos, B. y Fernández, L. (1979). Estudio de nuevas tecnologías mecanizadas de preparación de tierras en caña de azúcar. *Ciencia y Técnica en la Agricultura. Serie Mecanización en la Agricultura*, 2 (1-2), 27-38.
61. Carman, K. (2002). Compaction characteristic of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil & Tillage Research*, 3 (65), 37-42.
62. Carof, M., Tourdonnet, S., Coquey, Y., Hallaire, V. y Rogerestrade, J. (2007). *Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France Soil. Use and Management* 23 ed. París, Francia: Geotechnique. pp. 230-237.
63. Castillo, P. (2008). *Evaluación del impacto de cuatro tecnologías de labranza sobre las propiedades físicas de un suelo tipo vertisol y los rendimientos agrícolas y energéticos de la*

- caña de azúcar (saccharum Officinarum), en el CAI Majibacoa, en la Provincia Cubana las Tunas*. Tesis de Doctorado. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid.
64. Castro, F. (1996). Problemas fundamentales a solucionar en la industria azucarera de Cuba. *Verde Olivo*, 1, 81.
 65. Castro, J., Araujo, A., Merten, G., Henklain, J. y Monice, R. (1990). *Preparo do solo e elementos da planejamento da mechanizaca agrícola*. Londrina, Paraná, Brasil: IAPAR. p. 111.
 66. Cera, M. y Cavali, R. (1989). Planning of soil cultivation and mechanization of reduce tillage. En: *21 Conferencia Internacional de Mecanización Agrícola*. Zaragoza, España: SVL, pp. 37-58.
 67. Chi, L. (1993). Modelingmechanical behavior of agricultural soils. *Transactions of the ASAE*, 4 (36), 6-15.
 68. Chi, L., Kushwaha, R. y Shen, J. (1993). An elasto-plastic constitutive model for agricultural cohesive soil. *Agricultural Engeenering*, 35 (4), 245-251.
 69. Córdoba, R. (1999). *Laboreo localizado de suelos. Informe de Investigación*. 70 pags. La Habana, Cuba: INICA.
 70. Córdoba, R., Velarde, E., Zuasnábar, R. y Gómez, A. (2005). El laboreo de suelos y su efecto sobre la incidencia de las malezas en el cultivo de la caña de azúcar. En: *XVIII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas*. La Habana, Cuba: ALM, p. 6.
 71. Córdoba, R., Velarde, E., Gómez, A. y Leyva, M. (1997). *Tecnología mecanizada para el laboreo localizado*. La Habana: INCA.
 72. Coulomb, C. A. (1776). *Essai ser use application des regles es maximus et minimos a quel que problemes de statique relates a architerture: memores de mathematikue at phisyque*. Paris, Francia: Academie Rollale Sueres. pp. 343-386.
 73. CTIC. (1984). *Conservation tillage Practices*. USA: Fortawayne. p. 137.

74. Cuadras, F., Rodríguez, H., Ruíz, J., Morales, F., Vandrell, O., Cortegaza, P., Sánchez, R., Quintero, F. y Barroso, G. (2004). Impacto del sistema de extensión agrícola en la implementación del laboreo mínimo. En: *Jornada Científica por el 40 Aniversario del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar*. Santiago de Cuba, Cuba: INICA.
75. Cuba. INICA. (1997). *Descepador Subsolador C-101. Instructivo Técnico*. La Habana: MINAZ. p. 10.
76. Cuba. INICA. (1998). *Instructivo Técnico para el laboreo localizado con el escarificador C-101*. La Habana: INICA-MINAZ. p. 14.
77. Cuba. INICA. (2007). *Instructivo Técnico para la producción y cultivo de la caña de azúcar*. La Habana: INICA. p. 166.
78. Cuba. MINAZ. (1997). *Labores principales en el control de la calidad de la siembra*. La Habana: Ministerio del Azúcar. p. 7.
79. Cuellar, I., De, M., Gómez, A., Piñón, D., Villegas, R. y Santana, I. (2003). *Caña de Azúcar. Paradigma de sostenibilidad*. La Habana, Cuba: INICA.
80. Cuellar, I., Villegas, R. y De, M. E. (2002). *Álvaro Reynoso: 140 años después*. La Habana: Unidad de Impresión Gráfica MINREX. pp. 23-27. ISBN 1638438-6-1.
81. Cuellar, L., Villegas, R., De, M. y Pérez, H. (2002). *Manual de fertilización de la caña de azúcar en Cuba*. La Habana, Cuba: ICIDCA. p. 127.
82. Del, F. (1986). *El cultivo de la caña de azúcar*. Venezuela: Enpes. pp. 95-118.
83. Derpesch, R. y Friedrich, T. (2009). Development and Current Status of No-till. Adoption in the World. En: *18 th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization*. Izmir, Turkey: ISTRO.
84. Dexter, A. R., Krocsbergen, B. y Kuipers, H. (1984). Some mechanical properties of aggregates of top soils from Ijsselmeer polders: 2. *J Agricultural Sci*, 2 (32), 215-227.

85. Dolbi, D. (2006). Preparación del terreno. Feriagro 2006, Santa Fe, Argentina. *Agrotécnicas*, IX (4), 64-69.
86. Domínguez, M. (1980). *Determinación del estado de sazón física o tempero de los suelos*. Ciudad Habana, Cuba: CICMA/SIME.
87. Domínguez, M. y Fonseca, M. (1979). La compactación del suelo en la cosecha de caña mecanizada. *ATAC*, 38 (3), 57-64.
88. Durán, G. (2001). Efectos de las interacciones humedad, densidad, profundidad y tipo de reja en la fuerza pasiva de un suelo de textura franca. *Interciencia*, 2 (26), 96-102.
89. Durán, H. (2000). Development and construction of a mini soil bin. *Agricultural Mechanization in Asia, África and Latin América*, 2 (31), 27-28.
90. Durán, H. M. (2001). Efecto de las condiciones físicas del suelo y de las rejas de sembradora de cereales en el valor de las fuerzas que provocan su rotura pasiva. *Interciencia Print*, 26 (9), 15-22.
91. Durán, J. (1996). *Los suelos tropicales y su manejo ecológico: Curso para diplomado de post-grado. Agroecología y Agricultura Sostenible*. La Habana, Cuba: CLADES-Programa de educación a distancia. pp. 64-73.
92. Everman, E. (1982). Máquina Combinada para la labranza mínima del suelo y la siembra. *Far Power Equipment*, 73 (3), 20.
93. FAO. (1988). *Soil map of the world, reviewed legend*. 80 ed: FAO-UNESCO. Roma, Italia.
94. Fernández, J., Furlani, V. y Stolf, R. (1980). Un subsolador con alas como apero de preparación de suelos para la caña de azúcar. *Brasil Azucarero*, 96 (6), 33-40.
95. Fernández, S., Torruela, A., Galán, L., Díaz, R., Rojas, O., Barbosa, R. y Reynoso, G. (2004). Nuevas variantes de laboreo mínimo en la empresa azucarera "América Libre" sin quemar residuos de cosecha. En: *Jornada Científica por el 40 Aniversario del Instituto nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar*. Santiago de Cuba, Cuba: INICA.

96. Figueroa, A. (1992). *Manual de producción de cultivos con labranza de conservación*. México, Distrito Federal: Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. p. 6.
97. Friedrich, T. (2003). *Capítulo 5. Aperos de labranza* [en línea]. Roma, Italia, FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/ags/AGS/agse-s/7mo/iita.htm> [Consulta: 03 mayo 2005].
98. García, A. (1991). Estudio de las propiedades tecnológicas más importantes de los suelos cubanos. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3 (2), 61-67.
99. García, A. (2008). *Mecanización Agropecuaria*. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela. p. 259.
100. García, I. (1997). *Preparación localizada de suelos para la plantación de la caña de azúcar en Villa Clara. Informe Técnico*. Villa Clara, Cuba: INICA.
101. García, I., Vidal, L., Sánchez, M., Gutiérrez, A. y Velarde, E. (2000). Preparación localizada de suelos para la plantación de caña de azúcar en Villa Clara. *Centro Azúcar*, 1 (2), 26-30.
102. Garrido, J. (1985). *Explotación del parque de maquinaria. I Parte*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación. p. 95.
103. Garrido, J. (2000). *Aperos y Máquinas Agrícolas. Fundamentos para su explotación*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación. p. 504.
104. Garrido, J., Campos, M. y Navarro, N. (1988). *Evaluación técnico económica de seis variantes tecnológicas de preparación de suelos oscuros plásticos gleysoso para caña en la costa norte de la provincia Villa Clara*. Villa Clara, Cuba: Facultad de Ciencias Agrícolas. Departamento de Mecanización. UCLV.
105. Gil, J. (2008). Chisel y Cultivadores: la forma más rentable de trabajar. *Agrotécnica*, XI (5), 86.

