

**Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas**  
**Facultad de Ciencias Agropecuarias**  
**Departamento de Ingeniería Agrícola**

---



**Trabajo de Diploma**

---

**DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL  
PERFIL DEL SUELO MEDIANTE EL MÉTODO  
DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES**

**AUTOR: David Cervantes Gómez**

**TUTOR: Ing. Maykel Cruz Díaz**

**Santa Clara-2013**

**»Pensamiento.**



*“Ahí está el futuro, ahí está el más grande potencial para el desarrollo del país, a través de la agricultura; y no sólo para producir alimentos, sino para producir —y lo digo con Kléber— dignidad; y para producir —y lo digo con el Che— el hombre nuevo, la mujer nueva, la sociedad nueva”.*



**Hugo Rafael Chávez Frías**

**»Dedicatoria.**



*A mi madre, que me trajo a este mundo para poder llegar hasta aquí y seguir mañana hacia adelante.*

*A mi padre, que con su ejemplo y rigor me ha guiado siempre por el buen camino.*

*A mi familia, mis amigos y aquellos que siempre han estado cerca de mí para ayudarme.*

*A mi novia, para que valga la pena tanta comprensión y ayuda de su parte.*

**»Agradecimientos.**

---

*Primeramente a la Revolución por permitirme una Educación sana e íntegra.*

*Especialmente a mi tutor Ing. Maykel Cruz Díaz, al Dr.C Alberto Taboada Crispi y al Dr.C Miguel Herrera Suárez por haberme guiado y ayudado en la realización de esta gran tarea.*

*Quiero agradecer a todos aquellos que de una forma u otra han colaborado con la realización de este trabajo.*

*A mis padres y abuelos por saberme guiar por el camino correcto y darme tanto amor y dedicación durante toda mi vida.*

*A todos los trabajadores de las UEB y UBPC que me atendieron e hicieron posible el desarrollo de este trabajo.*

*A mi novia; por vivir los momentos más difíciles del desarrollo de esta tesis.*

*A mis amigos que siempre me apoyaron en mis estudios, en especial a Daniel Macías Fléites que me ayudó con la realización de este trabajo.*

*A mi suegra que me ha proporcionado su ayuda durante gran parte de mi carrera.*

*A la familia Torres que siempre me brindó ayuda en todos estos años.*

*Al colectivo de profesores que me ha acompañado en el transcurso de la carrera.*

*De manera general a todas aquellas personas que me ayudaron en el desarrollo, y demás fases del presente Trabajo de Diploma.*

*A todos muchas gracias.*

**»Resumen.**



## **RESUMEN**

El presente trabajo se fundamenta en la determinación de la geometría del perfil del suelo aplicando el método de tratamiento de imágenes; por lo cual fue necesario realizar una búsqueda en la bibliografía relacionada con el tema objeto de estudio que permitió abundar en el tema para poder determinar las metodologías a emplear para la toma de los datos.

Los resultados finales posibilitaron la construcción de un perfilómetro de varillas tradicional similar al desarrollado por (Wagner y Yiming, 1991) que permitió realizar una serie de mediciones de la geometría del perfil del suelo en los campos de caña y compararlas con el método de tratamiento de imágenes para demostrar que se obtiene la geometría del perfil del suelo aplicando el método que se propone en este trabajo. Se logró desarrollar un método de tratamiento de imágenes para determinar la geometría del perfil del suelo sin necesidad de aplicar los costosos métodos laser desarrollados por otros autores que se dificultan mucho en nuestro país. Finalmente los resultados evidencian la factibilidad técnica de la utilización de este método así como la efectividad del mismo.

**»Abstract.**



## ABSTRACT

This research is based on the determination of the geometry of the soil profile using the image processing method. It was necessary to carry out a search in the literature on the topic under study that allowed to deepen on the subject in order to determine methodologies to be used for making the data.

The final results gave us the possibility to construct a traditional rod profilometer similar to that developed by (Wagner and Yiming, 1991) which allowed to begin a series of measurements of the geometry of the soil profile in the cane fields and compared with the method of treatment images to show that you get the soil profile geometry using the method proposed in this paper. It was possible to develop an image processing method to determine the geometry of the soil profile without the need of costly laser methods developed by other authors that make it very difficult in our country. Finally, the results show the technical feasibility of using this method and its effectiveness.

## ***»Tabla de Contenidos.***

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	1
I. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	5
1.1 Importancia de la determinación de la geometría del perfil del suelo. ...	5
1.2 Equipamiento y métodos empleados en la medición de la rugosidad del suelo. ....	7
1.2.1 Métodos más empleados en la determinación de la geometría superficial del perfil del suelo. ....	8
1.3 Utilización del método de tratamiento de imágenes en la agricultura para determinar características del suelo. ....	18
1.3.1. Evolución del procesamiento de imágenes digitales.....	18
1.3.2. Aplicación del tratamiento de imágenes en la Agricultura. ....	21
II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
2.1 Metodología para la caracterización del área experimental.....	26
2.2 Metodología para la determinación de la geometría del perfil del suelo. .	27
2.2.1 Metodología para la construcción de un perfilómetro de varillas.....	28
2.2.2 Metodología para la obtención de la geometría del perfil del suelo aplicando el método de tratamiento de imágenes. ....	30
2.2.3. Metodología para el procesamiento de las imágenes tomadas.....	31
2.3 Metodología para el procesamiento estadístico de los resultados. ....	33
III. RESULTADOS Y DISCUSION.....	34
3.1. Resultados de la caracterización del área experimental.....	34
3.2. Resultados del diseño y construcción del Perfilómetro.....	34
3.3. Resultados de la medición del perfil del suelo aplicando el método de tratamiento de imágenes. ....	35
3.4. Resultados del análisis estadístico de los resultados de ambos métodos.....	39
CONCLUSIONES .....	43
RECOMENDACIONES.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	45

## ***»Introducción.***

---

---

## INTRODUCCION

El perfil del suelo se define como la desviación típica de las elevaciones superficiales del suelo, considerando los cambios debidos a la pendiente del terreno, y las huellas que puedan dejar los neumáticos de las máquinas y ciertos implementos de laboreo (Porta *et al.*, 2003).

La importancia de conocer la geometría del perfil del suelo reside en que es uno de los parámetros que dio la posibilidad de determinar la forma que toma el suelo luego que sobre él actúa la fuerza de los neumáticos u órganos de trabajo de las diferentes máquinas agrícolas durante el laboreo, alterando su estructura, lo que se puede entender como deformación de la superficie, también la geometría del perfil del suelo se puede modificar por la acción directa del agua o el viento en la superficie, modificando esta estructura lo que se conoce como (erosión hídrica) y (erosión eólica) (García, 2006).

De esta forma, la medición de esta geometría del suelo es trascendental para entender los procesos a los que se ven sometidos los mismos. Los mayores retos para llevar a cabo dicha medición residen en las dificultades para evitar la interacción con el terreno, la sensibilidad de los instrumentos de medida en las condiciones de campo y las escalas milimétricas que son necesarias. La medición se dificulta ya que es importante que la tecnología empleada sea fiable y se represente con la mayor veracidad posible, cuyos costes se incrementan considerablemente a medida que las tecnologías emergentes aportan resultados que se obtienen más rápidamente y de forma más cómoda.

El interés en el desarrollo de una tecnología para la medición del perfil de los suelos tiene su origen en la problemática de degradación de los suelos y en la escasez de inversiones que se destinan a este tipo de mediciones así como para la investigación previa de implementos de labranza.

Los métodos de punto de partida que se dejan ver como más competentes para la toma de datos son los de técnicas sin contacto de tipo láser desarrollada por (Huang y Bradford, 1990; Huang, 1998) y posteriormente perfeccionada por (Darboux y Huang, 2003) y complementada con el método de fotogrametría de Merel y Farres (1998) sin descartar los métodos tradicionales de varillas, con contacto desarrollados por (Wagner y Yiming, 1991).

Por lo tanto, para la realización del presente trabajo, la primera etapa que se llevó a cabo fue el análisis de las metodologías expresadas por otros autores sobre el tema, con el objeto de evaluar el método de campo más idóneo para las diferentes aplicaciones, y al mismo tiempo disminuir los costes, con el fin de adecuar el estudio del parámetro sin un equipo sobradamente sofisticado, y por tanto, costoso. La posterior aplicación del método y la interpretación de los resultados buscaron obtener datos y resultados fiables durante la experimentación. Su empleo depende en gran medida de las condiciones específicas de campo, dependiendo de las zonas de medición. En este caso en concreto, donde el problema de degradación de los suelos está principalmente relacionado con su compactación por el paso de la maquinaria, es significativa la medición del perfil del suelo teniendo en cuenta que suelen ser terrenos expuestos a gran luminosidad, con lo que ciertos métodos presentan el inconveniente de la visibilidad del objetivo a medir. Dichas

dificultades, hicieron que implementaran a lo largo del periodo de experimentación el basado en la metodología tradicional de varillas con la ayuda de la digitalización de imágenes en horarios cerca del meridiano para evitar la distorsión por la sombra.

De esta manera, se ha implementado un nuevo método de análisis basado en la medición por medio de fotos digitales, de la forma del suelo. Este método se ha contrastado con el tradicional de varillas y evaluado en diferentes tipos de suelo de la provincia.

La utilización de este último método se llevó a cabo con el objeto de facilitar y agilizar las medidas del perfil del suelo en el campo, ya que el método de varillas es laborioso y requiere gran cantidad de tiempo.

Por todo lo antes mencionado nuestro, **Objeto de estudio** se centra en los métodos para determinar la geometría del perfil del suelo, y el **problema científico** parte de como determinar el perfil de los suelos en los campos de caña que serán demolidos. Para lo cual se diseñó la siguiente **Hipótesis**: La aplicación de los métodos de tratamiento de imágenes permitirá determinar la geometría del perfil de los suelos agrícolas para la previa investigación y evaluación de máquinas agrícolas.

Por lo tanto, a partir de los métodos estudiados, nos propusimos el siguiente **objetivo general**: Determinar la geometría del perfil de los suelos utilizando el método de tratamiento de imágenes y como **objetivos específicos**:

- Diseñar y construir un perfilómetro tradicional de varillas.
- Determinar la geometría del perfil del suelo con el perfilómetro y con el tratamiento de imágenes.

- Comparar los métodos de obtención del perfil del suelo con el perfilómetro de varillas y con el tratamiento de imágenes en cuanto a la confiabilidad de las mediciones.

