

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



MODELO ESTOCÁSTICO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN ENTRE  
SENSORES DE PENETRACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL PARA  
CARACTERIZACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA

**Tesis**

Que presenta GILBERT FRESH LÓPEZ LÓPEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

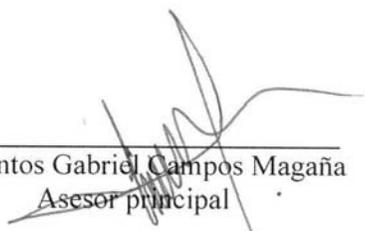
Saltillo, Coahuila

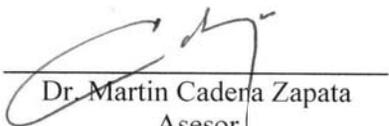
Diciembre de 2017

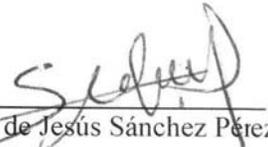
MODELO ESTOCÁSTICO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN ENTRE  
SENSORES DE PENETRACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL PARA  
CARACTERIZACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA

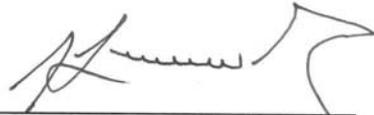
**Tesis**

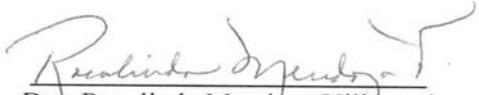
Elaborada por GILBERT FRESH LÓPEZ LÓPEZ como requisito parcial para obtener el  
grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
PRODUCCIÓN con la revisión y aprobación del  
Comité de Asesoría

  
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña  
Asesor principal

  
Dr. Martin Cadera Zapata  
Asesor

  
MC. Félix de Jesús Sánchez Pérez  
Asesor

  
Dr. Alejandro Zermeño González  
Asesor

  
Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal  
Subdirectora de Postgrado

## **AGRADECIMIENTO**

---

*Tengo una gran deuda de agradecimiento hacia muchas personas e instituciones que junto con dios han influido con su gran apoyo para un constante desarrollo personal y académico*

*Como parte de ese desarrollo el producto tangible es este proyecto de investigación que la influencia y asesoría de: Dr. Santos Gabriel Campos Magaña, MC. Félix de Jesús Sánchez Pérez, Ing. Diego Cruz Hernández entre muchos profesionistas más por mencionar, junto con los alumnos de licenciatura involucrados que al proporcionar tiempo y dedicación se hizo una sinergia para que los resultados fueran satisfactorios para cada parte que se vio involucrada. Claro que es necesario mencionar al Dr. Pedro Andrade Sánchez de la Universidad de Arizona por su apoyo en la estancia internacional.*

*Instituciones: Universidad Autónoma agraria Antonio Narro y CONACYT*

*A mi entrañable esposa Aleyda, hijo y  
Familia en general ya que ellos sabes que  
este proyecto implico tiempo y esfuerzo*

*Al público lector que por experiencia trato de  
transmitir que con dedicación, tiempo,  
esfuerzo prácticamente con DISCIPLINA se  
logran cumplir las metas*

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	3
General .....	3
Específicos.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Propiedades Físico-Mecánicas del Suelo.....	4
Compactación de suelo .....	4
Resistencia a la penetración.....	5
Resistencia a la falla .....	6
Densidad aparente.....	6
Labranza .....	7
Labranza primaria.....	7
Labranza secundaria .....	8
Sistemas de labranza.....	8
Labranza vertical .....	9
Uso de implementos para labranza vertical.....	10
Agricultura de precisión .....	11
Impacto en el uso de la AP .....	13
Aplicación de la AP.....	15
La tendencia de la AP .....	18
Variabilidad del Suelo.....	21
Clasificación de la variabilidad.....	22
Tratamiento de la variabilidad.....	23
Estadística en la variabilidad .....	23

Manejo de Sitio Específico.....	24
Diseño de Transductores de Fuerza.....	25
Análisis teórico del diseño del transductor de anillo .....	26
Sensores de anillo extendido .....	26
Sistema de adquisición de datos .....	27
Desarrollo de Sensores Aplicados en la Agricultura.....	29
Sensores para tratamiento en tiempo real .....	29
Sensores mecánicos .....	31
MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
Ecuación de Predicción de RR vs RP.....	42
Análisis de datos .....	42
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
Diseño de Sensores.....	44
Calibración de Sensores .....	45
Pruebas Bajo Condiciones de Campo.....	47
Ecuación de Predicción de RR vs RP.....	48
Análisis de datos .....	48
Modelo estadístico para campo 1 (C1) y campo 2 (C2) .....	49
Modelos estadísticos considerando C1 más C2.....	51
Generación de Mapas .....	52
CONCLUSIONES .....	54
RECOMENDACIONES .....	54
REFERENCIAS.....	55
ANEXOS .....	66
A.1 Análisis Teórico del Diseño del Transductor de Anillo .....	66
A.2 Galgas extensiométricas .....	68
A.3 Sensibilidad de Galgas Extensiométricas .....	68
A.4 Puente de Wheatstone.....	69
A.5 Generación de mapas de caracterización del sitio en el software ArcView 3.2.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Herramientas para la AP .....	12
<b>Figura 2.</b> Mapa de variabilidad del suelo en siembra .....	21
<b>Figura 3.</b> Transductor de tipo anillo. (a) Anillo liso extendido; (b) anillo octagonal extendido .....	26
<b>Figura 4.</b> Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado al frente del tractor .....	31
<b>Figura 5</b> Esquema ilustrativo de cuchilla plana .....	33
<b>Figura 6.</b> Modelo CAD del sensor de perfil de compactación del suelo (SCP).....	34
<b>Figura 7.</b> Dimensiones de sensor y colocación de galgas .....	35
<b>Figura 8.</b> a) LV-MaxSonar-EZ1 b) Circuito de AD620AN y filtro RC .....	36
<b>Figura 9.</b> Posición y conectividad de galgas para un transductor OAE.....	36
<b>Figura 10.</b> Tripié de calibración.....	37
<b>Figura 11.</b> Banco de calibración de transductores octagonales .....	38
<b>Figura 12.</b> Grafica escalonada para calibración .....	39
<b>Figura 13.</b> Acondicionamiento de Carro Porta Sensores .....	40
<b>Figura 14.</b> Distribución de muestreo aleatoria las líneas y puntos representan RR y RP respectivamente.....	41
<b>Figura 15.</b> Sensor de resistencia a la penetración .....	44
<b>Figura 16.</b> Sensores Octagonales de Anillo Extendido.....	45
<b>Figura 17.</b> Calibración de sensor de fuerza para el penetrómetro.....	45
<b>Figura 18.</b> Tendencia lineal de los datos.....	46
<b>Figura 19.</b> (a) OAE Rojo-Amarillo colocado en el marco de calibración; (b) Tendencia lineal .....	47
<b>Figura 20.</b> Datos de campo (a) C1: Jardín Hidráulico; (b) C2: Prácticas Agrícolas.....	48
<b>Figura 21.</b> Graficas de fuerzas de reacción del suelo, (a) originales y (b) ajustadas .....	48
<b>Figura 22.</b> Medición del penetrómetro, (a) RP y (b) Profundidad de capas compactadas .....	49
<b>Figura 23.</b> Tendencia de la línea y análisis de los datos de C1 .....	50
<b>Figura 24.</b> Tendencia y análisis de los datos de C2 .....	50