106. Gill, W. R. y Glen, E. (1968). *Soil Dynamics in Tillage and Traction: Agriculture Handbook*. Washington, USA: Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture. Printing Office. p. 316.
107. Ginokov, G. N. (1962). *Deformaciones originadas en el suelo por la acción de una cuña*. 33 ed. Bisjom, URSS: Publicaciones Estatales.
108. Godwin, R. J. y Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. *J. Agric. Engineering Res*, 2 (22), 213-228.
109. Gómez, A., Velarde, E. y Córdoba, R. (1997). Nuevas soluciones para la preparación de suelos en Cuba. *Cuba & Caña*, 2 (3), 31-36.
110. González, R. (2011). *Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Mecanización Agrícola, Santa Clara, Cuba, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
111. González, G. (1998). Oportunidades y limitaciones para el laboreo mínimo. *Cañaveral*, 4 (1), 42-47.
112. González, M. (2007). *Apuestas por una agricultura sostenible: Laboreo de Conservación*. La Habana, Cuba: Cuadernos INEA. Colección de Agricultura y medioambiente. p. 54.
113. González, O. (2011). *Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos de los vehículos agrícolas en suelos ferralíticos rojos*. Tesis de Doctorado. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, UNAH. h. 185.
114. González, O., Iglesias, C., Herrera, M., López, E. y Sánchez, A. (2008). Efecto de la humedad y la presión del suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferrasol. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17 (2), 50-54.
115. González, R. (1993). *Explotación del parque de maquinaria*. La Habana: Pueblo y Educación. p. 318.

116. Goriachkin, V. P. (1927). *Teoría del arado*. Moscú, URSS: Editorial Promizadat.
117. Goriachkin, V. P. (1935). *Obras Seleccionadas: Teoría de la destrucción del suelo*. Tomo II ed. Moscú, URSS: Editorial Kolos. pp. 368-380.
118. Goriachkin, V. P. (1965). *Obras Escogidas*. Tomos I, II y III ed. Moscú, URSS: Editorial Kolos.
119. Grisso, G. P. (1985). Review of model for predicting performance of narrow tillage tool. *Transactions of the ASAE*, 4 (28), 162-167.
120. Grisso, R. D. y Perumpral, J. V. (1985). Review of models for predicting performance of narrow tillage tool. *Transactions of the ASAE*, 4 (28), 15-23.
121. Gutiérrez, F., González, A., Serrano, R. y Norman, T. (2004). Evaluación tecnológico explotativa del conjunto Multiarado-Tractor J.D. Modelo 4235 en la labor de preparación primaria de un vertisol. *Ciencia Ego Sum*, 11 (2), 171-176.
122. Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M. y Cabrera, A. (2005). *Correlación de la nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba con las clasificaciones internacionales y nacionales: una herramienta útil para la investigación, docencia y producción agropecuaria*. La Habana, Cuba: Instituto de Ciencias Agrícolas (INCA). p. 62.
123. Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M. y Cabrera, A. (2005). *Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba*. Instituto de Suelos, La Habana, Cuba: AGRINFOR. p. 64.
124. Hernández, O. y Bouza, H. (1998). El elemento humano en la preparación de suelo. *Cañaveral*, 4 (1), 22-24.
125. Hernanz, J. (1990). *Maquinaria para el laboreo mínimo y siembra directa*. España: Ministerio para la pesca y alimentación. pp. 3-16.

126. Hernanz, J. y Sánchez-girón, V. (1998). *Agricultura de Conservación: fundamentos agronómicos medioambientales y económicos: capítulo 14. Utilización de la energía en diversos sistemas de laboreo*. España: MAPA. p. 372.
127. Herrera, A. y Milanés, N. (2004). Evaluación de tres sistemas de labranza y tres métodos de siembra de caña de azúcar en Veracruz, México. En: *Evento 40 Aniversario del INICA*. La Habana, Cuba: INICA.
128. Herrera, M. (1987). Empleo de escarificadores alados en la descompactación de los vertisuelos según los principios de la agricultura sostenible. En: *II Conferencia Entorno Agrario*. Sancti Spíritus: Centro Universitario de Sancti Spíritus.
129. Herrera, M. (2001). *Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores*. Tesis de Maestría. La Habana, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. h. 65.
130. Herrera, M. (2001). Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte 1. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10 (3), 21-28.
131. Herrera, M. (2001). Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte 2. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10 (3), 29-36.
132. Herrera, M. (2006). *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el Método de Elementos Finitos*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. 107 p.
133. Herrera, M., Cruz, M. y Flores, M. (2008). Paratrill C-80. Nuevo apero para la labranza conservacionista de los suelos cañeros. En: *Seminario Científico Conmemorativo por el 40 Aniversario del CEMA*. La Habana, Cuba: UNAH.
134. Herrera, M., Iglesias, C., Rodríguez, M., García, A., Pérez, R. y Fernández, M. (2001). Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores: parte 1. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10 (1), 21-27.

135. Hettiaratchi, D. R. P. (1967). Symmetrical three dimensional soil failure. *J. Teramechanics*, 3 (4), 45-67.
136. Hettiaratchi, D. R. P. (1980). Mechanical behavior of agricultural soil. *J. Agric. Engeenering Res*, 2 (25), 50.
137. Hettiaratchi, D. R. P. (1987). A critical state soil mechanics model for agricultural soil. *Soil use and Management*, 3 (3), 94-105.
138. Hettiaratchi, D. y Reece, P. (1974). The calculation of passive soil resistance. *Geotechnique*, 24 (3), 289-310.
139. Hettiaratchi, D., Witney, B. y Reece, A. (1966). The calculation of passive pressure in two dimensional soil failure. *Journal Agricultural Engineering Research*, 11 (2), 88-107.
140. Hoogmoed, W. (1982). *Resultados da avaliacao de escarificadores no Paraná, Brasil*. Londrina, PR, Brasil: Convenio IAPAR/GTZ.
141. Humbert, R. (1973). La caña de azúcar: ¿Necesita labranza profunda? *Agricultura de las Américas*, 19 (4), 32-33, 37-38, 40-42, 51.
142. Ibarra, S., Mc kyes, E. y Broughton, R. (2005). A model of stress distribution and cracking in cohesive soils produced by simple tillage implement. *J. Teramechanics*, 3 (42), 115-139.
143. Iglesias, C. y Herrera, M. (2001). Función del empleo de la teoría de la semejanza y el dimensionamiento en la investigación de modelos de órganos para el escarificado y subsolado de suelos. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3 (4), 15-19.
144. Iglesias, C. y Herrera, M. (2001). Fundamentación del empleo de la Teoría de la Semejanza y el Dimensionamiento en la investigación de modelos órganos para el escarificado y subsolado de los suelos. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3 (10), 15-19.
145. Iglesias, C. y Herrera, M. (2004). *Fundamentación de los parámetros de diseño un órgano escarificador de alta eficiencia energética*. Co: 01005. Ciudad Habana, Cuba: MINAGR.