**»Capítulo I**  
***Revisión Bibliográfica.***

---

---

## I. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 1.1 Importancia de la determinación de la geometría del perfil del suelo.

La geometría superficial del perfil del suelo, en un principio, fue descrito cualitativamente, lo cual dificultó su incorporación a modelos matemáticos que pudieran predecir otros parámetros, como son la infiltración o el almacenamiento superficial de agua. El principal inconveniente estaba fundamentado en la dificultad de obtención de datos reales a nivel de geometría del perfil, debido al escaso desarrollo de los métodos de toma de datos disponibles (Planchon *et al.*, 2000)

Allmaras *et al.* (1966) definieron este fenómeno al azar, como la desviación estándar de las elevaciones una vez eliminados los efectos de la pendiente y el laboreo y, eliminados el 10% de las medidas más altas y bajas. El equipo de Allmaras utilizó una transformación logarítmica de los datos de partida que posteriormente fue rebatida por (Currence y Lovely, 1970). Además, tal y como lo expusieron (Zobeck y Onstad, 1987) es a veces difícil determinar si todos los detalles del procedimiento metodológico publicado por el equipo de (Allmaras *et al.*, 1966) realmente se siguieron en su estudio, ya que no dieron ninguna indicación de cómo procedieron a eliminar los efectos de la labranza.

El interés en medir este tipo de geometría radica en la influencia que tiene en los procesos erosivos que se producen en la superficie, ya que tanto la erosión eólica como la hídrica se producen, principalmente, en escala de milímetros. Por esta razón, los procesos y los cambios en la geometría del suelo, son los principales factores para determinar la influencia de la remoción y transporte del suelo, así como su degradación. Otros procesos que afectan

la geometría del suelo son la infiltración, la retención de agua, el intercambio gaseoso, la evaporación y el flujo de calor (Huang, 1998).

Goldenfeld y Kadanoff (1999) definieron la erosión hídrica y eólica del suelo como procesos naturales, de tipo complejo-caótico. y (Merrill *et al.*, 2001) completaron dicha definición estableciendo que la geometría del suelo, actúa en una escala menor como un factor de erosionabilidad, determinando la resistencia o vulnerabilidad a la erosión por parte de un suelo determinado. En una escala continua, pero mayor, la geometría del perfil del suelo se vuelve un factor erosivo, estructuralmente a través de la energía erosiva del viento, el agua o el tránsito de las máquinas y animales por su superficie.

Darboux y Huang (2005) demostraron en sus estudios que la geometría o rugosidad del suelo incrementa la conservación del suelo y el agua durante los periodos de lluvia debido a que las depresiones superficiales retardan los episodios de escorrentía, sin embargo, una vez que dichas depresiones se saturan de agua la escorrentía se incrementa en los suelos a medida que aumenta su rugosidad.

La geometría del perfil del suelo, puede llegar a cambiar rápidamente, debido a procesos erosivos. De esta forma, en los suelos agrícolas esta superficie se altera debido a las operaciones de laboreo, el tránsito del ganado y las máquinas agrícolas, la compactación y la erosión y deposición de la lluvia y el viento. Los ciclos de humedad y sequía y de congelación y descongelación representan factores que pueden también alterar dicha propiedad (Zobeck y Onstad, 1987; Pardini, 2003; García, 2006)

Por lo tanto, la mayoría de los factores relacionados con la erosión deben estudiarse al nivel de geometría del perfil para entender su influencia y cambios que se producen en la topografía, el paisaje y la influencia del clima (Pardini, 2003)

## **1.2 Equipamiento y métodos empleados en la medición de la rugosidad del suelo.**

Existen varios métodos de cuantificación de la rugosidad superficial o perfil del suelo, los cuales dependen de la escala utilizada. Los más utilizados siguen siendo el índice de rugosidad de (Allmaras *et al.*, 1966) y, el desarrollado por (Huang, 1998), en su versión original o con posteriores modificaciones. También han sido utilizados varios métodos basados en procedimientos geoestadísticos (Linden y Van Doren, 1986) e índices de rugosidad empíricos (Lersch *et al.*, 1986) para describir la geometría superficial del suelo y su evolución ante los efectos de la lluvia y otros factores. Dichos índices han sido fundamentalmente utilizados para expresar de forma cuantitativa y sintética la organización compleja de la superficie del suelo ya que dan información sobre la asociación de diferentes elementos.(García, 2006)

Las técnicas más utilizadas para medir la topografía superficial del suelo, eran técnicas de contacto, tediosas y que alteraban el muestreo, principalmente la técnica de varillas, en el que una varilla o una red de varillas son utilizadas sobre la superficie, y su posición, así como los cambios son registrados, de forma electrónica o fotográfica y digitalizada más tarde (Burkwell *et al.*, 1963; Podmore y Huggins, 1980; Radke y Otterby, 1981; Römken *et al.*, 1986; García, 2006). Su empleo depende del objetivo perseguido por la investigación y el trabajo a desarrollar. En general la adquisición de datos de

geometría del perfil se hace normalmente a través de la estérefotografía (Wagner, 1995; Zribi *et al.*, 2000) métodos de contacto (Kuipers, 1957; Whalley y Rea, 1994; Merrill *et al.*, 2001) o de escáner basados en tecnología láser (Darboux y Huang, 2003; García, 2006)

### **1.2.1 Métodos más empleados en la determinación de la geometría superficial del perfil del suelo.**

#### **Perfilómetro de varillas**

La metodología basada en la realización de perfiles con varillas ha sido la primera que se desarrolló para la toma de datos sobre el relieve y geometría del perfil superficial del suelo y, por tanto, la más utilizada a lo largo de las investigaciones que se han llevado a cabo y la más ampliamente validada en campo (Kuipers, 1957; Whalley y Rea, 1994; García, 2006).

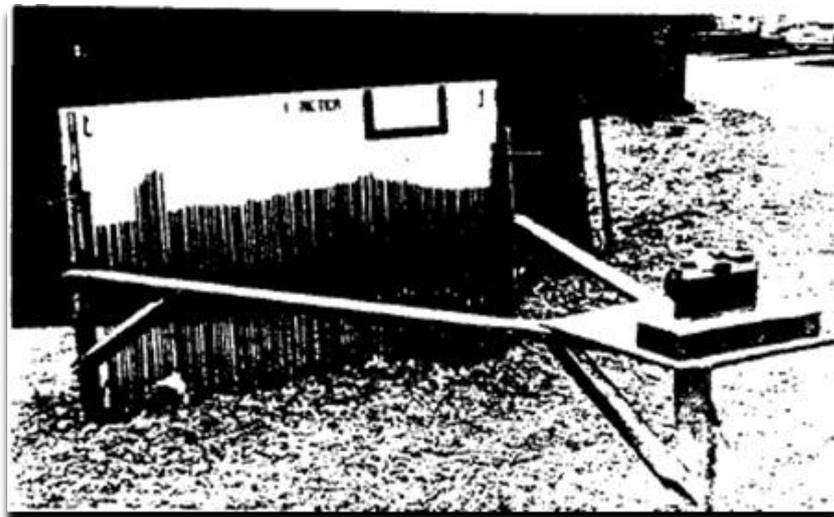
Los primeros métodos para obtener datos por este sistema se desarrollaron en los años 60 con la utilización de perfilómetros (Burkwell *et al.*, 1963; Allmaras *et al.*, 1966; Currence y Lovely, 1970; Steichen, 1984; García, 2006).

La metodología se basa en una varilla, o una serie de varillas móviles, que pueden desplazarse verticalmente, que se adaptan a una estructura, y que se elevan de acuerdo a las diferentes alturas del suelo, al apoyarlas en la superficie a medir. Moviendo la estructura a intervalos regulares puede recolectarse una superficie en distancias de ambos ejes conocidas.

La toma de datos de las diferentes alturas se lleva a cabo con el contraste que se obtiene con un fondo calibrado o una referencia dentro de la propia estructura. Entre las aplicaciones de calibración que se pueden hallar en la

literatura están la utilización de una superficie de fondo milimetrada (Kuipers, 1957) o de imágenes digitalizadas (Wagner y Yiming, 1991; García, 2006).

Los aparatos más utilizados se basan en el desarrollado por (Wagner y Yiming, 1991) (Figura 1.1), en el que una hilera de varillas de peso ligero se disponen en un instrumento de forma que pueden desplazarse. De esta forma, cuando el aparato se deja en la superficie del terreno, las varillas se desplazan de acuerdo a la geometría superficial del suelo.



**Figura 1.1 Perfilómetro de varillas desarrollado por Wagner y Yiming (1991).**

Las diferentes alturas se obtienen a través de las imágenes recogidas por una cámara que por triangulación recoge las diferencias de altura. La calibración se realiza de acuerdo a las distancias a las marcas de referencia del marco de la estructura.

Esta metodología representa la forma más sencilla y probada de registrar la rugosidad superficial o perfil del suelo, igualmente, no presenta el inconveniente asociado al transporte y daños de las tecnologías más avanzadas utilizadas en otros métodos de más reciente desarrollo.

Sin embargo, esta interfiere con la superficie de medición porque las varillas, y parte de la estructura, entran en contacto con la superficie del suelo durante las mediciones, alterando la superficie que se ha registrado. De esta forma, la repetición de las mediciones no puede llevarse a cabo, ya que es imposible dejar la superficie medida con la misma rugosidad inicial, debido al peso del instrumento y a la manipulación por parte del operador(García, 2006).

### **Fotogramétricos**

Cada vez más se trabaja en métodos de simplificación de toma de datos, de esta forma uno de los métodos más prometedores es el de análisis de imágenes de relieves digitales. Merel y Farres (1998) demostraron en sus estudios la validez de la fotografía analítica para cuantificar los cambios de la geometría del perfil del suelo en parcelas iguales o menores de 1 m<sup>2</sup>.

Una de las ventajas de la técnica fotogramétrica, en comparación con la técnica de varillas es que las fotografías de la superficie suministran un registro continuo del estado de la rugosidad superficial del suelo en un momento determinado, que puede ser re-evaluado posteriormente(García, 2006).

Martin (1980) utilizó esta técnica para generar un índice de rugosidad superficial basado en el porcentaje de volumen de depresión de almacenamiento. Sin embargo, este trabajo se basó en resultados obtenidos en métodos de laboratorio a partir de un simple evento de tormenta.