<b>Figura 25.</b> Tendencia del modelo de regresión lineal .....	52
<b>Figura 26.</b> Mapas de C1; (a) Resistencia a la penetración, (b) Resistencia de roturación .....	53
<b>Figura 27.</b> Mapas campo 2; (a) Resistencia a la penetración y (b) Resistencia de roturación .....	53
<b>Figura 28.</b> Fuerza actuando en un elemento del anillo .....	66
<b>Figura 29.</b> Galgas extensiométricas .....	68
<b>Figura 30.</b> Puente de Wheatstone.....	70

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Etapas para la aplicación de AP.....	14
<b>Cuadro 2.</b> Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelo y atributos evaluados .....	31
<b>Cuadro 3.</b> Pesos para calibración.....	38
<b>Cuadro 4.</b> Pesos para calibración.....	40
<b>Cuadro 5.</b> Concentrado de ecuaciones de los modelos.....	51
<b>Cuadro 6.</b> Análisis de regresión lineal.....	51

## RESUMEN

MODELO ESTOCÁSTICO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN ENTRE  
SENSORES DE PENETRACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL PARA  
CARACTERIZACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA

POR

GILBERT FRESH LÓPEZ LÓPEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA –ASESOR–

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2017

La degradación estructural del suelo es causada por el uso excesivo de la labranza convencional provocando dependencia hacia ella, debido a la necesidad de elevar la calidad de cultivo y producción agrícola se han tenido que incorporar nuevas herramientas como la agricultura de precisión, la integración de tecnología beneficia en el diagnóstico de los sitios de trabajo. La presente investigación se desarrolló en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y tiene la finalidad de desarrollar una metodología de muestreo dinámico para generar un modelo de regresión que explique la variable de resistencia a la penetración del suelo (RP) en función de la resistencia de roturación (RR), y con ello optimizar los tiempos y caracterizar el sitio de trabajo. Se utilizó como herramienta el Carro-Porta-Sensores acondicionado para integrar linealmente tres cinceles: dos rectos en los cuales llevaron sensores octagonales de anillo extendido (OAE) para registrar la RR de las profundidades de 200-300 y 300-400 *mm* del suelo y uno curvo con alas de 150 *mm* roturando a una profundidad de 0-20 *cm* cuyo propósito es labrar a dicha profundidad. Además se empleó un penetrómetro de cono para el monitoreo de capas compactadas, asimismo se dispuso de un sistemas de adquisición de datos, GPS y tractor instrumentado para registrar los datos a 20 *Hz* en tiempo real. Utilizando la metodología de muestreo dinámico que consiste en el acondicionamiento del Carro-Porta-Sensores para conocer RR mientras que para RP se aplicó el método tradicional de un penetrómetro de cono el cual es costoso debido a que el muestreo es lento e impide caracterizar eficientemente el sitio de trabajo, y con un análisis de regresión se encontró la ecuación lineal  $RP=7.262 \times 10^{-4} RR$  que explica a la variable RP en función de RR, con un coeficiente de determinación de 0.8045. Con el acondicionamiento del Carro-Porta-Sensores permite generar una metodología de muestreo dinámico para conocer las fuerzas de reacción del suelo con sensores de alta sensibilidad, permitiendo minimizar tiempos con un modelo estocástico que explica la variable RP. Es necesario validar dicha ecuación con mediciones en diferentes suelos donde la cohesión osciló entre 10 hasta 60  $kNm^2$ .

**Palabras claves:** Agricultura de precisión; modelos estadísticos de regresión; sensores de fuerza; variabilidad del suelo.

**ABSTRACT**

ESTOCASTICO MODEL TO DETERMINE THE RELATIONSHIP BETWEEN  
VERTICAL AND HORIZONTAL PENETRATION SENSORS FOR  
AGRICULTURAL SOIL CHARACTERIZATION

BY:

GILBERT FRESH LÓPEZ LÓPEZ

MASTER OF SCIENCE IN  
PRODUCTION SYSTEM ENGINEERING  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA –ADVISER–

Saltillo, Coahuila

December 2017

The structural degradation of the soil is caused by the excessive use of the conventional tillage causing dependence towards it, due to the need to raise the quality of cultivation and agricultural production have had to incorporate new tools like the Precision agriculture, the integration of technology benefits in the diagnosis of work sites. This research was carried out at the Autonomous Agrarian University Antonio Narro and has the purpose of developing a dynamic sampling methodology to generate a regression model that explains the variable of resistance to soil penetration (RP). Depending on the resistance of the break (RR), and thereby optimize the times and characterize the work site. It was used as a tool the Car-Carrier-Sensors conditioned to integrate linearly three chisels: two straight in which they carried octagonal ring sensors extended (OAE) to record the RR of the depths of 20-30 and 30-40 cm of the ground and one Curved with wings of 15 cm breaking at a depth of 0-20 cm whose purpose is to carve at that depth. In addition, a cone penetrometer was used for the monitoring of compacted layers; a data acquisition system, GPS and an instrumented tractor were available to register the data at 20 Hz in real time. Using the dynamic sampling methodology that consists of the conditioning of the car-carrier-sensors to know RR while for RP the traditional method of a cone penetrometer is applied which is expensive because the sampling is slow and prevents Efficiently characterize the work site, along with a regression analysis found the linear type equation  $RP = 7.262 \times 10^{-4}RR$  that explains the RP variable as a function of RR, with a determination coefficient of 0.8045. With the conditioning of the Car-Carrier-Sensors allows generating a dynamic sampling methodology to know the forces of reaction of the ground with sensors of high sensibility, allowing minimizing times with a stochastic model that explains the variable RP. It is necessary to validate this equation with measurements in different soils where cohesion oscillated between 10 to 60 kNm<sup>2</sup>.

**Key words:** Force sensors; precision agriculture; regression statistical models; soil variability.

## INTRODUCCIÓN

Desde el surgimiento de la agricultura el manejo del suelo ha evolucionado con el propósito de mejorar la calidad de producto y producción agrícola, para satisfacer las necesidades alimenticias de los seres humanos. La evolución del tractor hacia mayores potencias, rapidez y confort, unido a los nuevos diseños de las herramientas, con mayores anchuras de trabajo, posibilitaron el progreso, priorizando la calidad de las labores sobre su costo, sin tener en cuenta el consumo de combustible. Esta evolución trajo como consecuencia la degradación estructural del suelo (compactación) teniendo como necesidad modificarla con labranza para erradicar esta problemática, posteriormente el costo creciente del combustible, la reducción de los precios de los productos agrarios y aspectos medioambientales, han ido llevando a una progresiva reducción de las labores, desde un objetivo de rentabilidad, buscando la mejor relación costo-beneficio, con el manejo apropiado de una misma labor agrícola puede conseguirse una disminución en el consumo de hasta un 30% (IDEA, 2006). La reducción de las labores se logra integrando tecnología conocido como agricultura de precisión (AP). La AP está basada en la existencia de la variabilidad edáfica lo cual requiere de la aplicación de distintas áreas de tecnología para estimar y evaluar dichas variaciones tales como sistema de posición global (GPS), sensores remotos y locales, así como sistemas de información geográfica (SIG) (Zhang *et al.*, 2002). Andrade *et al.* (2004) mencionan que la AP está siendo ampliamente difundida, incrementando el interés en el uso de sensores para la obtención de información de las variables del suelo y de los cultivos, muchos de estos sensores están integrados con un GPS para obtener los mapas de las diferentes variables. Dentro de la variabilidad en el rendimiento a menudo se considera esta la última variable dependiente, mientras que la mayoría de los demás tipos de variabilidad son considerados como variables independientes. La variabilidad independiente que más se ha estudiado hasta la actualidad es el nivel de fertilidad del nitrógeno del suelo. A decir verdad las tecnologías de dosificación variable para aplicaciones químicas que mayor desarrollo ha tenido son los aplicadores de fertilizante nitrogenados. Gracias a la AP es posible e importante realizar diagnósticos de las

propiedades físicas como variables independientes en la toma de decisiones para la optimización de energía en trabajos de labranza.