146. IIMA. (2002). *Instructivo técnico del Multiarado M-250 cañero*. La Habana, Cuba: Ediciones IIMA. p. 11.
147. IIMA. (2006). *Tecnologías para las producciones agrícolas en Cuba*. La Habana, Cuba: AGRINFOR, MINAGRI. pp. 112-118. ISBN 9592461864.
148. INICA. (1986). *Informe de los resultados obtenidos en los experimentos de laboreo mínimo*. La Habana, Cuba: INICA.
149. INICA. (1987). *El laboreo mínimo en caña de azúcar*. Quivicán, La Habana, Cuba: INICA.
150. Instituto de Suelos. (1975). *Segunda clasificación genética de los suelos de Cuba*. Suelos No 23:3-25. La Habana, Cuba: Academia de Ciencias de Cuba. p. 38.
151. Judice, W. (2005). *Reduced tillage and residue management program in sugarcane*. Tesis de Maestría. Louisiana, USA, Department of Agronomy and Environmental Management. Louisiana State University. h. 76.
152. Kachanov, L. M. (2004). *Fundamentals of the Theory of Plasticity*. Londres, Inglaterra: Dover Pubs. p. 420.
153. Karmakar, S. y Kushawaha, R. (2003). *Propagation of soil failure front associated with varios agricultural tillage tools*. 031117. USA: ASSAE Paper. p. 12.
154. Karmakar, S. y Kushawaha, R. (2004). Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASAE*, 4 (48), 923-932.
155. Karmakar, S., Kushawaha, R. y Stilling, D. S. D. (2005). Soil failures associated with crack propagation for an agricultural tillage tool. *Soil & Tillage Research*, 3 (84), 119-126.
156. Kawamura, N. (2052). Study on soil cutting and pulverization. *Society of Agricultural Mechanery Journal*, 14 (3), 10-15.
157. Keller, T. (2004). *Soil Compaction and Soil Tillage- Studies in Agricultural Soil Mechanics*. Tesis de Doctorado. Uppsala, Sweden University of Agricultural Sciences.

158. Kim, J. (2004). Modeling of void growth in ductile solids: effects of stress triaxiality and initial porosity. *Engineering Fracture Mechanics*, 2 (71), 379-400.
159. Kimato, S., Oka, F. y Higo, Y. (2004). Strain localizations analysis of elasto-viscoplastic soil considering structural degradation. *Comput. Methods. Appl. Mech. Eng*, 4, 193.
160. Kimes, A. y Suárez, O. (1980). *Suelos de Cuba*. Tomo II ed. Ciudad Habana, Cuba: Orbe. pp. 43-58, 66-85, 95-99, 103-105.
161. Kirchenko, A. (1976). Agregado combinado para la preparación de suelos. *Técnica en la Agricultura*, 10 (2), 86-87.
162. Klimes, A. (1980). *Suelos de Cuba: tomo II*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación. p. 370.
163. Kliuchkov, A. V. (1984). Probabilidad de destrucción de los terrones del suelo durante su elaboración. *Mecanización y Electrificación de la Agricultura*, 2 (3), 17-19.
164. Kostritsyn, A. (1956). Corte de un medio coherente con cuchillas y conos: academia soviética de ciencias agrícolas. *Mecanización del laboreo del suelo. Recopilación de Trabajos. Leningrado, URSS*, Especial (3), 247-290.
165. Kraptin, E. N. (1971). *Sobre la utilización del método de la teoría del dimensionamiento en la evaluación de los indicadores traccionales del trabajo en distintas condiciones de los arados*. Moscú, URSS: Trabajos Científicos MIISP.
166. Lade, P. V. (1977). Elasto-plastic stress-strain theory for cohesion less soil with curved yield surfaces. *Int. J. Solids and Structure*, 3, 13.
167. Larson, W. y Pierce, F. (1994). *The dynamics of soil quality as measure of sustainable management*. USA: Soil Science Society of America 677.
168. Leyva, O. (1998). Comportamiento de la resistencia traccional en un escarificador vibratorio. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 7 (3), 17-20.

169. Leyva, O. (1999). La preparación de suelos y su tendencia al laboreo mínimo. En: *Seminario Provincial de actualización para Subdirectores Agrícolas y jefes de Maquinarias de los Complejos Agroindustriales Azucareros de la Provincia de Granma*. Bayamo, Granma, Cuba: Delegación provincial del MINAZ, p. 19.
170. Leyva, O. (2004). Tendencias actuales de las tareas de preparación de suelos. En: *AgrIng 2004*. La Habana, Cuba: UNAH.
171. Leyva, O. (2009). *Fundamentación de una tecnología para el laboreo mínimo de suelos vertisoles basada en la aplicación de una máquina compleja en caña de azúcar*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, Universidad Agraria de la Habana, h. 145.
172. Leyva, O. y Parra, L. R. (2001). Apuntes de la conferencia sobre tecnología de preparación de suelos. En: *Seminario provincial sobre caña de azúcar para los subdirectores agrícolas de los CAI del MINAZ en Granma*. Cuba: MINAZ.
173. Leyva, O., Paneque, P., Vidal, Y., Parra, L. y Ortiz, A. (2007). Efecto de seis tecnologías de laboreo de conservación sobre un suelo aluvial. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16 (3), 77-80.
174. Leyva, O., Parra, R., Vidal, Y. y Ortiz, A. (2007). Análisis comparativo entre seis tecnologías de laboreo de conservación sobre un suelo aluvial para caña de azúcar respecto al rendimiento agrícola de la cosecha en la Empresa Azucarera "A. Colina" de la Provincia Granma. En: *AGROCIENCIAS 2007*. La Habana, Cuba: UNAH.
175. Livingston, S. y Bade, D. (1996). *Paratill Renovations of pastures and Hayfields* [en línea]. Texas Agricultural Extension Service, The Texas A y M University System. L 5154. Disponible en: www.bighambrothers.com/tamu5154.htm [Consulta: 31 diciembre 2002].
176. Luna, y González, A. (2004). Estudio de la influencia de las vibraciones horizontales en los requerimientos energéticos del laboreo profundo del suelo. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13 (1), 21-24.

177. MAG-FAO. (1996). *Uso del arado de cincel para la producción agrícola y la conservación de suelo y agua*. Informe de investigación Informe Técnico No. 15. San José, Costa Rica: AG.GCP.
178. Maldonado, P. (2007). Consejos para preparar suelos agrícolas. *Juventud Rebelde*, 31 de diciembre.
179. Maliock, A. (1881). *The Actions of Cutting Tool*. Londres, Inglaterra: Proc. Roy. Soc. Lond. p. 127.
180. Manso, R. (2008). *La caña de azúcar principal cultivo de la agricultura* [en línea]. La Habana, Cuba. Disponible en:
<http://www.radiohc.cu/español/agricultura/exclusivas/caña.htm> [Consulta:3 julio 2008]
181. Márquez, L. (1996). La maquinaria agrícola en los próximos años: equipos para trabajar el suelo. *Laboreo (España)*, 1 (6), 92-94.
182. Márquez, L. (2008). Actuaciones que permiten reducir las emisiones en la actividad agraria. *Agrotécnica*, XI (3), 66.
183. Martín, O. (1987). *La caña de azúcar en Cuba*. La Habana, Cuba: Editorial Científico Técnica.
184. Martínez, J. (2004). *Apuntes de Mecánica de Fluido: universidad de Oviedo*. Gijón, España: Área de Mecánica de Fluido. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón.
185. Mateo, J. (1996). *Manual de prácticas y actuaciones agroambientales*. Madrid, España: Editorial Agrícola Española y Ediciones Mundi-Prensa. pp. 67-79.
186. Mc, H. y Ericsson, E. (1956). Mediciones de fuerza para aperos de laboreo. *Agricultural engineering*, 16 (37), 605-608.
187. Mc kyes, E. (1985). *Soil cutting and tillage*. Ámsterdam, Holanda: Elsevier. p. 217.
188. Mc kyes, E. y Alí, O. S. (1977). The cutting of soil by narrow blades. *J. Terramech*, 2 (14), 43-58.