Bruneau y Gascuel-Odoux (1990) utilizaron la fotogrametría terrestre para

modelar las direcciones de flujo superficial que se hallaban en un campo de maíz. Los datos de medida se tomaron en la forma de coordenadas x, y, z y se utilizaron para generar modelos digitalizados del terreno a partir de los cuales eran capaces de predecir el flujo superficial. Estos datos no se utilizaron para definir los cambios en la rugosidad superficial o microformas(García, 2006).

Bruneau y Gascuel-Odoux (1990) llevaron a cabo una simple medida sobre la base de interpretación de imágenes, de esta forma no llegaron a examinar los modelos de los cambios de superficie.

Las técnicas de análisis de imágenes permiten almacenar el estado de la geometría superficial del suelo y su evolución a través del análisis de las imágenes de una localización específica(García, 2006).

Los equipos de fotografía modernos, con mayor resolución, y los equipos informáticos, con mayor capacidad de interpretación y almacenamiento de imágenes, permiten en la actualidad llevar a cabo la interpretación de las elevaciones de la superficie del suelo. La orientación espacial es posible con estos equipos en el plano x/y, así como el cálculo de la elevación, a través de la interpretación y calibración de la imagen.

Una de las ventajas que presenta este método es la posibilidad de estudiar las características de la superficie que no son morfológicas, distinguiendo las variaciones a pequeña y gran escala de los datos en las coordenadas cartesianas x, y, z. Por esta razón, una de las mayores aplicaciones de la fotografía analítica en el estudio del suelo ha sido el estudio y la

identificación de las propiedades geológicas, así como su evolución morfológica en el tiempo. Asimismo, la geometría del perfil superficial puede también ser digitalizado fotogramétricamente analizando un estéreo par de la imagen de la superficie (Welch et al., 1984; García, 2006). Estas técnicas producen elevaciones digitalizadas en puntos en rejilla en un rango de separación desde 5 a 50 mm. Su principal utilidad es cuantificar características de la superficie a grandes escalas como pueden ser las marcas de labranza y maquinarias o la rugosidad direccional y geometría de canales concentrados. Esta técnica ha sido posteriormente aplicada para la investigación del desarrollo de la superficie del suelo en varios estudios, (Martin, 1980; Bruneau y Gascuel-Oudou, 1990; Gascuel-Oudou *et al.*, 1991; Helming *et al.*, 1993; García, 2006) aunque en ellos se ha ignorado la posibilidad de combinar la información de la rugosidad del terreno con atributos no morfológicos de dicha superficie los cuales también se pueden obtener a partir de las mismas fotografías.

### **Rugosímetro láser**

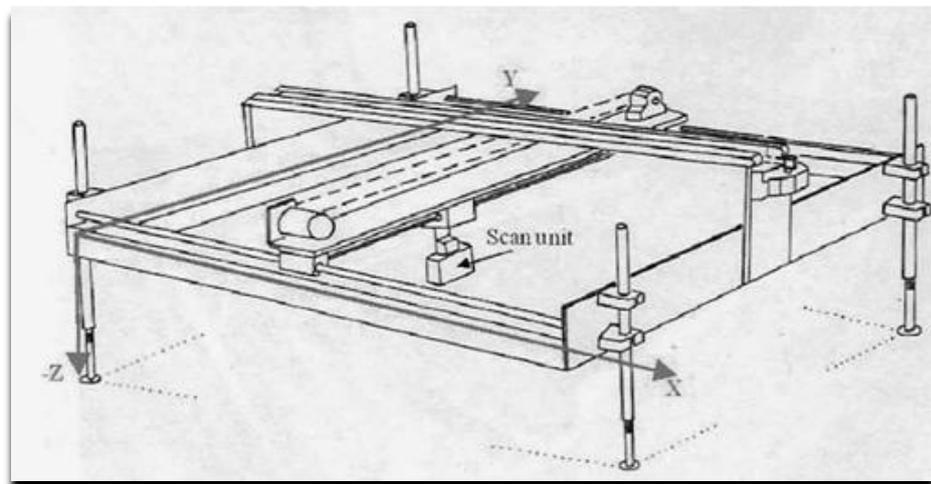
Oh y Stiles (1993) compararon el método láser sin contacto desarrollado por (Huang y Bradford, 1990) con el método clásico de varillas (sobre la base de técnicas de pintura y papel) para medir la rugosidad de varias parcelas e interpretar los datos con relación al contenido de humedad del suelo. Los resultados obtenidos fueron analizados para desarrollar los índices de rugosidad de los diferentes suelos, cuyas propiedades y cultivos eran diferentes. Para la obtención de los índices se utilizaron métodos estadísticos basados en cálculo de varianza (RMS) y funciones de

correlación, los cuales eran característicos para cada caso en particular y dependían de la evolución de los diferentes cultivos y suelos. Por lo tanto, no se pudo establecer una comparación entre métodos, aunque la diferencia principal radicaba en el coste de ambos métodos, mucho mayores en el método de láser, así como la mayor sensibilidad a la luz (García, 2006).

De acuerdo a los trabajos de (Huang, 1998) para poder considerar el geometría del perfil del suelo, se necesita trabajar en una escala de agregados de centímetros a milímetros, con lo cual las superficies necesitan ser digitalizadas en una separación entre puntos igual o menor a 1 mm. Con el desarrollo de los transductores ópticos sin contacto a finales de los años ochenta la adquisición de datos de geometría del perfil se convirtió en una realidad. En general, dichos transductores eléctricos utilizan una fuente de luz, la más utilizada es un rayo de luz láser de bajo poder de Helio-Neon, para proyectar un punto de luz sobre la superficie y un sistema sensible de imágenes opto-electrónico para detectar la posición del haz de luz reflejado. Dichos transductores presentaban el problema de utilizar un perfilador de superficie que trabajaba en una dimensión. Las variaciones entre los diferentes aparatos se basaban en la fuente de luz, la geometría óptica, el detector y el circuito que procesaba la señal o algoritmo (Huang *et al.*, 1988; Rice *et al.*, 1988; Destain *et al.*, 1989; Bertuzzi *et al.*, 1990; Huang y Bradford, 1990; García, 2006) basándose en el hecho de que el geometría del perfil superficial del suelo no es estacionario y que sus características varían con la posición, establecieron que la rugosidad superficial del suelo depende de la escala de medida. Por lo tanto, para

poder definir un proceso al azar en función de dos dimensiones, se necesita una estructura de correlación espacial, es decir, cualquier modelo utilizado para su cuantificación debe reflejar las características de dependencia de la escala. De esta forma, los autores declararon incompetentes los modelos estadísticos para explicar la topografía de superficie e introdujeron la idea del análisis a través de modelos fractales. A partir de la idea bidimensional de los datos de medida de rugosidad, (Huang y Bradford, 1990) desarrollaron un sistema digital capaz de producir múltiples perfiles de superficie en espacios muy próximos para cuantificar la geometría del perfil. A partir del transductor óptico de (Huang *et al.*, 1988; Huang y Bradford, 1990) desarrollaron un escáner portátil capaz de digitalizar la geometría del perfil del suelo, en dos dimensiones (2-D), en una rejilla de 0,5 mm de separación de puntos con una resolución de elevación de 0,1 a 0,3 mm. El escáner utilizaba un láser de 2 mW HeNe como fuente de luz y un fotodiodo de 512 como antena direccional montado dentro de una cámara regular de 35 mm como detector óptico del haz de luz. La cámara estaba montada a un ángulo que oscila entre 5 a 23 grados del rayo láser y la línea de la antena direccional al diodo se alinea con la luz del láser. La posición del punto de luz del láser en la antena direccional, focalizado a través de la lente de la cámara está relacionada con la elevación de la superficie por triangulación. El rango de las medidas de elevación era ajustable y dependía del ángulo formado por el láser y la cámara, la longitud focal de las lentes y la longitud total de la región sensible de la antena direccional. El ajuste del rango de medida de elevación se hace bien cambiando el ángulo formado por la cámara y el láser o bien cambiando las lentes a diferente

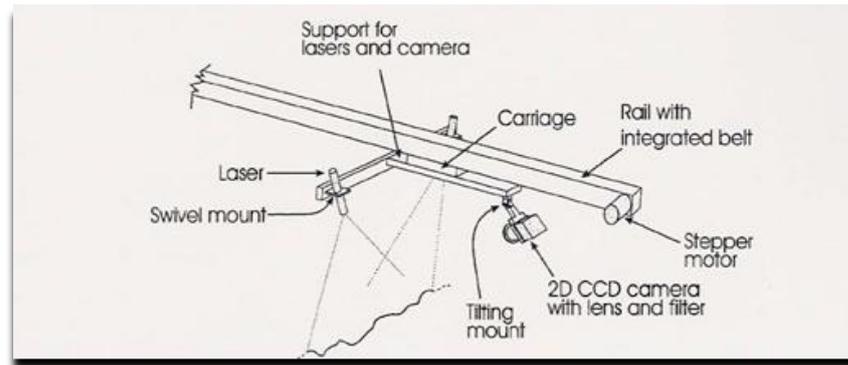
longitud focal. Con la antena direccional de diodo de 512, la resolución de elevación es aproximadamente 0,1% del rango ajustado. En un principio, el equipo estaba ensamblado en una estructura de 1 m por 1 m, aunque (Huang, 1998) también utilizaba un modelo de 3 m por 1 m para estudios de simulación de lluvia, el cual se pone en posición por motores de pasos. La estructura utilizaba para moverse una corredera lineal y una transmisión por cable o eslabones. Con este mecanismo, (Figura 1.2), el instrumento era capaz de digitalizar un trayecto de un metro de longitud en 6 segundos con datos de elevación tomados cada 0,5 mm de separación de los puntos a medir (García, 2006).