En la actualidad los investigadores junto con los alumnos del departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) se encuentran trabajando con AP en el desarrollando de un equipo para labranza vertical automatizada, y los avances de este equipo requiere un sistema de muestreo que permita conocer a que profundidades y georreferenciación se encuentran las capas compactadas, esta necesidad trajo el desarrollo de Carro-Porta-Sensores donde se puede diagnosticar las capas compactadas con un sensor penetrómetro de cono. Para conocer la resistencia a la penetración del suelo (RP) de cero a 40 cm con muestreo puntual teniendo alta confiabilidad para el diagnóstico del sitio de trabajo este es un método tradicional pero debido al tiempo de muestreo lento es necesario buscar alternativas. Ya que Taboada & Micucci (2004) mencionan que el drenaje rápido, la aireación y el crecimiento radical son los procesos más afectados cuando un suelo sufres deterioro estructural. Buscando opciones de muestreo dinámico para optimizar el tiempo, se obtiene método de resistencia de roturación de suelo (RR) con sensores octagonales de anillo extendido (OAE) debido a que Chug & Sudduth (2006), Andrade *et al.* (2007b) y Sudduth *et al.* (2008) mencionan que las mediciones convencionales con penetrómetros de cono son laboriosas; por lo tanto, un sensor de perfil de fuerza de suelo en movimiento que recolecta datos suficientemente densos para mostrar la variabilidad espacial dentro del campo en la resistencia del suelo sería una alternativa deseable. El propósito de esta investigación es desarrollar una metodología de muestreo dinámico que permita obtener un modelo estocástico que explique la variable RP en función de la variable RR con un coeficiente de determinación aceptable, partiendo que existe un grado de dependencia entre ambas variables para diagnosticar los sitios de trabajo con muestreo dinámico. La importancia de esta investigación es minimizar el tiempo en diagnóstico y contar con una mejor caracterización del sitio para posteriormente implementar el uso de labranza vertical automatizada con mapas de prescripción basados en la caracterización previa (mapas de diagnóstico).

## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar una metodología de muestreo dinámico en la cual se genere un modelo estocástico que explique la variable de resistencia a la penetración en función de resistencia de roturación, ubicando la profundidad de las capas compactadas con ello minimizar los tiempos y maximizar la caracterizar en el sitio de trabajo.

### **Específicos**

Acondicionar Carro-Porta-Sensores para alinear dos sensores Octagonales de Anillo Extendido, para coleccionar las fuerzas de reacción de las profundidades 20-30 y 30-40 cm.

## **HIPÓTESIS**

Existe un grado de dependencia entre las magnitudes de resistencia a la penetración y resistencia de roturación del suelo para diagnosticar los sitios de trabajo con muestreo dinámico.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Propiedades Físico-Mecánicas del Suelo

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. La condición física de un suelo, determina la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes. Se considera necesario para las personas involucradas en el uso de la tierra, conocer las propiedades físicas del suelo, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas, en qué medida y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles. (Rucks *et al.*, 2004).

El estudio de las propiedades físicas del suelo tiene un papel preponderante en la caracterización de su productividad. En particular, la compactación afecta negativamente tanto en forma directa como indirecta diversas propiedades del suelo como la estructura, la dinámica del agua y el aire así como procesos de oxidación reducción y poblaciones de organismos, por citar solo algunos ejemplos (Henríquez & Cabalceta, 1999; Porta *et al.*, 2003).

### Compactación de suelo

Por acción de presiones, una masa de suelo puede comprimirse, disminuyendo su volumen, modificándose el número y tamaño de los poros y aumentando la densidad aparente. Este proceso se conoce como compactación. Los cambios que ocurren establecen condiciones desfavorables para la conductividad hidráulica y la difusión de gases en la capa afectada. Todo el conjunto de disfunciones afecta el crecimiento de las plantas, en principio porque comprometen el desarrollo radical al aumentar la resistencia del suelo a ser horadado por las raíces (Atwell, 1993).

La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración y la densidad aparente y reduciendo la porosidad (Patterson, 1977). La compactación además reduce la velocidad de infiltración de agua, causa disminución en el drenaje, reduce la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y

oxígeno utilizado por las raíces, Al incrementarse la densidad del suelo se crea una barrera física que no permite que las raíces penetren adecuadamente (Patterson *et al.*, 1980).

### **Resistencia a la penetración**

La compactación de los suelos puede ser evaluada a través de varios parámetros. La medida de la resistencia mecánica a la penetración (RP) es una vía sencilla para detectar los cambios en el perfil que pueden relacionarse con la exploración de las raíces (Pires da Silva *et al.*, 2003). La variación espacial de la RP es más apropiada que la densidad aparente en la determinación de capas limitantes al crecimiento radical, porque presenta mayor sensibilidad en la detección de sectores diferenciados en grados de compactación (Jorajuria, 2004).

La resistencia a la penetración es un buen índice para evaluar problemas de restricción en el desarrollo radicular de las raíces de los cultivos, por la presencia de capas compactas y/o baja porosidad. El conocer las capas compactadas a diferentes profundidades es de vital importancia debido a que el crecimiento radicular se ve afectado significativamente a los 2 MPa, estos datos fueron encontrados por Taylor & Gardner (1963); Atwell (1993); Silva & Kay (1996); Raper *et al.* (2005a). La penetrabilidad del suelo permite conocer la facilidad con que un objeto puede ser introducido en él, es decir la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la expansión lateral y al corte que produce dicho objeto. Esa resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como densidad aparente, contenido de humedad, resistencia a la penetración y al corte, las cuales a su vez, son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo.

La resistencia mecánica del suelo es un importante parámetro que afecta el crecimiento de raíces, movimiento de agua y nutrientes. La manera más común para evaluar la resistencia del suelo es mediante el uso de un penetrómetro de suelo, el cual, caracteriza la fuerza necesaria para conducir el cono de tamaño específico en el suelo (Bradford, 1986). La resistencia a la penetración (RP) depende de las propiedades del suelo como son: densidad aparente, contenido de agua y la textura.

De León *et al.*, (1998), señalan que el penetrómetro es una de las herramientas más utilizadas en estudios de la calidad física del suelo. El diseño de penetrómetros con captadores de fuerza y de distancia conectadas a sistemas de adquisición de datos, permite conocer con gran rapidez la fuerza que opone el suelo a la entrada del cono. Varios autores han empleado la resistencia a la penetración como indicador de la compactación en suelos agrícolas.

### **Resistencia a la falla**

La determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, es uno de los puntos fundamentales de la Mecánica de suelos, ya que es imprescindible para la estabilidad de los suelos en las obras civiles.

Coulomb (1776), admitió que los suelos fallan por esfuerzo cortante a lo largo de planos de deslizamiento, luego entonces la presión ejercida y el área del plano de falla dan origen a la ley de resistencia, en la cual el suelo falla cuando el esfuerzo actuante alcanza un valor de corte, tal que: Esta proporción, está en función de un ángulo, al cual Coulomb llamo “Ángulo de fricción interna” y lo definió como una constante del material. Propone un mecanismo para estudiar la resistencia del suelo, que consiste en aceptar que dicho material falla por esfuerzo cortante a lo largo de un plano de deslizamiento. Observó que en dicho plano la resistencia al esfuerzo cortante, de cierto tipo de suelos, resultaba proporcional al esfuerzo normal actuante. Observó también que otros suelos como las arcillas saturadas, parecían tener una resistencia constante al esfuerzo cortante, independiente del esfuerzo normal aplicado. Otros suelos tenían un comportamiento intermedio, con una ley de resistencia al esfuerzo cortante.