189. Mena, N., Pérez, C., Brydson, J. A. y Molina, A. (2010). *Tecnologías de mejoramiento de suelos con utilización de materia orgánica* [en línea]. Universidad de Ciego de Ávila. Disponible en: www.Monografias.com [Consulta: 05 abril 2010].
190. Merc, M. (1945). Mechanic of metal Cutting Process. *Journal of Applied Physics*, 10 (1), 267-348.
191. Meza, E. y Geissert, D. (2003). *Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánicos del cofre de Perote*. 002 ed. Veracruz México: Universidad de México. pp. 57-61.
192. MINAGRI. (1978). Norma Ramal NRAG 047:78:78 *Preparación de suelos en caña de azúcar*. La Habana, Cuba.
193. MINAZ. (2002). *Fundamentación para el uso de la tecnología de laboreo mínimo en la preparación de suelos*. La Habana, Cuba: Ediciones MINAZ. p. 6.
194. MINAZ. (2004). *Fundamentos Técnicos Prácticos del cultivo de la caña de Azúcar*. La Habana: Ministerio del Azúcar (MINAZ). Organismo Central. p. 21.
195. MINAZ. (2004). *Proyecto de producción de caña de azúcar 2005-2007-2010*. La Habana, Cuba: MINAZ. p. 32.
196. MINAZ. (2008). *Estrategia para la producción de caña 2009-2013*. La Habana, Cuba: Ministerio del Azúcar (MINAZ). p. 61.
197. Mónico, S. (2007). *Posibilidades de las labranzas profundas* [en línea]. Argentina. Disponible en: <http://www.fcagr.unr.edu.ar/extension/agromensajes/04/3am4.htm> [Consulta: 12 noviembre 2007].
198. Moreno, A. (1993). *Diseño de un canal de suelo para la Investigación de Órganos de Trabajo Bajo la Teoría de Modelación*. Trabajo de Diploma. México, Universidad Autónoma Chapingo.

199. Müller, L., Schindler, U., Fausey, N. R. y Lal, R. (2003). Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil & Tillage Research*, 3 (72), 9-20.
200. Muñiz, A. (1998). *Resultado de la preparación de suelos con la tecnología de laboreo mínimo localizado en suelos pardos de la provincia de Cienfuegos*. La Habana, Cuba: INICA.
201. Norton, C. (1979). *Evaluación energética de órganos de trabajo para arados de cincel*. Ciudad de la Habana, Cuba: ATAC.
202. Norton, C. (1985). Determinación de parámetros para un diseño de optimización energética en órganos para el escarificado profundo de suelos. *Boletín informativo ICT-CICMA*, 2 (85), 21-42.
203. Norton, C. (1987). *Determinación de los parámetros óptimos para los órganos de trabajo empleados en el escarificado profundo en las condiciones de suelos de Cuba*. Ciudad de la Habana: CICMA. p. 168.
204. Norton, C. (1987). *Determinación de los parámetros óptimos para los órganos empleados en el escarificado profundo en las condiciones de suelos de Cuba*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, CEMA.
205. Norton, C. y Peraza, E. (1982). Clasificación general de los aperos agrícolas con órganos de cincel para el laboreo del suelo. En: *Ponencia I Seminario Científico CEMA-ISCAH*. La Habana, Cuba: CEMA-ISCAH.
206. Nuss, J. (1997). *Synchronization of flowering to implement a proven cross breeding system in sugar cane* [en línea]. USA. Disponible en:
<http://www.books.google.com/cu/books?isbn=9977648115> [Consulta: 19 octubre 2010].
207. O'Callaghan, J. y Farrelly, K. (1964). Cleavage of soil by tined implements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 9 (3), 259-270.

208. Olivet, Y. (2010). *Efectos de tres sistemas de labranza en las propiedades físicas y en el consumo energético para el cultivo del tabaco*. Tesis de Doctorado. Madrid, España, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
209. Olson, D. J. y Weber, J. A. (1966). Effect of speed on soil failure patterns in front of model tillage tools. *Trans. Soc. Auto. Engeenering*, 2 (74), 298-310.
210. Ortiz, J. (1989). *Técnica de la Mecanización Agraria. Tercera Edición*. España: Mundi-Prensa. p. 643.
211. Ortiz-, J. (2003). *Las máquinas agrícolas y su aplicación*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa. p. 526.
212. Ortiz, L. y Rössel, K. (2007). *Herramientas para la labranza de suelos agrícolas*. Estado de México: Colegio de postgraduados. pp. 3-16, 27,39, 61-158.
213. Paine, P. C. J. (1956). The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *J. Agric. Engeenering Res*, 1 (1), 23-50.
214. Paneque, P. y Sotto, D. (2007). Costo energético de las labores de preparación de suelo en Cuba. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17 (3), 23-27.
215. *Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución: VI Congreso del Partido Comunista de Cuba*. (2011). La Habana, Cuba: Editora Política. p. 38.
216. Payne, P. C. J. (1956). The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *Journal of Agricultural Engeenering Research*, 1 (1), 23-50.
217. Pear, E., Bouza, H., Morales, M., López, N., Hernández, S. y Martínez, I. (1992). Influencia de dos tecnologías de labranza en el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes y el rendimiento de la caña de azúcar. *Ciencias del Suelo*, 1 (2), 25-35.
218. Pérez, C. y Plá, E. (1998). Dos experiencias sobre laboreo, labranza en franja y mejoramiento de suelo. *Cañaveral*, 4 (3), 27-28.

219. Piery, C. (2002). *No till farming for sustainable rural development*. Washington, USA: Rural Development Department. p. 77.
220. Primavesi, A. (1998). El laboreo localizado con el C -101. En: *Memorias Cuarenta Aniversario del INICA*. La Habana, Cuba: INICA, p. 499.
221. Pupo, L., Tejeda, V., Rodríguez, L. y Sao, E. (2004). *El laboreo localizado con el C-101, resultados técnicos -económicos obtenidos en la aplicación entre el período 1999-2001 en la Provincia Las Tunas* [en línea]. La Habana, Cuba. Disponible en: <http://www.ilustrados.com/publicaciones /Ep22lp2.faVxBmilWvI.php> [Consulta: 18 enero 2008].
222. Pupo, P. (2005). Tecnologías de preparación de suelos para la plantación de caña de azúcar y su interacción con las labores de cultivo: síntesis de tesis doctoral. *Cuba & Caña*, 2 (1), 133-134.
223. Quesada, R., Mato, J. y Parra, L. (2010). *Labranza Localizada* [en línea]. INTERNET. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/labraz.htm> [Consulta: 25 febrero 2010].
224. Quinsen, Y. y Shuren, S. (1994). A soil-tool interaction model for bulldozer blades. *J. Teramechanics*, 3 (31), 55-65.
225. Rajaram, G. y Erabach, D. (1991). Drying stress effect on soil mechanical behavior. *J. Agric. Engeenering Res*, 2 (51), 51-60.
226. Rajaram, G. y Erabach, D. C. (1991). A mini soil bin for tine soil interaction studies. *Transactions of the ASAE*, (34), 345-356.
227. Ramírez, A., Rösell, R., Verdecía, M., Zamora, M. y Torres, E. (2010). *Preparación del suelo para la producción cañera con una Alternativa Ecológica* [en línea]. Argentina. Disponible en: <http://www.newsmatic.epol.com.ar/index.php&aid903&eid> [Consulta: 23/03/2010].

228. Reaves, C. A., Cooper, A. W. y Kunmer, F. A. (1968). Similitude in Performance Studies of Soil-Chisel Systems. *Transactions of ASAE*, 4 (28), 658-660.
229. Rebolled, J. y Gómez, J. (2000). Sistema de labranza reducida en el ingenio manuelita S.A. *CENICANÑA*, 1 (2), 30-34.
230. Reece, A. R. (1965). *The fundamental equation of earthmoving mechanics Symposium on Earthmoving Machinery*. Londres, Inglaterra: Institution of Mechanical Engineers London. p. 179.
231. Reicosky, D. C. y Saxton, K. E. (2006). *Reduced Environmental Emissions and Carbon Sequestration*. Roma, Italia: FAO. ISBN 92-5-105389-8.
232. Reyes, F. (1980). *Investigación sobre distintas formas de preparación de suelos antes de la siembra del cultivo de la caña en condiciones de Cuba*. Tesis de Doctorado. Plodiv, Bulgaria, ISCAH.
233. Reynoso, A. (1862). *Ensayo sobre el cultivo de la caña de azúcar*. La Habana, Cuba: Editora Nacional de Cuba.
234. Ricardo, A. (2005). *Es la hora de la cero labranza* [en línea]. Chile. Disponible en: <http://www.australosorno.cl/site/edic/20030326060525/pags/20030326062044.html> [Consulta: 15 noviembre 2007].
235. Ríos, A., Castro, P., Campos, R. y Suárez, J. (2006). *Tractores e Aperos Agrícolas: IIMA*. La Habana, Cuba: AGRINFOR. Ministerio de la Agricultura. pp. 36-39. ISBN 959-246-187-2.
236. Rodríguez, R. (1986). *El laboreo mínimo de suelos: boletín de reseñas. serie mecanización agropecuaria*. La Habana, Cuba: MINAGRI.
237. Rodríguez, S., Romero, J. L., Ortega, E., Dell' amico, J. y Cabrera, A. (2007). Influencia de la hipoxia sobre la profundidad radical de *saccharum* 2 pp., en el Valle del Cauto. *Temas Agrarios*, 6 (12), 21-30.