**Figura 1.2 Escáner láser con la unidad de escaneo montada en la estructura Helming, 1993).**

El primer prototipo desarrollado presentaba los inconvenientes de su estructura y tamaño inadecuado para los trabajos de campo, así como graves problemas relacionados con el efecto sombra, que impedían la representación real de la imagen a digitalizar. A partir de las diversas experiencias obtenidas con los aparatos iniciales, (Darboux y Huang,

2003) empezaron a experimentar con un nuevo modelo, esquematizado en la (Figura 1.3), en el que el emisor y el receptor están dispuestos sobre una estructura en línea, más flexible, que permite medir instantáneamente las alturas de un perfil de superficie de forma más rápida, gracias al avance de las diferentes tecnologías informáticas y ópticas. Puesto que las medidas se realizan a lo largo de un raíl, el diseño y el transporte están simplificados. De esta forma, el primer diseño, o láser de escaneo puntual, como su nombre indica, basa su sistema en escaneo de puntos, mientras que el nuevo prototipo láser escanea los perfiles de la superficie, por esta razón se le ha bautizado como método láser de escaneo instantáneo de perfil. El principio de actuación del modelo, es el mismo que el anterior, con la única diferencia de que la estructura es más flexible y que posee dos diodos láser que generan una línea estrecha en la superficie del suelo, que se encuentra en el campo de visión de la cámara, de esta forma en lugar de medir punto por punto, genera perfil por perfil. El procedimiento de calibración convierte las coordenadas detectadas por el montaje de la cámara en coordenadas espaciales y reproduce automáticamente las variaciones de altura. El mapeo de las alturas de la superficie se realiza grabando los sucesivos perfiles a medida que el ensamblaje, formado por la cámara y los puntos de luz de ambos láseres, se mueve automáticamente a través del raíl. A continuación se muestra el esquema del nuevo diseño.



**Figura 1.3 Rugosímetro láser para perfiles instantáneos (Darboux y Huang, 2003).**

### **Otros métodos**

Saleh (1993) introdujo una nueva técnica para medir la rugosidad o geometría superficial del suelo, *el método de cadena*. Dicha metodología se basa en la utilización de una cadena que puede rodar por la superficie del suelo, y cuya disposición determina las elevaciones superficiales. Para calcular la elevación se resta la longitud de la cadena en su disposición en el suelo de la longitud total de la cadena en una superficie plana. Dicha diferencia da lugar a un coeficiente denominado “rugosidad de cadena” y que sirve para determinar la rugosidad de diferentes superficies. Más adelante (Skidmore, 1997 ) señaló que el método de cadena es independiente de la escala, ya que una cadena con diferente grosor puede proporcionar el mismo coeficiente que otra distinta, y por lo tanto da lugar a error cuando se mide la rugosidad causada por surcos, principalmente los generados durante el laboreo. (Merrill, 1998; Merrill *et al.*, 2001) perfeccionaron el método con la utilización de varias cadenas en el que se relacionan las longitudes de las cadenas individuales en progresión geométrica. De esta forma, la interpretación de la rugosidad se puede llevar

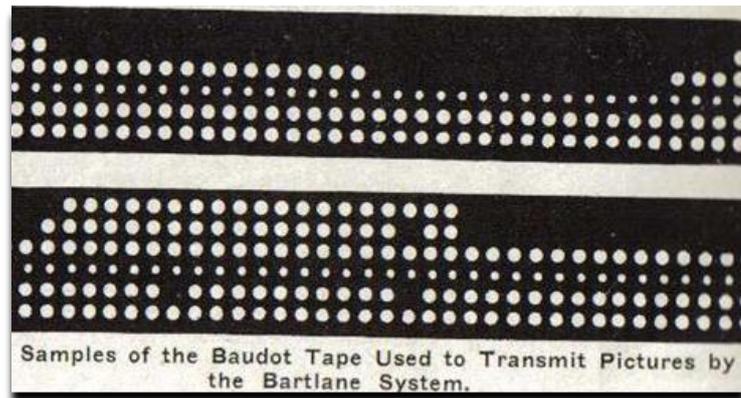
a cabo con la teoría fractal desarrollada por (Huang, 1998) para el método láser sin contacto. Una de las últimas metodologías desarrolladas, que parece prometedora, de toma de datos de la rugosidad superficial del suelo, y que se ha diseñado tomando como modelo la basada en la técnica láser sin contacto de (Huang y Bradford, 1990; Huang, 1998) es la de (Oelze *et al.*, 2003 ) basada en *técnica ultrasónica*, llegando a resultados similares, cuando se utiliza un adecuado número de muestras y la superficie de medición es porosa. La técnica aún presenta muchas limitaciones para obtener datos completos de muestreo y depende en gran medida de la superficie a estudiar, pero se sigue experimentado y perfeccionando. Aunque se han desarrollado varios métodos sustitutivos sin contacto, *láser* (Huang, 1998), *acústicos* (Oelze *et al.*, 2003 ) o basados en *fotografía* (Merel y Farres, 1998) en campo la única técnica demostrada que presenta los mínimos problemas es el basado en varillas, con múltiples variantes, especialmente las que utilizan como apoyo las técnicas fotogramétricas (Wagner y Yiming, 1991; García, 2006).

### **1.3 Utilización del método de tratamiento de imágenes en la agricultura para determinar características del suelo.**

#### **1.3.1. Evolución del procesamiento de imágenes digitales.**

De acuerdo con (Sánchez *et al.*, 2012) una de las primeras aplicaciones anotadas de digitalización de imágenes se realizó en el sector periodístico cuando en 1921 se utilizó por vez primera el sistema Bartlane de transmisión de imágenes. Dicho sistema reducía el tiempo recorrido por la imagen a través del Atlántico desde más de una semana a tan solo tres horas

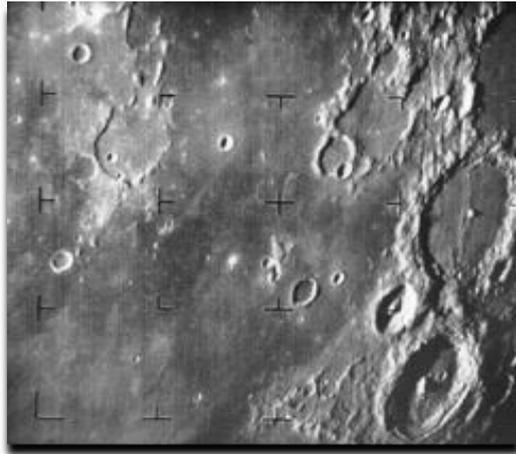
aproximadamente. Para lograr esta hazaña se utilizó una técnica en la que inicialmente se codificaba la imagen en 5 niveles de gris como se puede observar en la (Figura1.4), para posteriormente ser decodificada e impresa mediante un teletipo en el receptor de la transmisión.



**Figura 1.4 Imagen del código utilizado para transmitir imágenes a través del sistema Bartlane.**

Pese a que estos ejemplos han sido citados como imágenes digitales, en realidad no son considerados como tales, ya que para su procesamiento no se utilizó ninguna computadora.

No sería hasta inicios de la década de los 60 cuando aparecieron las primeras computadoras suficientemente potentes como para poder realizar tareas complejas de procesamiento de imágenes (Sánchez *et al.*, 2012). Las primeras imágenes procesadas por ordenador fueron aquellas destinadas a corregir distintos tipos de distorsión de las imágenes tomadas por la sonda americana *Range7* diseñada en el *Jet Propulsion Laboratory* de Pasadena en 1964 para estudiar la Luna. Un ejemplo de estas imágenes tomadas analógicamente se observa en la (Figura 1.5).



**Figura 1.5 Primera imagen de la Luna realizada por naves americanas (Ranger7).**

En paralelo con estas labores de corrección de imágenes, durante las décadas de los 60 y los 70 aparecieron las primeras técnicas de utilidad para la creación de imágenes con fines médicos.

El descubrimiento de la técnica de imagen médica denominada tomografía axial computarizada en el año 1967 a manos de Allan McLeod Cormack supuso un gran avance para la medicina. La tomografía consiste en la utilización de una serie de algoritmos que aprovechan los datos tomados por detectores y rayos X para obtener una imagen que representa la sección de un objeto o parte del cuerpo (Sánchez *et al.*, 2012).

Desde la década de 1960 hasta la actualidad, el campo de procesamiento de imágenes ha crecido vertiginosamente. Además de las aplicaciones en medicina y el programa espacial, las técnicas de procesamiento digital se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. Se utilizan herramientas informáticas por ejemplo, para mejorar el contraste o la intensidad de un color y de este modo facilitar la interpretación de imágenes utilizadas en la

industria y las ciencias biológicas. Los geógrafos también utilizan técnicas iguales o similares para estudiar los patrones de contaminación detectados por los satélites. En la arqueología, los métodos de procesamiento de imágenes han tenido gran éxito para recomponer imágenes incompletas de objetos antiguos y sin registros disponibles para su restauración, tal como podemos ver en la (Figura 1.6) con la reconstrucción del clásico coliseo romano realizada por Google.



***Figura 1.6 Reconstrucción 3D del coliseo romano.***

Del mismo modo aplicaciones exitosas sobre el procesamiento de imágenes se pueden encontrar en la astronomía, la biología, la energía nuclear, la medicina, la aplicación de la ley, la defensa, la industria y también en las últimas décadas se ha utilizado este método en la agricultura, principalmente en la reconocida agricultura de precisión.

### **1.3.2. Aplicación del tratamiento de imágenes en la Agricultura.**

Con el desarrollo de todas estas nuevas tecnologías desde hace algún tiempo

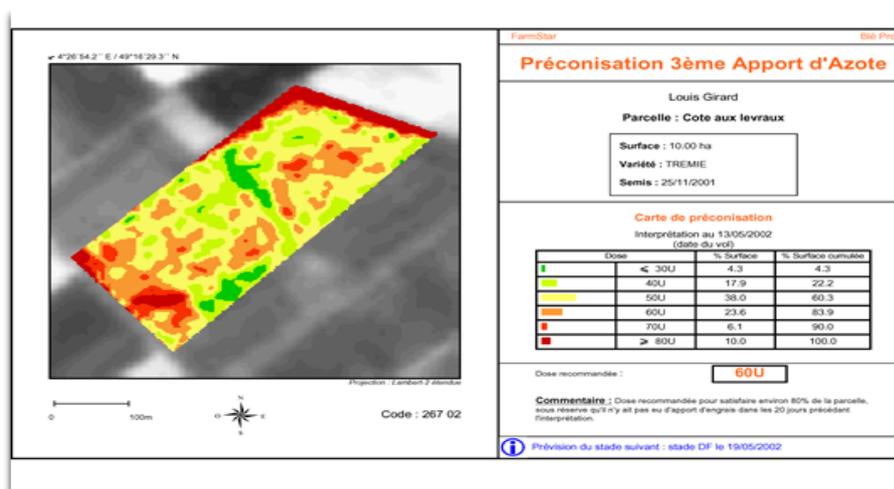
se viene trabajando con el procesamiento de imágenes en gran medida en la agricultura de precisión para ello la Universidad Complutense de Madrid se creó un proyecto llamado Control de un robot Móvil con visión: que consiste en la rectificación de imágenes para agricultura de precisión. Su objetivo era obtener un resultado aceptable del análisis del terreno en tiempo real en el orden de magnitud de milésimas, en la (Figura 1.7) se puede observar el proyecto desarrollado en Madrid.