### **Densidad aparente**

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al afecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate.

La densidad aparente ( $\rho$ ) puede ser incluida dentro del grupo mínimo de parámetros a medir para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo (Doran *et al.*, 1994).

### **Labranza**

La labranza es una actividad que modifica la estructura de la capa superficial del suelo. Sin embargo, existen efectos directos e indirectos que se logran con la labranza, entre los cuales se encuentran: facilitar la producción de los cultivos, el control de malezas, acondicionar la superficie del suelo para permitir una buena irrigación y una cosecha más fácil, además de facilitar la incorporación de materia orgánica, fertilizantes, pesticidas, entre otros (Hoogmoed, 1999).

El hombre incorpora la labranza cuando intenta controlar la vegetación natural, con el fin de poder desarrollar especies de su interés. Los principales objetivos de la labranza son el control de malezas, preparación de la cama de siembra y el acondicionamiento de las propiedades físicas del suelo (FAO, 2003).

La labranza es un proceso dinámico que causa profundos cambios en las propiedades físicas de los suelos, las cuales persisten por tiempo variable, dependiendo del suelo y del clima y pueden afectar fuertemente a los cultivos. Para describir estos cambios, pueden utilizarse propiedades dinámicas que reflejan la reacción del suelo a la aplicación de fuerzas como la resistencia a la penetración y densidad aparente. (Venialgo *et al.*, 2002).

#### **Labranza primaria**

La labranza primaria, es la labranza tradicional que se extiende a toda la capa arable, es decir, al horizonte A. Esta sirve para eliminar compactaciones superficiales, abrir el suelo y crear una estructura grumosa para acumular agua y muchas veces también incorporar, a través de la arada, plagas, malezas y semillas de malezas.

La profundidad de la labranza primaria depende de la fuerza de tracción disponible. Con tracción animal es normalmente entre 10 y 20 cm, con el tractor especialmente con el aumento de potencia de los tractores modernos, se llega en algunos países hasta 40 cm. Existe una amplia polémica sobre la profundidad de la labranza primaria. En general no

se debería aumentar la profundidad de labranza sólo porque se dispone de la potencia necesaria. En suelos con una capa de suelo delgada, esto puede literalmente destruir el suelo, lo que ocurre frecuentemente cuando se usan tractores. El incremento de cosecha que coincide a veces con una profundización de la capa arable, sólo en pocos casos es sostenible. Esto depende mucho de la fertilidad y la profundidad del suelo. Por otro lado, con una buena estructura del suelo las raíces de las plantas llegarán a las partes más profundas sin necesidad de una labranza profunda. A largo plazo, la labranza profunda consume más combustible mientras que los beneficios no están asegurados. (Friedrich, 1997).

### **Labranza secundaria**

La labranza secundaria sirve para preparar el suelo para la siembra. Esto incluye la formación de la superficie, la nivelación, la formación de camellones o surcos para irrigación y para establecer la cama de siembra. La cama de semilla debería extenderse solamente sobre un horizonte muy delgado hasta la profundidad prevista de la siembra. Normalmente la labranza secundaria nivela y pulveriza el suelo y una profundización de la misma solamente llevaría a una pérdida innecesaria de humedad. Cuando el suelo está todavía suelto hay que incluir también una re-compactación en la labranza secundaria. La creación de una cama de siembra tradicional surge a consecuencia de la insuficiencia de la técnica para sembrar en un terreno virgen. Hoy en día esta tecnología está suficientemente avanzada para permitir la siembra de la mayoría de los cultivos sin ninguna labranza. Además se debe considerar que la labranza secundaria deja, en un clima tropical, una superficie pulverizada en condiciones críticas con gran peligro de erosión. (Friedrich, 1997).

### **Sistemas de labranza**

Dentro de los sistemas de labranza están aquellos que hacen una remoción completa del suelo y en ocasiones una fragmentación excesiva de las partículas y no consideran la compactación del suelo, y que se conoce comúnmente como labranza tradicional. Por otro lado existe también el sistema de labranza de conservación, que se define como

cualquier secuencia de labranzas que reduce las pérdidas de suelo y agua, en comparación con las de labranza convencional (Allen & Fenster, 1986; Lal, 1995).

Steiner (1998) menciona que para muchos agricultores, antes de una conciencia conservacionista, la principal razón de adopción de los sistemas de labranza de conservación es la posibilidad de reducción de costos. Vivero (1998), señala que la escasa y fluctuante producción agrícola frente a un consumo creciente de alimentos obliga al productor agrícola a incrementar su producción con cultivos intensivos cada vez más mecanizados, con implementos inadecuados y en momentos inoportunos.

Para disminuir tales impactos y para un ahorro adecuado de energía se implementa la labranza vertical, que es parte de la labranza de conservación y ésta se puede realizar con implementos tales como los arados de cinceles, la cultivadora de campo, el vibro cultivador y el Multi-arado. El sistema de labranza a seleccionar debe además de incrementar los rendimientos del cultivo, reducir los riesgos de producción, facilitar la conservación de suelos y agua, mejorar el desarrollo del sistema radicular, mantener niveles adecuados de materia orgánica, y controlar o revertir procesos de degradación. Para ello es fundamental conocer los efectos de cada sistema de labranza, los cuales dependerán de factores climáticos, de suelos, y de cultivos. Un adecuado conocimiento de los suelos, clima y sistemas de cultivo utilizados por el agricultor, es indispensable para el desarrollo y selección de sistemas de labranza para cada situación (Boone, 1988).

### **Labranza vertical**

La labranza vertical se refiere a un sistema donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación (FAO, 2000). Por lo tanto, el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojo de más de 30% sobre la superficie, es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación (Agamennoni, 1996; Velázquez, 2011). La eficacia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibro-cultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos. Por consiguiente es posible preparar entre 50 hasta 80% más de

superficie por día con labranza vertical, si se la compara con labranza convencional (Barber *et al.*, 1993).

La principal característica de la labranza vertical es que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo sin invertirlo, dejando en la superficie una cobertura protectora formada por los residuos del cultivo anterior y por las malezas arrancadas (Barber *et al.*, 1993). En los Estados Unidos durante los años 1950 el arado convencional (vertedera y discos) empezó a ser reemplazado por el arado a cincel (Phillips & Young, 1973).

### **Uso de implementos para labranza vertical**

Los implementos para labranza primaria son principalmente de tres tipos básicos: arados de vertedera, de puntas estrechas e implementos de disco (Arvidsson *et al.*, 2004). Los implementos de labranza vertical de puntas estrechas demandan una menor cantidad de energía que los sistemas de labranza convencional (Hoogmoed, 1999; Camacho & Rodríguez, 2007). De acuerdo con Raper & Bergtold (2007), se puede hacer mucho para disminuir el costo de operaciones con labranza vertical vía reducción de uso de energía, seleccionando la adecuada geometría de los implementos, la adecuada profundidad de trabajo y humedad en el perfil del suelo. Entre los factores que inciden para que una herramienta de labranza requiera una menor o mayor fuerza de arrastre están, la humedad en el suelo al momento de la labor, el ángulo de inclinación entre la punta de la herramienta y el plano horizontal del suelo, el filo de la punta, el tipo de suelo, la profundidad y la velocidad de trabajo, así como la geometría de las partes y aditamentos del implemento y la configuración cuando se trata de una combinación de herramientas como en la siembra directa (Godwin & O'Dogherty, 2007).