238. Rodríguez, F. J. (1981). *Estudio de la relación suelo-apero agrícola, en el trabajo con cuchillas de cultivador*. Tesis de Doctorado. Valencia, España, Universidad Politécnica de Valencia.
239. Rojo, C. (1999). ¿Qué es el laboreo de conservación? *Agrotécnica*, 2 (9), 10-12.
240. Ruiz, A. (2011). *Manejo Conservacionista y Sostenible del Cultivo de la Caña de Azúcar*. TCP/CUB/8822. La Habana, Cuba: FAO. Informe de consultoría en mecanización de prácticas de manejo del cultivo de la caña de azúcar: preparación de suelos.
241. Rösell, J. (1968). *Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación. p. 350.
242. Sánchez, R. (1996). *Dinámica y Mecánica de suelos*. Madrid, España: Ediciones Agrotécnicas S.L. pp. 13-94, 221-324.
243. Sánchez, V. R. (1995). *Dinámica y Mecánica de Suelos*. 1 ed. España: Agrotécnicas. p. 426.
244. Santana, M. y Fuentes, J. (1999). Preparación sustentable del suelo. *Cañaveral*, 4 (4), 7-11.
245. Santana, M., Fuentes, J., Benítez, L., Coca, J., Córdoba, R., Hernández, S., Arcia, J., Hernández, J., Hernández, L. y Socarrás, D. (1999). *Principios Básicos para la aplicación de tecnologías de preparación de suelos en el marco de una agricultura conservacionista y sostenible*. La Habana, Cuba: INICA-MINAZ-IIMA-CNCA. p. 77.
246. Santos, F. y García, R. (1997). *Fitotecnia de la caña: Postgrado*. Veracruz, México. p. 12.
247. Semendiaev, K. (1971). *Manual de Matemática para Ingenieros y Estudiantes*. Moscú, URSS. pp. 443-448.
248. Siemens, J. C., Weber, J. A. y Thornburn, T. H. (1965). Mechanics of soil al influenced by model tillage tools. *Transactions of the ASAE*, 4 (8), 1-7.
249. Silveira, J. (1999). *Máquinas agrícolas*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación. p. 420.

250. Simeonov, D. (1979). Agregación óptima con los tractores de uso general de gran concentración energética. *Técnica Agrícola*, 16 (3), 8-19.
251. Sineokov, G. y Panov, I. (1977). *Teoría y cálculo de máquinas de preparación de suelos*. Moscú, URSS: Mashinostroenie.
252. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. y Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, (79), 7-31.
253. Smith, D., Sims, B. y O'neil, D. (1994). *principios y prácticas de pruebas y evaluación de máquinas y equipos agrícolas*. Roma, Italia: Boletín de Servicio Agrícola de la FAO. p. 110. ISBN 1014-4226.
254. Söehne, W. (1956). Some basic consideration of soil mechanics as applied to agricultural engineering. *Grundlagen der landtechnik*, 2 (7), 11-27.
255. Sotto, B. P., Fuentes, N., Salvat, R., Brizuela, M., Lora, D. y Wong, M. (2006). *Maquinaria Agrícola. Planificación y Control*. La Habana, Cuba: IIMA, MINAGRI. ISBN 959-246-188-0.
256. Sotto, P., Fuentes, N., Salvat, R., Brizuela, M., Lora, D. y Wong, M. (2006). *Maquinaria Agrícola. Planificación y Control*. La Habana, Cuba: AGRINFOR. MINAGRI.
257. Sowers, G. B. y Sowers, F. B. (1979). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación. p. 677.
258. Statgraphics V. Statistical Graphics Corp. Copyright 1994-2001
259. Statgraphics Centurion XVI. Marca registrada por Statpoint Technologies 2011. www.statpoint.com.
260. Studdet, G. (2001). *Labranza conservacionista*. Estación Experimental Agropecuaria de Barcance, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

261. Suárez, J. (1991). *Instructivo para la Preparación de los Suelos en Caña de Azúcar*. Ciudad Habana, Cuba: INCA.
262. Swick, W. C. y Perumpral, J. V. (1985). A model for predicting soil-tool interaction. *J. Terramech*, 3 (25), 43-56.
263. Tapias, J., Salgot, M. y Casa, C. (2001). Utilidad de la teoría TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf. *Edafología* [en línea]. 8 (3). Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/revista/tomo8/alv8t.pdf> [Consulta: 10 diciembre 2001].
264. Terragona, A. (1985). Mecánica de suelos. Ediciones EIMAV. pp. 66-94. La Habana Cuba.
265. Tersagui, K. (1959). *Theoretical Soil Mechanics*. N.Y USA: J. Wiley & Sons Inc.
266. Tersaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphys ikaleischer Grundlage*. Viena, Austria: Deuticke.
267. Time, I. (1870). *Soprotivienie Metallov I Deieya Rezaniju*. San Petersburgo, Rusia: SP.
268. Torres, J. (1996). *Avances en el sistema de labranza reducida para la renovación de plantaciones de caña de azúcar: programa de agronomía*. Cenicaña no. 333. Cali, Colombia: Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 17 páginas.
269. Torres, J. y Villegas, F. (1998). Labranza reducida para la renovación de plantaciones de caña de azúcar. En: *Encuentro Nacional de labranza de Conservación. Memorias*. Bogotá, Colombia: Editora Guadalupe, LTDA, pp. 336-352.
270. Tresca, H. (1873). *Memorie sur le rabotage des metaux*. Bull. Soc. D. Encouragement Pourt. Paris, Francia: Industrie Nationale. pp. 585-685.
271. Upadnaya, S. (2006). *Dimensional Analysis and Similitude Applied to Soil-Machine*
272. *System*. St. Joseph -MI, USA: American Society of Agricultural Engineers. p. 19
273. Vadem, E. (1967). *Soil Dynamics in Tillage and Traction*. USA: Agricultural Research
274. Service Unite State Department of Agriculture.

275. Valdés, R. (1990). *Principales características técnicas de los tractores*. Trabajo de Diploma. La Habana, Cuba, Ministerio de Educación Superior.
276. Varela, J. (2002). La reestructuración es el camino adecuado. *Periódico Granma*, 24 de octubre. p. 8.
277. Vasilienko, J. F. (1956). *Problemas y teorías de las máquinas y mecanismos para la mecanización de la agricultura: problemas actuales de la teoría de máquinas y mecanismos*. Moscú, URSS: Editorial Promizdat.
278. Velarde, E. (1975). *Recomendaciones para el diseño de escarificadores pesados y perspectivas para la utilización de estos equipos*. Ciudad de la Habana, Cuba: DINAME.
279. Velarde, E. y Rodríguez, J. (2007). Sostenibilidad y paradigma de manejo agrícola cañero en el Siglo XX Cubano. En: *Congreso Internacional de las Ciencias Agropecuarias. AGROCIENCIAS 2007*. Cuba: UNAH, p. 10.
280. Velarde, E., Crespo, R., De, M. y Milanés, N. (2010). *Mecanización y Agricultura Sostenible en la Agricultura Cañera de México con énfasis en el Estado de Veracruz*. T.1 ed. Veracruz, México: Universidad Veracruzana (UV). p. 255.
281. Vidal, L., Gutiérrez, A., Velarde, E. y Betancourt, Y. (1998). La preparación localizada en los suelos arcillosos pesados. En: *XII Fórum de Ciencia y Técnica en la provincia de Villa Clara*. Cuba: UNAH, p. 10.
282. Villegas, R., Balmaceda, C., Ponce, D., Benítez, L. y Martín, R. (2001). *Informe del proyecto: Estudio y Evaluación y Monitoreo de Suelos para el desarrollo de tecnologías integrales y sostenibles de producción de la caña de azúcar*. La Habana, Cuba: UNAH.
283. Walker, J., Willgoose, G. y Kalma, D. (2004). In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal Hydrol*, 20 (3), 85-99.
284. Wang, J. y Gee-clough, D. (1991). Deformation and failure in wet clay soil. Simulation of Tine soil cutting. En: *IAMC conference*. Beijing, China: Proc, pp. 219-226.