**Figura 1.7 Robot ejemplo del proyecto RHEA**

En este proyecto pretendió disminuir hasta en un 75% el uso de agroquímicos en cultivos tanto herbáceos como leñosos así como reducir los costes de producción, haciéndola más sostenible. Todo ello fue posible gracias a la labor de una flota de robots terrestres, como el de la (Figura 1.7), y aéreos equipados con sensores de última generación. Entre otras funciones, estos robots se diseñaron para tratamientos localizados y fueron autónomos, heterogéneos y reconfigurables.

Para el tratamiento de imágenes en la agricultura de precisión existen una serie de equipos electrónicos llamados sensores hiperespectrales, los cuales se basan en una metodología que permite realizar el seguimiento detallado del crecimiento de los cultivos para conocer a tiempo cuáles son las carencias nutricionales o hídricas y las cantidades de agua o nutrientes a aportar en cada lugar. Estos “mapas de estado” se construyen a partir de modelos de crecimiento que se basan en los datos hiperespectrales. Desde hace años, el Instituto Cartográfico de Catalunya (ICC) trabaja en este campo para la compañía francesa Astrium, que da el servicio a las cooperativas de agricultores (Colomer, 2005). (figura 1.8)



**Figura 1.8 Ficha con la recomendación de aporte de nitrógeno a una parcela agrícola. Al tratarse de información georeferenciada, el mapa puede usarse directamente en sistemas automáticos.**

En otro de los renglones de la agricultura donde se viene aplicando el tratamiento de imágenes es en el proceso de postcosecha donde podemos encontrar métodos y tecnologías para apreciar el estado de los productos

agrícolas. Uno de los métodos utilizados es para medir el color de la piel de los frutos utilizando tres tipos de sensores: colorímetros, espectrofotómetros, y sistemas de visión en máquinas del color. Los colorímetros son instrumentos diseñados para cuantificar el color en términos de percepción humana. Los colorímetros son instrumentos de banda ancha que dividen generalmente la información del espectro visible en tres componentes similares a las células rojas, verdes y azules del cono en el ojo humano. Los espectrofotómetros se diseñan para proporcionar una información más detallada sobre las características ópticas de la muestra, dividiendo típicamente la información del espectro visible en quince o más componentes. Los colorímetros y los espectrofotómetros son diseñados para dar una sola lectura promedio sobre un área de la muestra que se extiende típicamente entre 5 y 25 mm de diámetro. Para la implementación en sistemas en línea o cuando la información más detallada del color es necesaria, como en el análisis espacial a través de una superficie de dos dimensiones, un instrumento de sistema de visión es típicamente utilizado.

Uno de los primeros colorímetros desarrollados fue el medidor de la diferencia del color (Color Diferente Meter) desarrollado por (Hunter, 1948) Hunter desarrolló un tri estímulo del espacio del color llamado L, a, b para simular la percepción humana del color. El espacio L, a, b del color se basa en la teoría opuesta del color a la percepción humana, desarrollada por (Hering, 1872) en donde la percepción es una función de las señales de los bastones y conos en el ojo que se procesan en una manera antagónica con tres canales opuestos: negro versus blanco (valor Hunter L), rojo versus verde (valor Hunter a), y el azul versus el amarillo (valor Hunter b). Muchos otros sistemas del color se

han desarrollado desde 1948, pero el sistema Hunter L, a, b fue uno de los primeros utilizado en alimentos y es comúnmente utilizado en estudios de investigación para medir madurez o defectos en muchos productos incluyendo el mango.

En Cuba se ha trabajado con el tratamiento fotogramétrico lo cual ha tenido resultados como son:

Desarrollo de la mapificación digital a escala 1: 2 000 y 1: 10 000, con intereses para la agricultura cañera y no cañera. Densificación de los suelos para la realización del drenaje parcelario por métodos fotogramétricos. Control de cultivos y análisis de cosechas.

La Fotogrametría, regida por principios y leyes matemáticas, basa su método para calcular la forma y dimensiones de un objeto, en el uso de las fotografías. A partir de dos fotografías de un mismo objeto tomadas desde posiciones diferentes, aplicando las reglas de la geometría proyectiva se obtiene la estereoscopia del objeto permitiendo su modelado, estudio y descripción sin necesidad de tenerlo a él presente (González, 2008).

**»Capítulo II**  
***Materiales y Métodos.***

---

---

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología para la caracterización del área experimental.

El presente trabajo se desarrolló en el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas en el período comprendido de febrero a abril de 2013, para lo cual se seleccionaron diferentes zonas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar de la provincia de Villa Clara y se ubicaron diferentes campos de caña para realizar los experimentos, como son: campos 1 y 2 bloque 627 de la UBPC Carlos Manuel de Céspedes perteneciente a la UEB Efraín Alfonso, ubicada en el municipio de Ranchuelo, campo 81, bloque 73 de la UBPC José Arcadio García que pertenece a la UEB Abel Santamaría Cuadrado, ubicada en el municipio de Encrucijada y campo 4 bloque 8 de la UBPC 1<sup>o</sup> de Mayo de la UEB Héctor Rodríguez, ubicada en el municipio Cifuentes. Todos los campos que se tomaron para la experimentación fueron campos en demolición que estaban próximos a roturar ya que son en los que más se puede apreciar la variación de la geometría del perfil del suelo.

Además se seleccionaron estas zonas porque son áreas en las que la caña de azúcar no se cultiva en canteros como en la zona norte de la provincia donde ya se han realizado investigaciones precedentes por otros autores como (Betancourt *et al.*, 2007)

Para poder determinar el desnivel en los campos de caña seleccionados se utilizó un Taquímetro *DHALTA 010-B Autorreductor* de fabricación Rusa (Figura 2.1), para identificar las áreas de mayor acumulación de agua y con más riesgos a sufrir deformaciones por el paso de las máquinas e implementos agrícolas según las normas el desnivel en las parcelas

experimentales no debe superar los 3 grados y en los campos estudiados el desnivel se mantuvo dentro del rango requerido por las normas.



**Figura 2.1. Taquímetro DHALTA 010B para determinar el desnivel en el área experimental.**

## **2.2 Metodología para la determinación de la geometría del perfil del suelo.**

Para el desarrollo de toma de datos del perfil del suelo, se realizó una revisión bibliográfica de los estudios realizados, llevando a cabo un análisis de las técnicas que mejor se adaptaban nuestro objetivo.

La adquisición de datos del perfil superficial del suelo se hace normalmente a través de métodos de contacto, utilizando un conjunto de varillas y con el apoyo de diversos métodos para la toma de datos de alturas (Kuipers, 1957; Whalley y Rea, 1994) esta se realizó sobre la base de las técnicas de los autores antes mencionados, aunque disminuyendo los costos de su desarrollo, se optó por utilizar la técnica clásica, más segura, el perfilómetro de varillas, con el que finalmente se llevaron a cabo las mediciones en campo. Siempre teniendo en cuenta comenzar las mediciones a partir del décimo surco y alejado del borde del campo unos 10 m para evitar posibles áreas con

mayores modificaciones por causas del viraje de la maquinaria durante la cosecha, y en forma de diagonal en el campo para abarcar toda el área experimental.

Se simplificó el método, comparando los resultados del método de varillas con la interpretación de imágenes, ambos en campo. Para la experimentación y puesta a punto de las metodologías se compararon suelos con diferentes propiedades de la provincia, para ver si aparecían variaciones en los resultados.

### **2.2.1 Metodología para la construcción de un perfilómetro de varillas.**

Para lograr lo antes mencionado se utilizó un perfilómetro de varillas desarrollado en el departamento de ingeniería Agrícola de la Universidad Central de Las Villas (Figura 2.2)

Para la construcción del perfilómetro se tuvo en cuenta la bibliografía consultada determinando que el mismo debe abarcar un área cercana a los 2m, ya que es la zona donde más inciden el paso de las máquinas y los implementos agrícolas. Para esto se utilizó una barra de madera de 2.0 m de longitud por 0.025 m de espesor y 0.08 m de ancho, una lámina de cartón de 1.96 m de lardo por 0.285 m de alto y 37 varillas de aluminio de 0.50 m de largo por 0.004 m de diámetro.



**Figura 2.2 Perfilómetro de varillas construido.**

Para determinar el perfil del suelo con el perfilómetro de varillas desarrollado, primero se limpia el área de trabajo retirando toda la paja debido a la cosecha, luego se coloca el perfilómetro justamente en el centro del surco de manera tal que quede igual distancia para cada uno de los extremos, logrando así abarcar toda el área necesaria para la toma de los datos. Para determinar el nivel del perfilómetro se utilizó un nivel de burbuja tradicional (Figura 2.3) para lograr que no existiera ningún desnivel en la medición. Una vez colocado el instrumento en posición se tomaron las mediciones del mismo utilizando una cinta métrica de 3.0 m y además se saca una imagen con una cámara digital para poder hacer un análisis de las imágenes para comparar los resultados obtenidos y así para cada medición que se realizó.



**Figura 2.3 Nivel de burbuja utilizado para nivelar el perfilómetro en el campo.**

### **2.2.2 Metodología para la obtención de la geometría del perfil del suelo aplicando el método de tratamiento de imágenes.**

Para la toma de imagen se utilizó una Cámara Digital Canon Powershot A810 de 16 Megapíxeles Modelo: 6180B001 (Figura 2.4)



**Figura 2.4 Cámara Digital Canon con que se tomaron las imágenes.**

Para aplicar este método se tomó una pizarra de cartón de 1.96 m de largo y 0.31 m de ancho (Figura 2.5) y se colocó en el centro del surco para que abarque la distancia necesaria para cada extremo, esto se consiguió haciendo una perforación a lo ancho del camellón del surco donde se enterró la pizarra,

de tal manera que se pudiera tomar una foto en la que se distinguiera el contraste de la pizarra con el suelo.