Para cinceles y subsoladores es importante considerar el ángulo de ataque, ya que para un valor cercano 0.436 rad se presentan bajos valores de fuerza de tracción Aluko & Seig, (2000), así como la menor resistencia específica Magalhaes & Souza, (1990). Por otra parte, McKyes (1985) describe que para cinceles existe una profundidad de trabajo crítica, en la cual no existe remoción lateral de suelo, y que esta depende del ancho del implemento y de su ángulo de ataque, así como de la densidad y contenido de humedad del suelo. Para trabajar en profundidades mayores a la crítica, es recomendable el uso de

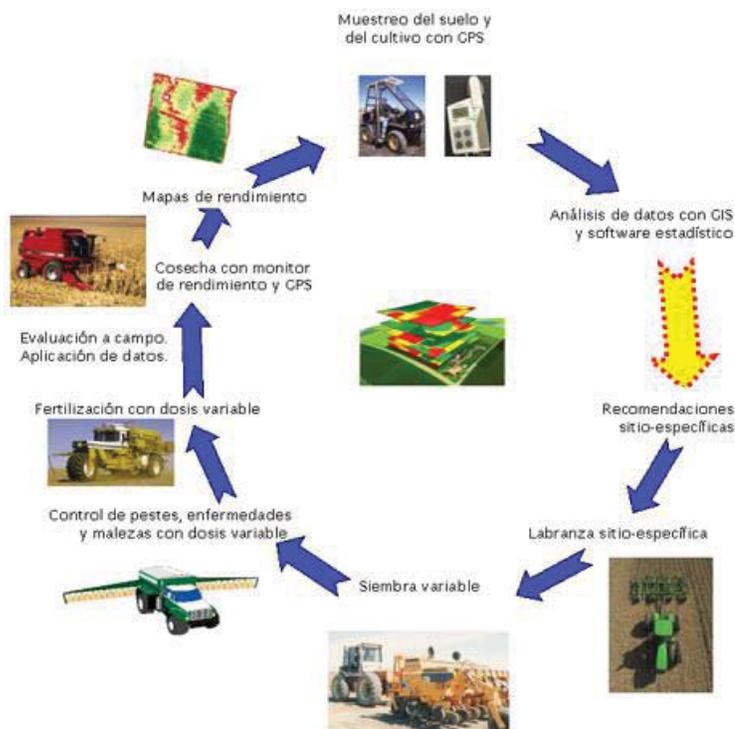
aletas laterales en la punta del cincel, lo cual reduce también la resistencia específica y favorece el ancho de trabajo y la eficiencia de campo.

### **Agricultura de precisión**

En las últimas dos décadas, gracias a la disponibilidad de las nuevas tecnologías geo-espaciales, se ha comenzado a administrar las explotaciones agrícolas de forma más precisa, recolectando y almacenando información espacial de diversas variables, como puede ser cultivo, suelo, altitud, clima y otros. Este conjunto de tecnologías que mejoran la gestión de la producción agrícola reciben el nombre de Agricultura de Precisión (AP) (Bramley, 2009).

La AP es una técnica para aumentar la productividad, rentabilidad, mediante la diferenciación de sectores “homogéneos”, busca dar un manejo diferenciado de manera que las áreas agrícolas expresen su máximo potencial (Ortega & Flores, 2008). La AP requiere información de posicionamiento satelital, no obstante ésta no indica lo que hay que hacer en el campo, sino que permite a través de ciertas herramientas dar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico más apropiado, tomando en cuenta el aspecto económico, productivo y ambiental.

Bragachini *et al.*, (2004) la AP es una tecnología que utiliza herramientas de información (figura 1); (basada en el posicionamiento satelital y que consiste en obtener datos georreferenciados en los lotes para un mejor conocimiento de la variabilidad de rendimiento, expresado por los cultivos en diferentes sitios como loma, media loma y baja loma y se obtiene mejor respuesta en lotes que posean alta variabilidad de potencial de rendimiento ya sea por relieve, historial del lote (secuencia de cultivos y fertilizaciones anteriores). También con esta tecnología es posible ajustar la mejor dosis de fertilización para cada sitio o lote específicamente, el mejor híbrido, variedad, densidad de siembra, espaciamento entre hileras, etc. Los beneficios se pueden resumir valorando el análisis y diagnóstico posible a realizar, partiendo de más de 800 datos de rendimiento por hectárea versus el análisis del promedio de rendimiento de todo un lote que ofrece la agricultura tradicional sin la ayuda del monitor de rendimiento satelital.



**Figura 1.** Herramientas para la AP

Bolstad, (2005). Menciona que dentro de la AP, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están integrados por un hardware y un software los cuales capturan y almacenan datos. Si bien la agricultura de precisión es un tema relativamente nuevo, se han logrado muchos avances, principalmente en el desarrollo de máquinas e implementos que permiten el manejo localizado en base a mapas. Los recursos más avanzados en tecnología de información hoy disponibles, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de control y adquisición de datos, sensores y actuadores, entre otros, están cada vez más presentes en el campo. A pesar de ese avance tecnológico, hay áreas que necesitan desarrollarse aún más para que la agricultura de precisión pueda consolidarse como una solución amplia y plenamente viable, para todos los segmentos de la agricultura.

La agricultura de precisión suele dividir este conjunto de tecnologías en tres grandes etapas:

- Recolección de datos
- Análisis
- Aplicación diferencial de insumo

El término AP se utiliza para referirse al manejo de los campos agrícolas de forma individualizada y específica. En la práctica se resume en “hacer lo correcto”, en “el lugar adecuado” y en “el momento preciso”, de forma automática, utilizando sensores, ordenadores y otros equipos electrónicos (Lowenberg, 2002). En el Cuadro (1), se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP las tecnologías involucradas y las actividades realizadas.

En base a ello, se define un ciclo de prácticas agrícolas orientado a sustituir la recomendación habitual de insumos en base a valores promedio, como ocurre en la agricultura tradicional, por una más precisa, con manejo localizado, considerando las variaciones del rendimiento en toda el área. Es una optimización del uso de los insumos porque deposita en el suelo la cantidad de semilla que cada punto soporta, la cantidad de nutrientes y agua requerida, y además el control de malezas, plagas y enfermedades se hace solamente en los puntos que lo demanden.

Bragachini (2010) La AP no es una agricultura en la que los satélites indican lo que hay que hacer en el campo; si no que permite a través de ciertas herramientas dar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico más apropiado, tanto desde el punto de vista económico-productivo como el ambiental, permitiendo:

- Reducir los costos en la producción
- Aumentar la productividad
- Hacer un uso más eficiente de los insumos

### **Impacto en el uso de la AP**

El impacto de las tecnologías de AP en la producción agrícola se espera en dos áreas: rentabilidad para los productores y beneficios ecológicos y ambientales para la sociedad. En la rentabilidad la AP permite un seguimiento preciso y fino de la producción agrícola. Las tecnologías de AP proporcionan a los agricultores la oportunidad de cambiar la distribución y el momento de fertilización y otros agroquímicos basados en la variabilidad espacial y temporal en un campo. Los agricultores pueden hacer análisis económicos basándose sobre la variabilidad de los rendimientos de los cultivos en un campo para obtener una evaluación precisa de los riesgos.