285. Wang, J. y Gee-clough, D. (1993). Deformation and failure in wet clay soil: Part 2, soil bin experiment. *J Agric. Engineering Res*, 2 (54), 57-66.
286. Yong, R. y Hanna, A. (1977). Finite elements analysis of plane soil cutting. *Journal of Terramechanics*, 14 (3), 103-125.
287. Zinck, A. (2005). *Suelos, información y sociedad*. México: Instituto Nacional de Ecología.

ANEXOS

ANEXO A

Exigencias agrotécnicas de la preparación de suelos para la plantación de caña de azúcar.

Tabla 1. Aspectos principales de la NRAG- 006: 1978 “Caña de azúcar siembra”, en relación con la preparación de suelos para la siembra.(NRAG- 006, 1978).

No.	REQUISITOS PARA LA SIEMBRA
1	La siembra se efectuará manual o mecanizadamente, respondiendo al concepto de bloque como unidad mínima de producción.
2	Las siembras se efectuarán de 22 a 30 cm de profundidad como mínimo o hasta la profundidad máxima que permitan los suelos de poca capa arable.
3	La distancia entre hileras para áreas mecanizables y potencialmente mecanizables será de 160 ± 5 cm. En áreas no mecanizables se podrá llegar hasta 140 ± 5 cm.
4	La distancia de narigón será variable, en dependencia de la calidad de la semilla, tipo de siembra y demás condiciones existentes. En siembra manual y mecanizada , se admitirán desviaciones desde surco corrido hasta 0,60 m entre trozos(midiendo de centro a centro de los mismos).
5	El tape de la semilla se efectuará antes de las 24 h siguientes a su siembra, utilizando una lámina de suelo uniforme de 5 ± 1 cm.

Tabla 2. Aspectos principales de la NRAG- 047: 1978 “Preparación de suelos en caña de azúcar”.(NRAG- 047, 1978).

No.	PREPARACIÓN DE SUELOS EN CAÑA DE AZÚCAR
	Requisitos de la preparación de suelos
1	Las demoliciones se efectuarán en bloques de 40- 134 ha.
2	La preparación de tierra será uniforme y a una profundidad mínima de 22 cm. En suelos de poca capa arable se llegará hasta el subsuelo , con la mínima incorporación de este último al suelo, para no afectar su fertilidad.
3	El suelo quedará “mullido” y libre de “crudos”, por lo que no se admitirán agregados con diámetro superior a los 5 cm. El % de terrones que excedan los 5 cm no debe ser mayor del 15 % de la muestra.
4	En áreas de reposición, la rotura siempre se efectuará transversal a los surcos. Cuando exista mucho acamellonamiento, se procederá a dar un pase de grada en el mismo sentido de los surcos, con vista a facilitar la rotura y la uniformidad de la profundidad.
5	La preparación de tierra garantizará que no queden vivas residuos herbáceos y cepas.
6	El tiempo mínimo que se utilizará para el ciclo de preparación de tierra, desde la rotura hasta el alistamiento será el suficiente para garantizar la erradicación de malas hierbas y la destrucción de las cepas de caña.
7	El recruce se realizará en sentido transversal al cruce para garantizar un mayor índice de fraccionamiento del suelo.
8	En los suelos con enyerbamiento pesado será requisito indispensable efectuar la chapea y quema de los residuos para luego proceder a su rotura, con vista a garantizar una correcta preparación.
9	Se escogerá la variante de preparación más adecuada para cada caso, dentro de las establecidas, cumpliéndose las exigencias técnicas de cada variante.
No.	Calidad final de la preparación de suelos
1	Suelo preparado uniformemente.
2	Profundidad mínima: 22 cm
3	Suelo mullido y libre de crudos.
4	Los agregados de suelo con diámetro no superior a los 5 cm.
5	Suelo sin presencia de residuos herbáceos y cepas.
7	Suelo libre de obstáculos que pueda imposibilitar la mecanización.

Tabla 3. Resolución 32- 97 del MINAZ “Labores principales en el control de la calidad de la siembra”. (MINAZ, 1997).

No.	LABORES PRINCIPALES EN EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LA SIEMBRA
1	La preparación de suelo para la siembra de primavera comenzará desde que se retiren las lluvias en Nov. y la humedad del suelo permita el trabajo de los equipos en las áreas vacías, el resto de las áreas ocupadas que se van a demoler deben quedar libres antes del 28 de febrero y las labores de roturación deben concluir el 15 de marzo y el alistamiento el 30 de abril, según características del suelo.
2	La calidad del laboreo dependerá del uso de arados, sobre todo en áreas con hierbas establecidas, por lo que este apero está priorizado .
3	El uso de gradas pesadas con tractor Komatsu para iniciar la preparación se hará exclusivamente en suelos de mal drenaje y poca profundidad de la capa arable. En estos suelos es recomendable roturar con DT- 75 y A- 10 000, cruzando con Komatsu y grada pesada, lo que garantiza la calidad de la labor.
4	Laboreo localizado- mínimo en la preparación de suelos ondulados.
5	Las tecnologías de preparación rápida resultan muy aconsejables para suelos rojos y amarillos , así como aluviales, pardos y negros con topografía llana y con suficiente capa arable para ser labrados con subsoladores.

Tabla 4. Programa cañero. Normas generales para el fomento o renovación de plantaciones.(IIMA, 2006).

No.	NORMAS GENERALES PARA EL FOMENTO O RENOVACIÓN DE PLANTACIONES DE CAÑA DE AZÚCAR
1	Cada año se repondrá entre el 14 y el 20 % del área cañera.
2	En la preparación de suelos como regla general se empleará el laboreo mínimo en suelos ya nivelados.
3	Marco de siembra: 1,60 m entre surcos para áreas mecanizadas y 1,20- 1,14 m para áreas de corte manual.
4	La profundidad de los surcos será el máximo permitido por la capa arable del suelo y la calidad final de la preparación permitirá que esté totalmente libre de malezas y haya tierra suelta suficiente para hacer el tape.
5	Uniformidad en la distancia entre hilera.
6	El sistema de preparación utilizado debe permitir que la tierra esté lista para plantar en el momento en que se necesite.

Tabla 5. Orientaciones del INICA sobre preparación de suelos para la plantación de la caña de azúcar. (INICA, 2007).