***Figura 2.5 Pizarra de cartón utilizada para tomar las fotos del perfil.***

### **2.2.3. Metodología para el procesamiento de las imágenes tomadas.**

El procesamiento de las imágenes se desarrolló con la ayuda del software especializado *Matlab R2012b* en una Laptop *ACER ASPIRE 4739Z* el cual contiene un módulo para el procesamiento de imágenes digitales que permite realizar una serie de estudios dentro de los cuales se encuentra el utilizado para esta investigación y en el cual se programó una secuencia para tratar las imágenes tomadas y determinar la geometría del perfil del suelo mediante imágenes digitales.

**Script desarrollado en el software Matlab R2012b para el tratamiento de la imagen.**

```
% Cargar imagen
```

```
lo = imread(foto);
```

```

imshow(Io); xlabel('imagen original');
% Preprocesamiento (filtro de mediana de 7 x 7)
m=7; n=7;
I = medfilt2(Io(:,:,3), [m n]); % componente azul
imshow(I); xlabel('imagen filtrada');
% Sementación (binarización) por el método de Otsu
[level EM] = graythresh(I);
BW = im2bw(I,level);
imshow(BW); xlabel('imagen binarizada');
[m,n]=size(BW);
BW2 = bwareaopen(BW,round(m*n/5));
imshow(BW2); xlabel('imagen rellenada')
% Negativo
uno=ones(m,n);
BW=uno-BW2;
imshow(BW); xlabel('imagen en negativo')
BW(1:10,:)=0; % rellena con ceros extremo sup de BW
BW = bwareaopen(BW,round(m*n/25));
imshow(BW); xlabel('imagen erosionada')
curva=zeros(1,n);
for i=1:n,
curva(1,i)=m-min(find(BW(:,i)));
end
k=1.96/n;
x=k*(1:n);
y=k*curva;

```

```
y = medfilt1(y,round(.05/k));  
plot(x,y)  
xlabel('largo, en m')  
ylabel('alto, en m')  
title('geometría')
```

### **2.3 Metodología para el procesamiento estadístico de los resultados.**

Para el procesamiento estadístico de los resultados se utilizó el software *STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14*, y una laptop *ACER ASPIRE 4739Z* y se basó en un análisis de ajuste de una distribución normal de los datos y obtener la distribución ajustada de los datos adecuadamente, seleccionando Pruebas de Bondad de Ajuste de la lista de Opciones Tabulares. También puede evaluarse visualmente si la distribución normal se ajusta, seleccionando Histogramas de Frecuencia de la lista de Opciones Gráficas.

**»Capítulo III**  
***Resultados y Discusión.***

---

---

### **III. RESULTADOS Y DISCUSION.**

#### **3.1. Resultados de la caracterización del área experimental.**

La selección del área experimental trajo como resultado que se tomaron tres áreas fundamentales que se dedican al cultivo de la caña, y fueron el área experimental # 1 en áreas de la UEB Efraín Alfonzo de Ranchuelo, la # 2 en áreas de la UEB Abel Santamaría Cuadrado de Encrucijada y la # 3 en la UEB Héctor Rodríguez de Sagua la Grande. Los cuales son áreas de mediano tamaño para facilitar la toma de los datos con mayor facilidad, además se seleccionaron áreas con características diferentes para poder comparar los resultados.

#### **3.2. Resultados del diseño y construcción del Perfilómetro.**

La construcción del perfilómetro de varillas tradicional trajo como resultado del diseño que en correspondencia con lo que se quería medir con el mismo como son los campos de caña y se necesita abarcar el ara de mitad de camellón a mitad de camellón y esto tiene una distancia de 1.6 m por eso se decidió que el perfilómetro tiene que tener las dimensiones siguientes.

##### **Características del perfilómetro construido.**

- ✓ Largo de la barra de madera: 2.0 m.
- ✓ Ancho de la barra de madera: 0.080 m.
- ✓ Espesor de la barra de madera: 0.025 m.
- ✓ Largo de la pizarra: 1.96 m.
- ✓ Alto de la pizarra: 0, 31 m.
- ✓ Largo de las varillas: 0,50 m.
- ✓ Diámetro de las varillas: 0.004 m.

- ✓ Cantidad de varillas: 37.
- ✓ Distancia que se puede medir: 1,96 m.

### 3.3. Resultados de la medición del perfil del suelo aplicando el método de tratamiento de imágenes.

#### Procesamiento de las imágenes en el Matlab.

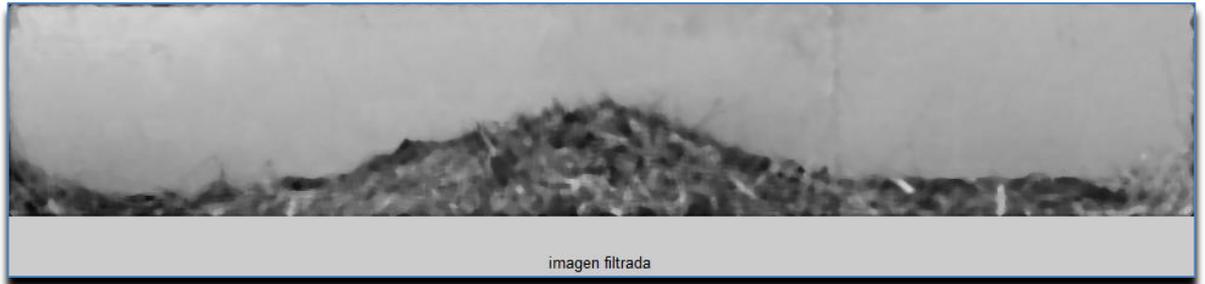


Figura 3.1 Imagen original como se tomó en el campo.



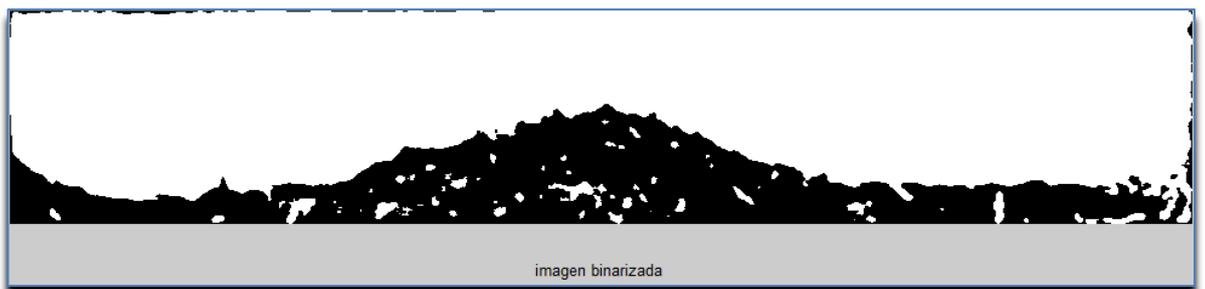
Figura 3.2 Imagen recortada en el *hyperSnap 6* para procesar con Matlab.

Este proceso se obtiene al recorte la imagen tomada en el campo para simplificar el proceso y disminuir el gasto de recursos computacionales. Esto se realizó con el software especializado hyperSnap 6 (figura 3.2).



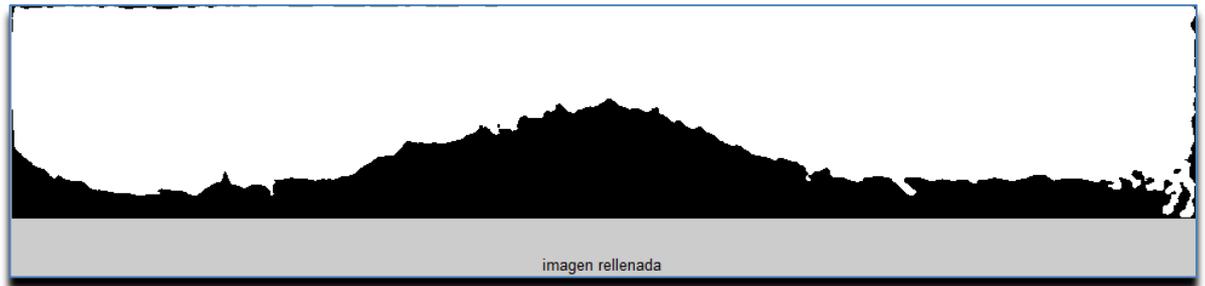
**Figura 3.3 Imagen filtrada.**

El filtrado es a menudo un funcionamiento no lineal usado en el procesamiento de imágenes para reducir el ruido y los bordes. Uno de los filtros más efectivos es de mediana de 7x7, cuando la meta es reducir ruido y bordes de la imagen simultáneamente (figura 3.3).



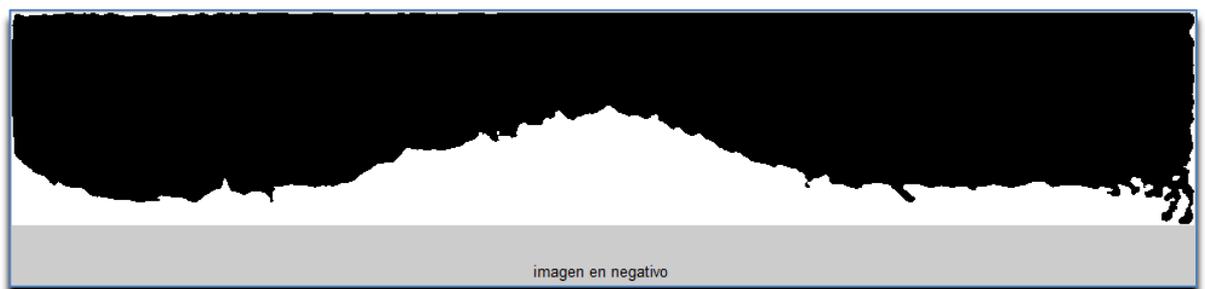
**Figura 3.4 Imagen binarizada por el método de Otsu.**

Aquí la imagen es sometida a un proceso de segmentación (binarización) en el cual la imagen como su nombre lo indica se convierte solamente en dos colores identificados, utilizando el método de Otsu mediante el cual se puede nivelar o convertir una imagen de intensidad, a una imagen binaria (im2bw), el nivel es un valor de intensidad normalizado que queda en el rango [0, 1]. El método funciona escogiendo el umbral para minimizar la variación de los pixeles negros y blancos (Figura 3.4).