**Cuadro 1.** Etapas para la aplicación de AP

<b>Etapa</b>	<b>Tecnología involucrada</b>	<b>Actividades</b>
<b>Recolección e ingreso De datos.</b>	Sistemas de posicionamiento global (GPS).	Muestreo de suelos Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades.
	Sistemas de información geográfica (SIG).	Monitoreo de rendimientos. Medición directa de propiedades del suelo y cultivos.
	Instrumentos topográficos. Sensores remotos. Sensores directos.	Sensoria-miento remoto de suelos y cultivos. Digitalización de mapas.
<b>Análisis, procesamiento e interpretación de la información.</b>	Programas SIG	Análisis de dependencia espacial.
	Sistemas expertos Programas estadísticos	Confección de mapas de evaluación prescripción.
<b>Aplicación diferencial de insumos.</b>	Tecnología de dosis variables.	Aplicación variable de nutrientes y de plaguicidas.
	Pulverización asistida por GPS. Programa computacional	Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas.

Al conocer el costo de los insumos, los agricultores también pueden calcular el retorno de efectivo sobre los costos por cada hectárea. Ciertas partes dentro de un campo, que siempre producen por debajo de la línea de equilibrio, pueden ser aisladas para el desarrollo del plan de manejo de sitio específico. Los beneficios económicos resultantes de la AP, sin embargo, han demostrado ser difíciles de medir (Lowenberg-DeBoer, 1997), Griffin *et al.* (2000). La tecnología de tasa variable (VRT), la VRT en comparación con la tecnología de tasa uniforme (URT) para la aplicación de fósforo en

un arroz y rotación de soya en Arkansas, encontraron que la rentabilidad de la VRT fue altamente sensible a tanto P residual y el contenido de arcilla del suelo. Incluso cuando la VRT se encontró rentable en campos, que cambian de URT a VRT durante un horizonte de planificación de 10 años, pueden ser no aconsejables, ya que el aumento de los ingresos procedentes de los rendimientos no cubre el costo de la aplicación de VRT. Si un enfoque integral de la explotación, que toma todas las actividades de cultivo y las limitaciones de recursos en cuenta, es una adaptación de tecnología de AP y puede llegar a ser beneficioso para mejorar el potencial de ganancias y para reducir los riesgos (Oriade & Popp, 2000).

En lo que se refiere al medio ambiente en algunos países como Estados Unidos, Australia, Reino Unido, Dinamarca y Alemania han desarrollado leyes ambientales estrictas para reducir el uso de agroquímicos. Con la AP se ha reducido considerablemente el uso de estos productos al ser aplicados con mayor eficiencia al suministrarlos en la dosis óptima y en las áreas donde se requiere. Sin embargo los beneficios ambientales que conlleva la práctica de la AP no han sido medidos sistemática y cuantitativamente.

Algunos investigadores han publicado evidencias positivas. En los sistemas de producción como la papa, la lixiviación de nitratos ha sido uno de los principales problemas. Un estudio realizado en dos campos adyacentes, uno tratado de forma tradicional en la fertilización nitrogenada y el otro con tecnologías de dosificación variable (TDV), ha demostrado el efecto de las TDV al reducir la contaminación de los mantos acuíferos. Con la disponibilidad de datos topográficos para campos implementados con tecnologías de AP, se puede analizar la interacción entre labranza y erosión y por ende reducir la erosión.

### **Aplicación de la AP**

La investigación de la AP se inició en los EE.UU., Canadá, Australia y Europa occidental a mediados o finales de 1980. Aunque un considerable esfuerzo de investigación ha sido gastado, solo una pequeña parte de los agricultores han practicado algún tipo de tecnologías de la AP. La implementación de la AP ha sido principalmente a través de la utilización de la maquinaria de campo existente, mediante la adición de controladores y GPS para permitir las aplicaciones espacialmente variables. Hasta la

fecha, el líder de la aplicación de AP todavía es la aplicación específica en sitio de fertilizantes. En Australia, el monitoreo y mapeo de la variabilidad espacial en el cultivo de granos pequeños, han recibido mucha publicidad. Los monitores de rendimiento de cultivos están disponibles para la papa, cosechadoras de maní y forraje y todavía está en desarrollo para las cosechadoras de algodón. El número total de monitores de rendimiento granos que operan en Australia está por debajo de 200 en la actualidad, en comparación con EE.UU., que tiene entre 5000 y 10 000 unidades operativas (mitad con capacidad de DGPS).

El movimiento hacia AP en Australia se considera no fuerte (Whelan *et al.*, 1997). En Japón, el Ministerio de Agricultura ha comenzado a invertir en proyectos de investigación de AP, centrándose en la detección y los controles relacionados con la mecanización agrícola. Japón es caracterizado por una agricultura a pequeña escala y de mano de obra en base a manejo por individuo de la planta. La agricultura japonesa se ha enfrentado a muchos problemas graves durante las dos últimas décadas, incluyendo excedentes de arroz a la producción, la reducción rápida en la fuerza de trabajo en la agricultura, cambio de grupo de edad de los agricultores, y las crecientes preocupaciones ambientales. La agricultura japonesa es diversa en el tamaño del campo, la variedad de cultivos, la elevación del campo, el esquema de gestión de agua, el clima, el suelo, y similares. Se creía que las tecnologías de AP pueden encajar en diferentes escalas de granja, solo después de una reorganización de la estructura de la agricultura (Shibusawa, 1998). A pesar de que la mayoría de los experimentos AP se concentraron en aplicaciones VRT de fertilizantes y herbicidas, diversos tipos de tecnologías de AP han sido experimentados en todo el mundo. Los informes sobre experimentos AP en China, Corea, Indonesia, Bangladesh, Sri Lanka, Turquía, Arabia Saudita, Australia, Brasil, Argentina, Chile, Uruguay, Rusia, Italia, Países Bajos, Alemania, Francia, Reino Unido, Estados Unidos y Canadá han sido encontrados en la literatura reciente.

La tecnología VRT reciente ha sido probado con éxito en la región sureste de los EE.UU. (Heiniger & Meijer, 2000). La tecnología VRT también fue probada en los híbridos de maíz y la densidad de siembra en Colorado (Shanahan *et al.*, 2000). Bauer *et al.*, (2000). Las pruebas de campo realizadas en Missouri para determinar las densidades de siembra óptimas en diferentes campos. Un experimento similar realizado en Kansas

no mostró ningún beneficio económico mediante la variación de la tasa de plantación (Zhang *et al.*, 1999). En California, se está evaluando los potenciales de las tecnologías de la AP en la producción de arroz a través de un estudio intensivo (Roel *et al.*, 2000). También en California, un experimento fue llevado a cabo para estudiar la viabilidad de las tecnologías de la AP en la producción de tomate (Rosa *et al.*, 2000). En Costa Rica, se llevó a cabo un experimento para aplicar las tecnologías de la AP en una plantación de plátanos.

El sistema permite a los agricultores vincularse a una base de datos de suelos y tomar decisiones específicas del sitio sobre la fertilidad y los problemas relacionados con las enfermedades del suelo a través de monitoreo de rendimiento. Un sistema de cable se utiliza para sustituir los caros sistemas de DGPS (Stoorvogel & Orlich, 2000). Johnson & Bradow (2000) estudiaron los efectos de una serie de propiedades del suelo, incluyendo Mn del suelo, Mg y K, en la calidad de la fibra de algodón en Luisiana y se cree que Tecnologías de AP pueden aplicarse para mejorar la calidad.