No.	ORIENTACIONES DEL INICA SOBRE PREPARACIÓN DE SUELOS
1	Sus objetivos específicos , como conjunto de labores se traducen en la obtención de resultados cualitativos y cuantitativos: a). Elevada profundidad de rotura en concordancia con el tipo de suelos, pero siempre superior en cinco centímetros a la profundidad prevista para el surcado; b). <i>Suelo suficientemente mullido para que se logren más de 85 por ciento de partículas menores que 50 milímetros en el fondo y paredes de los surcos que se elaboren y la ausencia de cantidades significativas de partículas mayores que 150 milímetros, tanto en el surco como en la superficie del camellón</i> ; c). Microrelieve liso sin irregularidades que admitan el encharcamiento de agua; d). Camellón mullido suficientemente para posibilitar la apertura de zanjillos para el riego por gravedad o la formación de semicanteros en las áreas de mal drenaje y, e). Reducción de la población de malas hierbas.
2	Se define como labranza mínima el cumplimiento de los objetivos específicos de la preparación de suelos con una cantidad reducida de operaciones. Hasta fecha reciente la labranza mínima constituía una alternativa a la labranza tradicional, esta última con mayores exigencias respecto al mullido del suelo y al control de malezas y por tanto ejecutada con un número mayor de operaciones en mayor tiempo.
3	En «condiciones de secano», todas las tierras del plan de «siembra de primavera» deben estar alistadas antes del 30 de abril y para la campaña de «siembra de frío» 80 por ciento antes del 31 de agosto.
4	Los principales subsoladores con aletas utilizados en el país son el MAU 250 para tractor con tiro de 30 kN, que descepa y rotura con un ancho de trabajo de 1,6 metros y, cruza con un ancho de 2,5 metros; el SP320, que rotura y cruza con un ancho de 3,5 metros y el C101 para tractor con tiro de 14 kN, que realiza las operaciones en forma localizada trabajando una hilera .
5	El surcado es la operación que cierra el alistado para la plantación y debe realizarse en marcos de 1600 milímetros entre hileras en áreas mecanizables y marcos de 1200 a 1400 milímetros en áreas no mecanizables a la profundidad requerida en virtud de las limitaciones del suelo. Los surcadores podrán ser independientes o montados en los subsoladores (uno en C101, dos en MAU 250 y tres en SP320). Si los surcadores no subsolan debe cuidarse de que tengan ruedas de profundidad para que no compacten el fondo del terreno roturado. En todos los casos los surcadores deben estar provistos de marcadores adecuados al número de hileras que se surcan y al tractor que porta el equipo. Antes de surcar cada área, se marcará y trazará el surco de cabecera, que se plantará posteriormente.

Según orientaciones del MINAZ a través de Armando Álvarez, funcionario dirección de agrotécnica:

Álvarez, D., A. (1997). Para plantar bien la caña. Cañaveral, (Cuba) 3(2): 2, abril- Junio

- ❖ **Factores de mayor importancia en la siembra** (Exigencias agrotécnicas): Distancia entre surcos; trazado y orientación de los surcos, excepto en áreas onduladas, el trazado debe ser en dirección norte- sur.; dimensiones del surco a la máxima profundidad posible, preferiblemente 30 a 40 cm, medidos a partir del nivel original del suelo, ancho de boca 50 a 70 cm, base o plato 10 cm, preferiblemente en forma de U no de V; calidad del material de plantación (semilla); sistemas de siembra; densidad de población, cantidad de semilla; cantidad de yemas por trozo (trozos de no más de cinco canutos o yemas, equivalentes a 60 cm como longitud máxima; distribución de la semilla en el surco; tape de la caña en el surco (unos 5 cm y compactarlo, época más apropiada para plantar.

ANEXO B

a) Relación de transmisión para la velocidad del vehículo portaimplementos durante los ensayos

Considerando el diámetro del tambor donde se enrolla el cable que acciona sobre el vehículo portaimplementos y el propio diámetro del cable. El piñón (Z_1) colocado a la salida del motorreductor, está acoplado por medio de una cadena al piñón (Z_2) unido directamente al tambor donde se enrolla el cable de acero que mueve al vehículo portaimplementos. El cálculo de la transmisión entre piñones se establece mediante la relación:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

(Oberg y Jones, 1962; Norton ,1999; Figliola y Beasley, 2009).

b) Cálculo del sistema de fuerzas estáticas y dinámicas aplicadas sobre el suelo para lograr la compactación

Sistema de fuerzas estáticas. Se calculan las fuerzas actuantes representadas en la Figura B.1, a).

$$(+)\downarrow \Sigma F_y: F_2 + F_1 - F_3 - F_{y_0} = 0 \quad (1)$$

$$F_3 = F_2 + F_1 - F_{y_0} \quad (2)$$

$$\curvearrowright (+)\Sigma M_0: F_3 \cdot r_1 - F_1 \cdot r_1 - F_2 \cdot (r_2 - r_1) = 0 \quad (3)$$

$$F_3 = \frac{F_1 \cdot r + F_2 \cdot (r_2 + r_1)}{r_1} \quad (4)$$

Sustituyendo F_3 en (2)

$$F_{y_0} = F_2 + F_1 - F_3 \quad (5)$$

Sistema de fuerzas dinámicas:

$$\rightarrow \Sigma F_x: m \cdot \bar{v}_1 + F_{p_x} + F_{B_x} + F_r = m \cdot \bar{v}_2 \quad (6)$$

$$\uparrow \Sigma F_y : N_t - W - F_{Py} + F_{By} = 0 \quad (7)$$

$$\cup \Sigma \bar{I}\omega_1 - F_r \cdot r = \bar{I}\omega_2 \quad (8)$$

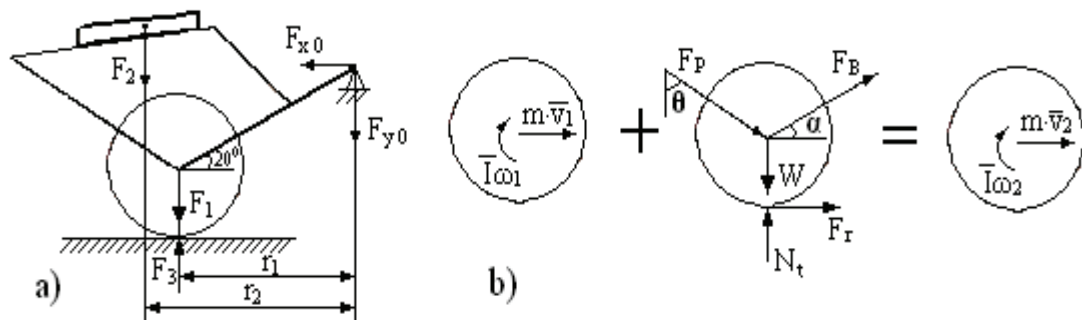


Figura B.1 Sistema de fuerzas que actúan en la compactación.

a) Diagrama de fuerzas estáticas; b) Diagrama de momento de inercia.

El ángulo $\alpha = 20^\circ$ formado entre la horizontal y el brazo de tracción del cilindro compactador, en la medida que el suelo se compacta va aumentando hasta alcanzar valores próximos a 30° . También, en dependencia de la humedad que posea el suelo en el momento de la compactación, requiere mayor o menor número de pases del cilindro compactador, por lo que es necesario ir controlando constantemente la compactación. Los valores de compactación por niveles se deben corresponder con los reportados en la literatura consultada y los medidos por el propio autor, con el mismo instrumento de medición empleado en el canal.

c) Valores de carga y descarga obtenidos durante la calibración y procesados en Statgraph versión 5

Tabla 1. Calibración de brazos extensométricos

STATGRAPHICS Plus - StatFolio sin Nombre - [Tabla de calibración de los cuatro brazos.sf3]					
Archivo Edición Gráficos Descripción Comparación Dependencia Avanzado SnapStats!! Ver Ventana Ayuda					
	Masa N	Deformación brazo 1	Deformación brazo 2	Deformación brazo 3	Deformación brazo 4
1	0	0	0	0	0
2	50	50	54,5	64,2	70
3	100	100	110	125,8	137,5
4	150	150	170	190	202,5
5	200	200	225	250	270
6	250	250	280	310	340
7	300	300	340	370,8	400
8					
9					
10					

ANEXO C

Características de instrumentos y materiales utilizados en la investigación.

a) Características técnicas del Reflectómetro de Dominio Magnético de Tiempo.

Tabla 1. Características técnicas del TDR

Especificaciones técnicas	
Rango	0-1,5 V cero para saturación
Precisión	$\pm 0,13\%$ de mV $\times \pm 1$ mV
Resolución	1 mV
Capacidad de memoria	500-1500 lecturas
Conexión	Conector tipo D 25 pines hembra para sensor y comunicación RS232
Condiciones ambientales	IP54 0-40°C
Tamaño	150x80x40 mm
Peso	450 g
Alimentación	Batería alcalina 9V tipo 6LR61
Duración de la batería	Aproximadamente 5000 lecturas

b) Características técnicas del compactómetro digital

Tabla 2. Características técnicas del compactómetro.