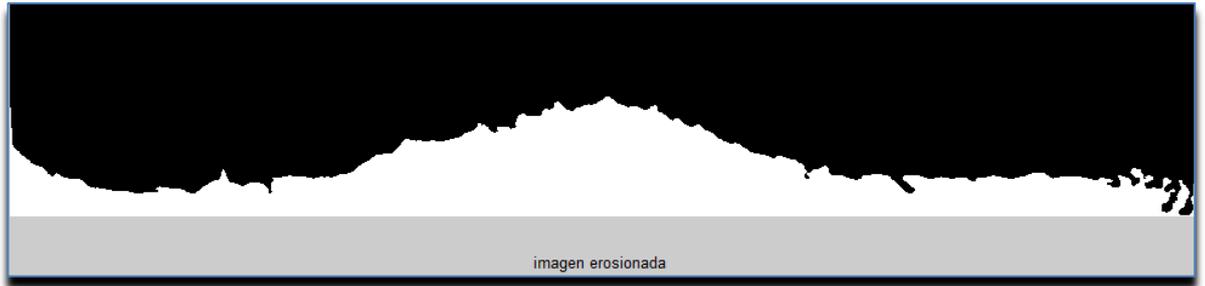
**Figura 3.5 Imagen rellenada.**

Este proceso quita de una imagen binaria todos los componentes (los objetos) conectados menores que los píxeles  $P$  que se definan, y produce otra imagen binaria,  $BW2$  predefinida en 8 píxeles para dos dimensiones, 26 píxeles para tres dimensiones, y `conndef (ndims(BW), 'máximo')` para las dimensiones superiores (figura 3.5).



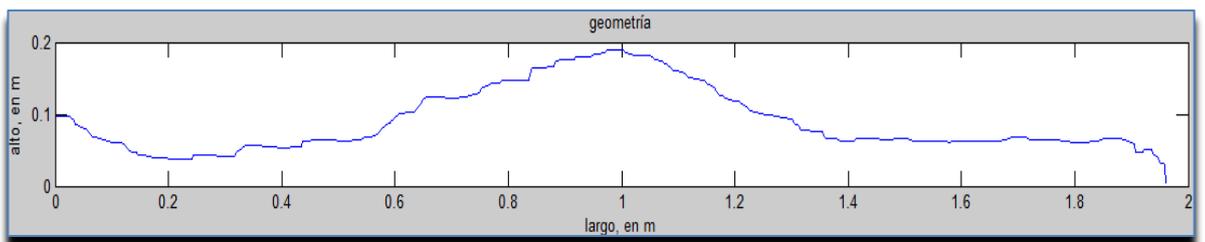
**Figura 3.6 Imagen en negativo.**

La función (`imread`) puede importar del mapa de bits de Windows (BMP) imágenes que especifican un valor negativo por la altura de la misma. La especificación de BMP usa los valores negativos para indicar la orientación de la imagen. Si la altura es positiva, la imagen es una imagen bottom-up y si la altura es negativa, la imagen es un top-down (figura 3.6).



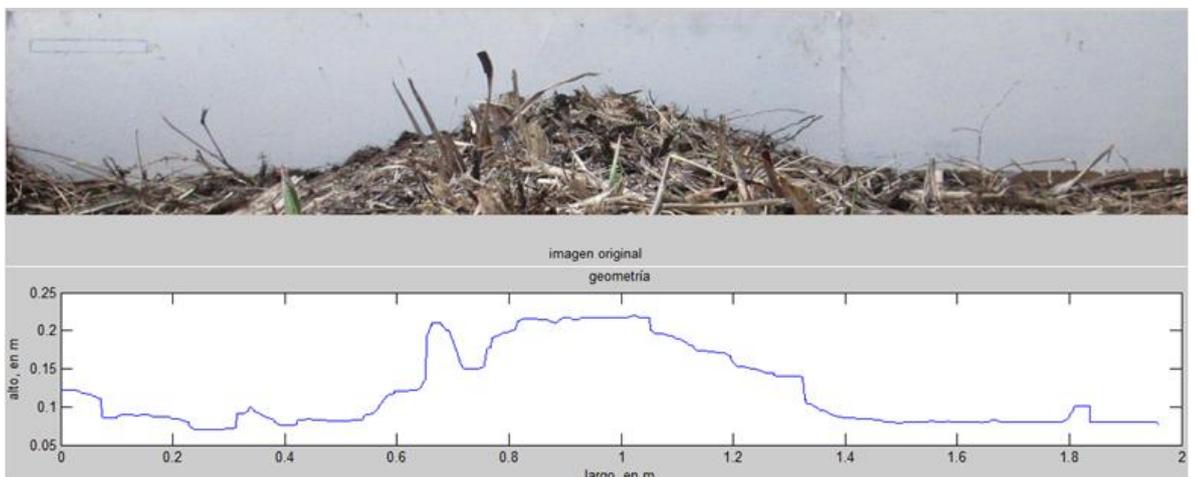
**Figura 3.7 Imagen erosionada.**

Mediante el comando (`imerode`) se realiza la corrección binaria; de la escala de grises de la imagen, este comando puede realizar múltiples correcciones al mismo tiempo de la imagen que se procesa, usando cada elemento de la estructuración para suavizar los picos (figura 3.7).



**Figura 3.8 Geometría obtenida luego del procesamiento de la imagen en Matlab.**

Luego que se procesa la imagen el software plotea la imagen determinando las variaciones entre ceros y unos logrando representando la geometría de la misma obteniendo así el perfil del suelo mediante el tratamiento de la imagen (figura 3.8).



**Figura 3.9 Geometría alterada por obstáculos que crean interferencia en la imagen tomada.**

Es necesario que a la hora de sacar la foto no queden en el área que se pretende analizar residuos de cosechas, plantas indeseables o que el sol esté en una posición en la cual se creen sombras que generen interferencia o ruidos en la imagen que entorpezcan el proceso de tratamiento de la imagen con el software.

**3.4. Resultados del análisis estadístico de los resultados de ambos métodos.**

El análisis estadístico de los resultados de ambos métodos realizado en el *STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14* nos demuestra que existe una normalidad en los datos de ambos métodos por lo que se puede utilizar cualquiera de los dos para obtener este tipo de geometría del perfil del suelo, esto lo confirman los resultados del análisis:

**Variable: perfilómetro.**

Valores con rango desde **10,5 a 27,0**

**Tabla 3.1 Distribuciones Ajustadas perfilómetro.**

<b><i>Normal</i></b>
media = 18,6162
desviación estándar = 4,13344

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos del perfilómetro.

**Tabla 3.2 Pruebas de Normalidad para el perfilómetro.**

<b><i>Prueba</i></b>	<b><i>Estadístico</i></b>	<b><i>Valor-P</i></b>
<b>Chi-Cuadrado</b>	17,0541	0,196845

<b>Estadístico W de Shapiro-Wilk</b>	0,96775	0,439873
--------------------------------------	---------	----------

Aquí se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si la variable perfilómetro puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de *chi-cuadrada* divide el rango en 16 clases igualmente probables y compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado de observaciones. La prueba de *Shapiro-Wilk* está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, no se puede rechazar la idea de que la variable perfilómetro proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Los límites de tolerancia establecen que se puede estar **95,0%** confiados en que el **99,73%** de la distribución cae dentro de 2,99061 y 34,2418. Este intervalo se calcula tomado la media de los datos  $\pm 3,78029$  veces la desviación estándar. Este intervalo es confiable ya que los datos provienen de una distribución normal.

**Variable: imagen**

Valores con rango desde **16,5 a 30,0**

**Tabla 3.3 Distribuciones Ajustadas variable imagen.**

<b><i>Normal</i></b>
media = 22,6514
desviación estándar = 4,15282

Aquí se muestran los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de imagen.

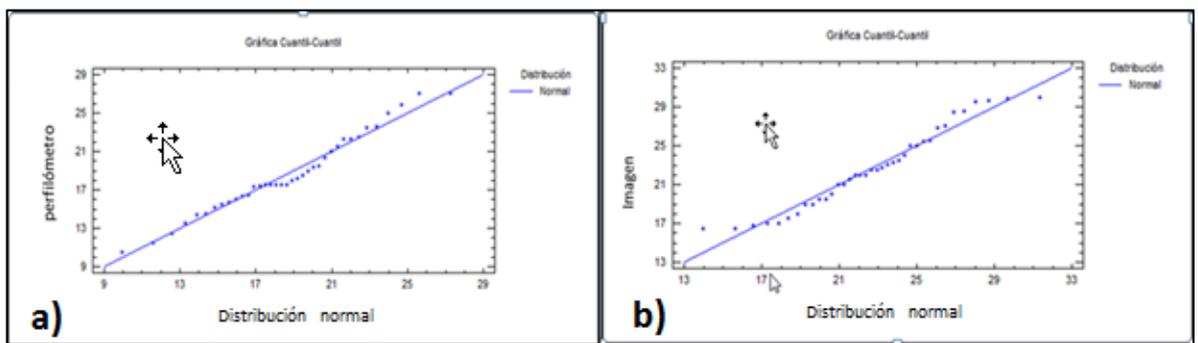
**Tabla 3.4 Pruebas de Normalidad para la variable imagen.**

<b>Prueba</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Chi-Cuadrado</b>	18,7838	0,129962
<b>Estadístico W de Shapiro-Wilk</b>	0,938602	0,0547223

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, no se puede rechazar la idea de que imagen proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Los límites de tolerancia establecen que se puede estar **95,0%** confiados en que el **99,73%** de la distribución cae dentro de 6,95247 y 38,3502. Este intervalo se calcula tomado la media de los datos  $\pm 3,78029$  veces la desviación estándar. Este intervalo es confiable ya que los datos provienen de una distribución normal.

En los gráficos (figura 3.9) se puede apreciar que no existen diferencias significativas en la normalidad de ambos métodos.