Giménez & Lamothe (2000) llevaron a cabo un experimento de campo en Uruguay para evaluar el beneficio de sitio específico en manejo de Zn y concluyó que el beneficio obtenido por la VRT en la aplicación Zn puede llegar a \$ 50 por hectárea. La AP también fue utilizada para optimizar las operaciones de riego. En Carolina del Sur, el estrés de agua en la planta se controló utilizando termómetros infrarrojos en un sistema de riego de pivote central para controlar el funcionamiento del sistema (Evans *et al.*, 2000). En Arizona, Adamsen *et al.* (2000) estudiaron los sistemas de riego por gravedad y se encontró que la aplicación de agua es inherentemente no uniforme en estos sistemas debido a la variabilidad espacial y temporal de las características de infiltración del suelo.

Por lo tanto, el ajuste del diseño físico del sistema de riego o el desarrollo de manejo de prácticas específicas para campos individuales puede llegar a ser beneficioso para los agricultores. McKinion *et al.* (2001) aplicaron un enfoque de AP a la producción de algodón en Mississippi para automatizar el cálculo de agua óptima y dosis de N. Ellos creían que la AP, junto con los modelos de simulación de cultivos y SIG pueden optimizar los rendimientos y reducir al mínimo las entradas de agua y nitrógeno. El Control de plagas de sitio específico ha sido probado en diferentes cultivos. En el Reino

Unido, el potencial para variar la tasa de nematocidas en los campos de papa fue estudiado por (Stafford & Evans, 2000). El Control del sitio específico de gusanos de la raíz del maíz del norte se estudió en el sur de Dakota (Ellsbury *et al.*, 2000). McLaughlin *et al.*, (1998) utilizaron sensores para la toma de fuerza en un enganche de tres puntos de un tractor para registrar los datos de la fuerza de tiro e hizo un mapa de labranza - energía en Ontario, Canadá.

Estos mapas pueden proporcionar una capa de mapa adicional, de bajo costo para obtener información relacionada con el suelo para aplicaciones de AP. La fuerza de tiro sobre un arado de vertedera fue grabado por Hayhoe *et al.* (2000). Ellos aplicaron el análisis de Fourier sobre las señales periódicas de fuerza y encontraron que componentes de baja frecuencia de las señales pueden estar relacionados con la variabilidad espacial local en las propiedades físicas del suelo, tales como la humedad del suelo, la textura del suelo, la materia orgánica y fuerza / compactación del suelo.

En Wisconsin, Schuler & Lowery (2000) utilizan un sensor TDR en subsolador para medir el contenido de humedad del suelo, mientras que en el subsolado. La señal fue utilizada para controlar la profundidad de funcionamiento del subsolador para que coincidiera con diferentes condiciones del suelo. Tecnologías de AP se experimentó en el heno y la producción de forraje en Quebec, Canadá. Los sensores que miden continuamente los pesos en la empacadora y el carro de arrastre y los sensores que miden simultáneamente flujo de masa y contenido de humedad se ensayaron. El desarrollo exitoso de estos sensores puede permitir varias aplicaciones de AP, incluyendo la selección de cultivares, la optimización de heno o ensilado, mapeo de rendimiento y el manejo del cultivo de forraje. Tecnologías de AP también se han utilizado en la producción de bosque. En Washington, el GPS receptores y registradores de datos se utilizaron para rastrear las actividades de máquinas cosechadoras (Reutebuch *et al.*, 1999).

### **La tendencia de la AP**

En 1998, una encuesta a nivel nacional se llevó a cabo por el USDA sobre casi 8,500 productores agrícolas en los EE.UU. De acuerdo con los resultados de la encuesta, se estimó que, antes de 1998, solo cuatro por ciento de todas las granjas utilizan una o más tecnologías de AP para la producción de cultivos. Sin embargo, hay una variación

significativa en las tasas de adopción por tecnología específica, región, tamaño de la explotación, tipo de explotación y las características del operador. Las tecnologías más ampliamente adoptadas fueron de muestreo con cuadrícula (el 2% de todas las explotaciones) y VRT para fertilizantes (2%), seguido de control de rendimiento (1%) y mapeo de rendimiento (1%). La tecnología variable de semillas y aplicación de plaguicidas y de teledetección (sensores remotos) se utilizan solo con menos de 1% de todas las fincas.

El tamaño de la explotación, medido en términos de las ventas brutas, fue una correlación positiva con la tasa de adopción. Se encontró que las granjas de granos / semillas de oleaginosas tuvieron la mayor tasa de adopción (14%), principalmente debido a la amplia disponibilidad de producir monitores. El índice de adopción de las frutas especializada, vegetal, y las granjas de nueces es del 5%. La principal tecnología de AP utilizadas en estas explotaciones eran VRT para el control de plaguicidas (Daberkow & McBride, 2000).

Cook *et al.* (2000) encontraron que los agricultores de Australia están adoptando tecnologías AP más lentamente de lo esperado. Ellos atribuyen la lenta adopción a cuatro factores: (1) el costo de adopción, (2) la falta de percepción del beneficio de la adopción, (3) falta de voluntad para llegar temprano a los adoptantes, y (4) la falta de mecanismo de entrega de tecnología. Aunque el costo, la falta de percepción del beneficio, y el conservacionismo entre los agricultores, de hecho haber causado la lentitud en la adopción, el problema en la entrega de las tecnologías de la AP a los agricultores ha sido identificado como el principal obstáculo. La entrega de las tecnologías de AP para los agricultores requiere conocimientos y habilidades que la mayoría de las agencias de consultoría en la actualidad no poseen. El conservacionismo del sector de la consultoría parecía crear más dificultades que el conservacionismo de los agricultores en la adopción de tecnologías de la AP. En el Reino Unido, una encuesta fue realizada entre el 25% de los cerca de 350 agricultores que son actualmente los que realizan mapas de rendimiento a través de GPS.

Los resultados de la encuesta mostraron que los adoptantes de mapeo de rendimiento han pasado la primera fase de captación inicial y entusiasmo y ahora están de pie en la segunda etapa de la implementación de la AP. Los agricultores que adoptan mapeo de

rendimiento están en las necesidades urgentes de los buenos consejos de agrónomos sobre la interpretación de los mapas de rendimiento y su conversión en la gestión de planes. La Información de mapeo de rendimiento tiene que integrarse con sistemas de apoyo y decisiones para las granjas agrícolas (Griffin *et al.*, 2000). Un estudio similar realizado en Arkansas indicó que los primeros en adoptar la AP representan menos del 20 por ciento de los agricultores de Arkansas. Estos adoptantes son jóvenes, educados, utilizan un ordenador o equipo de cómputo y agricultores experimentados, con una gran cantidad de superficie de cultivo dedicada principalmente al cultivo de arroz y la soja. Mientras que los representantes del sector agrícola están ayudando a promover tecnologías de AP. Personal del Servicio de Extensión Cooperativa ha servido como la principal fuente de consulta técnica.

Los agricultores están a la espera de los resultados de investigación en la rentabilidad de las distintas tecnologías AP antes de aumentar su inversión de manera significativa a adoptar más tecnologías (Popp & Griffin, 2000). Los siguientes obstáculos que hay que superar antes de que las tecnologías de AP puedan ser ampliamente implementadas en un ritmo rápido:

- 1) Desbordamiento de datos para el manejo agrícola. Este problema tiene que ser superado por el desarrollo de herramientas de integración de datos, sistemas expertos y sistemas de soporte de decisiones.
- 2) La falta de procedimientos racionales y estrategias para la determinación de los requisitos de aplicación de forma localizada y la falta de pruebas en paralelo científicamente validada para los supuestos beneficios para el concepto de AP.
- 3) Mano de obra intensiva y costosa recopilación de datos. El desarrollo de detección rápida de sistemas debe tener lugar antes de que la AP pueda ser una práctica generalizada.
- 4) La falta de canales de transferencia de tecnología y personal. Los programas educativos con participación de investigadores, industriales, especialistas en extensión y consultores son urgentemente necesarios.