Fabricante	FIELDSCOUT
Modelo	SC 900 SN: 328
Medición de fuerza	Método extensométrico
Resolución	2,5 cm; 35 kPa
Máxima capacidad de carga	95 kg
Rango	0... 7000 kPa
Apreciación	$\pm 0,103$ kPa
Rango	0 ... 45 cm
Punta cónica	\varnothing 12,83 mm
	$\leq 30^\circ$
Medición de penetración	Sensores ultrasónicos
Velocidad máxima de penetración	182 cm/min
Rango	2,5 ... 45 cm
Apreciación	$\pm 1,25$ cm
Registro	En memoria
Salidas	Lectura en Pantalla LCD de dos líneas, 16 caracteres Por cable a la computadora
Capacidad de registro de datos	772 medidas sin GPS 579 medidas con GPS
Tipo de alimentación	Dos baterías alcalinas tipo AA
Peso	1,25 kg

c) Características de los extensómetros de resistencia eléctrica utilizados

Tabla 3. Características de los extensómetros utilizados en la construcción de los brazos dinamométricos.

Fabricante	KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD
Modelo	KFC-5-C1-11
Resistencia del extensómetro	120.0 Ω \pm 0.3
Compensación térmica	Acero
Largo	5 mm
Factor	2.11 \pm 1%
Coeficiente de expansión térmica	10.8 ppm / °C
Cambio del factor con la temperatura	0.015 % / °C
Deriva térmica	\pm 1.8 $\mu\epsilon$ / °C
Cantidad por paquete	10 unidades
Lote	Y1665-2916

d) Características del amplificador de deformaciones estáticas

Tabla 4. Características del amplificador de deformaciones estáticas.

Fabricante	KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENT, LTD
Modelo	SM-60
Puente de resistencia compatible	60... 500 Ω
Voltaje el puente	1,6 VCD
Rango de medición	-29 500... 30 500 $\times 10^{-6}$ strain (Deformación, en Español) Lectura mínima de 5×10^{-6} strain ($\mu\epsilon$)
Apreciación en la escala	$\pm 500 \mu\epsilon$, ancho de la escala 123mm, lectura mínima 10 $\mu\epsilon$
Precisión	10 $\mu\epsilon$, 1 % de cada rango
Método de ajuste del balance	Manual por pasos del selector de escala
Sensibilidad	0.2 V con Resistencia de carga de 5 k Ω
10 $\times 10^{-6}$ strain	3 mA con Resistencia de carga de 30 Ω
Factor del extensómetro	Fijado en 2.00
Temperatura de operación	-10° ... 50° C
Humedad de operación	85 % HR o menor
Excesiva señal de entrada	Indicador al extremo de la escala
Señal simultánea	"CAL" para todos los canales
Fuente de alimentación	9 VCD seis baterías de 1,5 V, tipo UM-1
Dimensiones	Ancho 200 Alto 111 Profundidad 250 mm
Masa	4,6 kg

NOTA: Éste instrumento tiene la posibilidad de ampliar la cantidad de puntos de medición, mediante la conexión de la caja de conmutación y balance SR-24, del mismo fabricante.

e) Características del amplificador de deformaciones dinámicas

Tabla 5. Características del amplificador de deformaciones dinámicas DPM 602A

Fabricante	KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENT, LTD
Modelo	DPM 602A
Canales de medición	seis
Puente de resistencia compatible	60... 1000 Ω
Voltaje el puente	0,5-2 V, conmutable mediante interruptor
Rango de ajuste de balance	R: $\pm 1\%$ ($\pm 5000 \mu\epsilon$, C: 2000 pF
Métodos de ajuste del balance	R: Manual (Potenciómetro de 10 vueltas). C: Automático
Sensibilidad $\mu\epsilon$	0,2 V con Resistencia de carga de 5 k Ω 3 mA con Resistencia de carga de 30 Ω
Salidas	Voltaje: ± 5 V, ± 5 mA. Corriente: ± 5 V, ± 30 mA
No linealidad	$\pm 0,1\%$ FS (Plena escala)
Impedancia de salida	10 Ω
Factor del extensómetro	Fijado en 2,0
Señal de calibración	$\pm 1... 9999 \mu\epsilon$. Interruptor de cuatro dígitos. Precisión: $\pm(0,5\% + 0,5\% \mu\epsilon)$
Ajuste de la sensibilidad	8 pasos: (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100) $\times 100 \mu\epsilon$, apagado. Precisión: $\pm 0,5\%$
Ajuste de la salida dual	Sensibilidad: 1... 1/100. Aproximación al punto cero: ± 30 mV
Respuesta de frecuencia	DC - 5 kHz, con desviación $\pm 10\%$
Filtro pasabaja	10, 30, 100, 300, 1kHz, F sobre -12 dB/octava
Relación señal ruido S/N	En el rango de 100 $\mu\epsilon$: 46 dB _{pp} . Rangos mayores de 100 $\mu\epsilon$: 52 dB _{pp}
Estabilidad de corrimiento del punto cero:	$\pm 0,1 \times \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$. $\pm 0,5 \mu\epsilon/24$ hora. $\pm 0,05\%$ plena escala / $\mu\epsilon$ $\pm 10\%$ por fluctuación del voltaje
Estabilidad de la sensibilidad	$\pm 0,05\% / ^{\circ}\text{C}$. $\pm 0,3\% / 24$ hora. $\pm 0,05\%$ por fluctuación del voltaje
Resistencia de aislamiento	Entre puentes de medición 250 VAC. Entre fuente y chasis 1000 VAC
Temperatura de operación	-10°... 50° C
Humedad de operación	85 % HR o menor
Excesiva señal de entrada	Indicador lumínico "OVER" parpadeando
Señal simultánea	"CAL" para todos los canales
Fuente de alimentación	220 V 6 VA AC 10,5... 15 V DC 2,2 A
Dimensiones	Ancho 340 Alto 150 Profundidad 270 mm
Masa	12 kg

f) Características del conversor analógico-digital utilizado

Tabla 6. Características del conversor A/D

Fabricante	Advantech
Modelo	PCL-818
Canales	16 terminales simples 8 diferenciales
Selección	Mediante interruptor
Resolución	Aproximaciones sucesivas en 12 bits
Rangos	Bipolar: $\pm 0.625V$, $\pm 1.25V$, $\pm 2.5V$, ± 5 , $\pm 10V$ Unipolar: 0-1,25V, 0-2,5V, 0-5V, 0-10V
Precisión	$\pm 0,01$ % del valor medido, ± 1 bit
Linealidad	Salida digital $\pm 0,5$ bit
Tiempo de muestreo	5 μs
Frecuencia de conversión	100 kHz Max
Transferencia de datos	Programable, interruptor manual o programable
Control de operación	Mediante programa
Base de tiempo	Conmutable por interruptor 10 MHz o 1MHz
Salida digital	16 canales de 16 bits
Voltaje de salida	Nivel TTL, bajo 8 mA a 0,5 V Max
Base I/O	16 direcciones consecutivas, ajustado a HEX 300
Temperatura de operación	0 $\pm 50^{\circ} C$

g) Certificado de calibración de la báscula GEDRICH

PESAJE INDUSTRIAL
LABORATORIO DE CALIBRACION
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN



Certificado No. 108 No de Serie: 000761

Denominación: Just Pagan S/A Modelo: none

Fabricante: METROMPO Clase: III

Rango de Medición: 0-500K

Perteneciente a: GEDRICH
(Nombre de la entidad y dirección)

Los patrones utilizados son trazables a los de servicio nacional de Metrología, los cuales mantienen las unidades de medidas de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades (SI).
Mediante la intercomparación o calibración periódicamente con patrones nacionales e internacionales.

Patrones utilizados: 10-20K

Se certifica que el instrumento se encuentra:
(☒) dentro de los límites (☐) Fuera de los límites

Establecido en el documento: REDC

Fecha de calibración: 23/3/12

Calibró: [Firma] Aprobó: [Firma]

Firma: [Firma] Firma: [Firma]

Nombre: [Nombre] Nombre: [Nombre]

Cargo: [Cargo] Cargo: [Cargo]

VES PAI
23/3/12