**Figura 3.9 Gráficos de distribución normal para las variables a) perfilómetro b) imagen.**

El análisis de los gráficos demuestra la similitud de los datos obtenidos aplicando ambos métodos (figura 3.10)

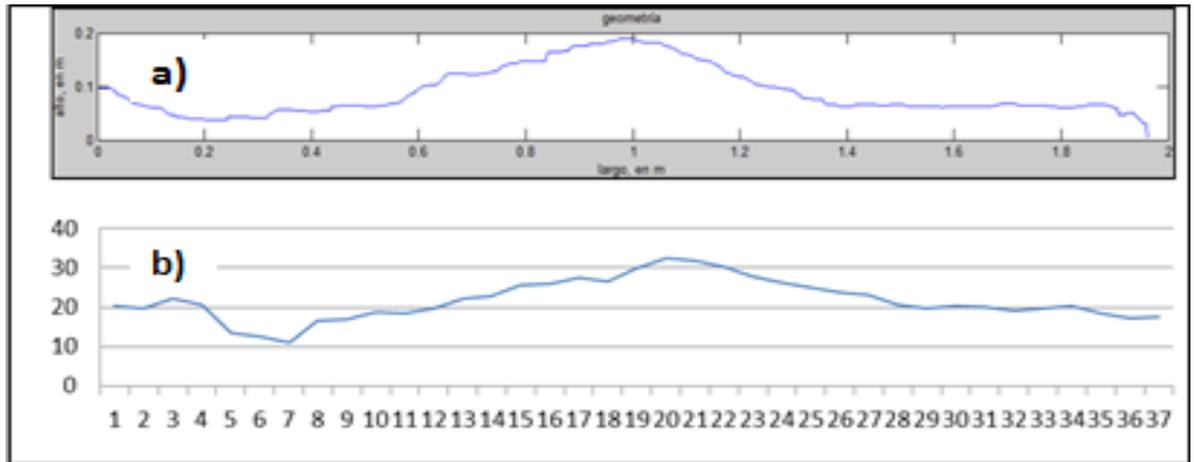


Figura 3.10 Geometrías de perfil obtenidas de la Imagen a) y del perfilómetro b).

**»Conclusiones.**

---

## CONCLUSIONES

1. Se construyó un perfilómetro tradicional de varillas semejante al que desarrollaron (Wagner y Yiming, 1991) para realizar las mediciones de la geometría del perfil del suelo en el área experimental y compararlas con las mediciones obtenidas con el método de tratamiento de imágenes.
2. Se determinó la geometría del perfil del suelo aplicando el método tradicional de varillas y además con el método de tratamiento de imágenes, para luego realizar comparaciones.
3. La comparación de la distribución de frecuencia de los datos en el análisis estadístico de la normalidad, demostró que no hay diferencias significativas entre ambos métodos.
4. A la hora de tomar la imagen es necesario tener en cuenta que no queden residuos de cosecha, plantas indeseables u otros obstáculos que puedan hacer interferencia a la hora de analizar la imagen.

## » ***Recomendaciones.***

---

---

## **RECOMENDACIONES**

1. Se debe garantizar que en el momento de tomar la foto no existan en el lugar obstáculos que provoquen interferencias que puedan entorpecer el procesamiento de la imagen con el Matlab.
2. Profundizar en el tema para perfeccionar aún más el proceso y por tanto los resultados tengan mayor confiabilidad.

## **» *Referencias Bibliográficas.***

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALLMARAS, R.; R. BURWELL y W. LEARSON: "Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage", *USDA Conserv*, 7: 1-22, 1966.
- BERTUZZI, P.; G. RAWES y D. COURALT: "Testing Roughness indices to estimate soil surface changes due to simulated rainfall", *Soil and Tillage Research*, 17: 87-99, 1990.
- BETANCOURT, Y.; M. RODRÍGUEZ; L. LEÓN; A. GUTIÉRREZ y I. GARCÍA: "Variantes tecnológicas de laboreo mínimo para la plantación de Caña de Azúcar en los suelos de mal drenaje del Norte de Villa Clara", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16: 53-57, 2007.
- BRUNEAU, P. y C. GASCUEL-ODOUX: "A morphological assessment of soil microtopography using a digital elevation model on one square metre plots", *Catena*, 17: 315-325, 1990.
- BURKWEIL, R.; R. ALLMARAS y M. AMEMIYA: "A field measurement of total porosity and surface microrelief of soils", *Soil Sci. Soc. Am*, 27: 697-700, 1963.
- COLOMER, J.: *Cámaras fotogramétricas digitales, altímetros láser y captadores hiperespectrales: una nueva generación de sensores aerotransportados para la geoinformación*, ICC, Barcelona España, 2005.
- CURRENCE, H. y W. LOVELY: "The analysis of soil surface roughness", *Trans. ASAE*, 13: 710-714, 1970.
- DARBOUX, F. y C. HUANG: "An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography", *Soil Sci. Soc. Am. J*, 67: 92-99, 2003.
- DARBOUX, F. y C. HUANG: "An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography", *Soil Sci. Soc. Am.*, 67: 92-99. , 2005.
- DESTAIN, M.; G. DESCORNET; C. ROISIN y M. FRANKINET: "Investigation of degradation by means of an opto-electronic microreliefmeter", *Soil Till. Res.*, 13: 299-315, 1989.
- GARCÍA, R.: *Desarrollo de una metodología para la medición de la rugosidad superficial del suelo* 120pp., **Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias en la especialidad Suelo** Universidad Politécnica De Madrid Madrid, 2006.
- GASCUEL-ODOUX, C.; P. BRUNEAU y P. CURMI: "Runoff generation: assessment of relevant factors by means of soil microtopography and micromorphology analysis", *Soil Technology*, 4(3) 209-219, 1991.
- GOLDENFELD, N. y L. KADANOFF: "Simple lessons from complexity", *Science*, 284: 87-89. , 1999.

- GONZÁLEZ, S.: *Actualidad, vigencia y necesidad del conocimiento de la Fotogrametría*, 8pp., Universidad de La Habana, La Habana, 2008.
- HELMING, K.; C. ROTH y R. WOLF: "Characterization of Digital Elevation Models (DEMs)", *Soil Technol*, 6: 273-286, 1993.
- HERING, E.: *Outlines of a Theory of the Light Sense*, Ed. Cambridge, Mass, USA (1964), 1872.
- HUANG, C.: *Quantification of soil microtopography and surface roughness. Fractals in soil science.*, United States, 1998.
- HUANG, C. y J. BRADFORD: "Portable laser scanner for measuring soil surface roughness", *Soil Sci. Soc. Am J*, 54: 1402-1406, 1990.
- HUANG, C.; E. WHITA y A. BENDELI: "A non contact laser system for measuring soil surface topography", *Soil Sci. Soc. Am.*, 52: 350-355., 1988.
- HUNTER, R.: "Photoelectric color-difference meter", *JOSA*, 38 661, 1948.
- KUIPERS, H.: "A reliefmeter for soil cultivation studies", *Netherlands J. Agric Sci*, 5: 255- 262, 1957.
- LERSCH, G.; F. WHISLER y M. RÖMKENS: "Selection of a parameter describing soil surface roughness", *Soil Sci. Soc. Am. J*, 52: 1439-1455., 1986.
- LINDEN, D. y J. VAN DOREN: "Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness", *Soil Sci. Soc. Am J*, 50: 1550-1565, 1986.
- MARTIN, L.: "An assessment of soil roughness parameters using stereophotography", *Assessment of erosion (Eds. M. de Boodt and D. Gabriels)*, 4: 112, 1980.
- MEREL, A. y P. FARRÉS: "The monitoring of soil surface development using analytical photogrammetry", *Photogrammetric record*, 16: 331- 345, 1998.
- MERRILL, S.: "Comments on the chain method for measuring soil surface roughness. Use of the chain set", *Soil Sci. Soc. Am J*, 52: 1147-1149, 1998.
- MERRILL, S.; C. HUANG; T. ZOBECK y D. TANAKA: "Use of the Chain set for scale-sensitive and erosion relevant measurement of soil surface roughness", *Sustaining the Global Farm. Eds. D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt*, 57: 594-600, 2001.
- OELZE, M.; J. SABATIER y R. RASPECT: "Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter", *Soil Sci. Soc. Am. J*, 67: 241-250, 2003
- OH, Y. y J. STILES: *Surface roughness measurements*, United States, 1993.
- PARDINI, G.: "Fractal Scaling of Surface Roughness in Artificially weathered smectite-rich Soil Regoliths", *Geoderma*, 11: 157-167, 2003.
- PLANCHON, O.; M. ESTEVES; N. SILVERA y J. LAPETITE: "Raidrop erosion of tillage induced microrelief. Possible use of the diffusion equation", *Soil & Tillage*, 56: 131-144

2000.

PODMORE, T. y L. HUGGINS: "Surface roughness effects on overland flow", *Trans. ASAE*, 23: 1434-1445. , 1980.

PORTA, J.; M. LÓPEZ-ACEVEDO y C. ROQUERO: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, 2003.

RADKE, J. y R. OTTERBY: "A microprocessor automater rillmeter", *Trans. ASAE*, 24: 401- 404, 1981.

RICE, C.; B. WILSON y M. APPLEMAN: "Soil Topography measurements using image processing techniques", *Computers and electronics in Agriculture*, 3: 97-107, 1988.

RÖMKENS, M.; S. SINGARAYAR y C. GANTZER: "An automated non contact surface profile meter", *Soil Tillage Res*, 6: 193-202, 1986.

SALEH, A.: "Soil roughness measurement: chain method", *J. Soil Water Conserv*, 48: 527-529, 1993.

SÁNCHEZ, M.; R. VAQUERO y C. VÁZQUEZ: *Control de un robot Móvil con visión: Rectificación de imágenes para agricultura de precisión* 88pp., **Proyecto de Sistemas Informáticos** Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2012.

SKIDMORE, L.: "Comments on chain method for measuring soil roughness", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1997

STEICHEN, J.: "Infiltration and random roughness of a tilled and untilled clay pan soil", *Soil and Tillage Research*, 4: 251–262, 1984.

WAGNER, L. y Y. YIMING: "Digitization of profile meter photographs", *Transaction of the ASAE*, 34: 412-416, 1991.

WAGNER, W.: "Mapping a three – dimensional soil surface with handheld 35 mm photography", *Soil Tillage Res*, 34: 187-197, 1995.

WELCH, R.; T. JORDAN y W. THOMAS: "A photogrammetric technique for measuring soil erosion", *Soil Water Conserv*, 39: 191-194, 1984.

WHALLEY, B. y R. REA: "A digital surface roughness meter", *Earth Surf*, 19: 809- 814 1994.

ZOBECK, T. y C. ONSTAD: "Tillage and rainfall effect on random roughness", *Soil Tillage Res*, 9: 1-20, 1987.

ZRIBI, M.; V. CIARLETTI; O. TACONET; J. PAILLÉ y P. BOISSARD: "Characterization of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three-dimensional surface representation", *Analysis with a fractional Brownian model. Remote Sens. Environ*, 72: 159-169, 2000.