La Tecnología de AP probablemente debe ganar más reconocimiento cuando los beneficios adicionales, tales como cargas ambientales reducidos y aumento del flujo de información, se reconocen como un parte de su recompensa (Auernhammer, 2001).

## Variabilidad del Suelo

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo dentro de los campos agrícolas es inherente a la naturaleza geológica de la formación de suelo, pero en algunos casos la variabilidad puede ser inducida por la labranza y otras prácticas de manejo. Estos factores interactúan unos con otros, a través de escalas espaciales y temporales, y se modificarán una vez más a nivel local por los procesos de erosión deposición (Iqbal *et al.*, 2005).

La variabilidad de las propiedades físicas del suelo es generada por la intensidad de los procesos formadores del suelo y la influencia de factores antrópicos. Comprender la distribución espacial de estas propiedades, facilita las decisiones de manejo tomadas a partir de herramientas de información geográfica, las cuales permiten el manejo de cultivos a través de zonas de manejo agrícola o agricultura de precisión y manejo por sitio específico (Cruz *et al.*, 2010). La caracterización de los patrones espaciales de variabilidad es de creciente interés para determinar los niveles de precisión con los cuales pueden predecirse los atributos de suelo a diferentes escalas (Figura 2). La asociación espacial entre estos atributos y rendimiento de los cultivos es necesaria en la aplicación de insumos en forma variable o tecnología manejo sitio-específico (MSE). Esta tecnología se fundamenta en la capacidad de reconocer la heterogeneidad dentro del lote de producción y adecuar el uso de insumos para cada unidad reconocida.

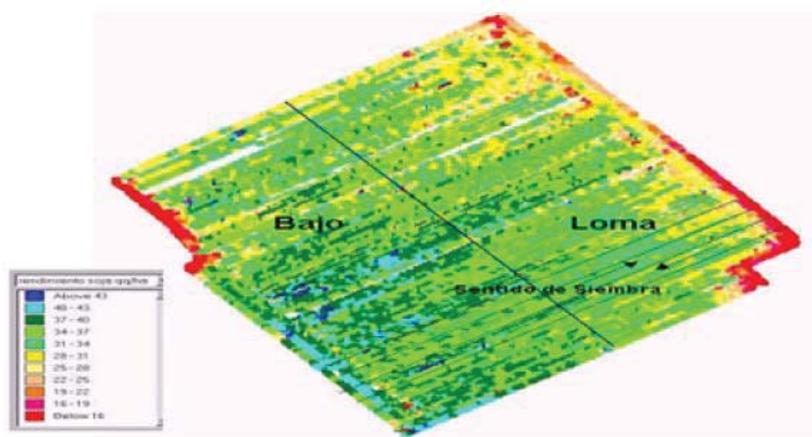


Figura 2. Mapa de variabilidad del suelo en siembra

### **Clasificación de la variabilidad**

La variabilidad que tiene un efecto considerable en la producción agrícola; se puede clasificar en seis grupos:

1. Variabilidad de rendimiento: Está dada por la distribución de los rendimientos históricos y actuales.
2. Variabilidad del terreno: Esta dada principalmente por su topografía, pendiente, aspecto y la cercanía al límite del terreno y arroyos.
3. Variabilidad del suelo: La fertilidad del suelo o su contenido de N, P, K, Ca, Mg, C, Fe, Mn, Zn, y Cu; las propiedades físicas del suelo (textura, densidad, resistencia mecánica, contenido de humedad y conductividad eléctrica); propiedades químicas (pH, materia orgánica, salinidad, y capacidad de intercambio catiónico); disponibilidad del agua del suelo para las plantas, capacidad de retención de humedad, conductividad hidráulica y profundidad del suelo.
4. Variabilidad del cultivo: Densidad de plantas; altura de plantas; deficiencias de N, P, K, Ca, Mg, C, Fe, Mn, Zn, y Cu; estrés hídrico; propiedades fisiológicas (índice de área foliar), captación de la radiación fotosintéticamente activa y biomasa, contenido de clorofila de las hojas, y calidad de grano.
5. Variabilidad en factores externos: Infestación por malezas, insectos, nematodos, enfermedades, daño por viento y daño por acolchados.
6. Variabilidad en el manejo de cultivo: Prácticas de labranza, semillas mejoradas, densidad de siembra, rotación de cultivos, aplicación de fertilizante, y sistema de riego. Dentro de estos tipos de variabilidad, la variabilidad en el rendimiento a menudo se considera la última variable dependiente, mientras que la mayoría de los demás tipos de variabilidad son considerados como variables independientes. La variabilidad independiente que más se ha estudiado hasta la actualidad es el nivel de fertilidad del nitrógeno del suelo. A decir verdad las tecnologías de dosificación variable para aplicaciones químicas que más desarrollo ha tenido son los aplicadores de fertilizante nitrogenados.

### **Tratamiento de la variabilidad**

La gestión de la variabilidad se puede lograr mediante dos enfoques: en base a un mapa y en base a un sensor. Con las tecnologías disponibles de GPS, percepción remota, monitoreo de rendimiento y muestreo de suelo, la opción en base a un mapa normalmente es más fácil de implementar. Esta opción requiere del siguiente procedimiento: muestreo del suelo, analizar las muestras de suelo en laboratorio, generar un mapa de sitio específico y por último usar este mapa para controlar un dispositivo de dosificación variable. Para esta propuesta normalmente se requiere de un sistema de posicionamiento, como el GPS. Por otro lado, la opción basada en el uso de un sensor, mide las propiedades deseadas como las propiedades del suelo y planta usando sensores en tiempo real y de forma dinámica, controla dosificadores variables basados en las mediciones. Para los sensores no siempre es necesario un dispositivo de posicionamiento.

La mayoría de los sistemas de AP experimentales son sistemas en base a un mapa, porque la mayoría de los sensores en tiempo real para el monitoreo del campo, suelo y variabilidad del terreno son muy caros, no muy precisos o no están disponibles. Las bases de datos espaciales han sido generadas usando varios sistemas SIG integrando mapas derivados de sensores remotos, muestreo de suelo, monitoreo de rendimiento y varios sensores. Para analizar la variabilidad espacial y temporal se usan métodos geoestadísticos avanzados. Se han integrado técnicas de modelado de cultivo para desarrollar mapas de potencial productivo que sirvan de referencia para la prescripción de fertilizantes. Estos mapas se pueden usar para predecir la variabilidad en el crecimiento del cultivo y enfermedades basados en condiciones climáticas proyectadas. Para esto, la AP proporciona una herramienta ideal para la evaluación del riesgo agrícola y la planificación del trabajo de campo de forma racional.

### **Estadística en la variabilidad**

Los estudios que caracterizan el suelo también analizan diferentes atributos biológicos, físicos, químicos, hídricos y mineralógicos, descritos habitualmente por medio de técnicas estadísticas univariadas, con un número reducido de muestras. Esta técnica

limita las interpretaciones y las conclusiones, por no explorar la existencia de dependencia conjunta entre las variables analizadas (Fidalski *et al.*, 2007).

Para estudiar esta dependencia, es necesario un número considerable de ediciones, referenciadas geográficamente, en diferentes puntos y profundidades del lote, con el fin de caracterizar adecuadamente el suelo mediante la utilización de herramientas geoestadísticas y multivariadas, las cuales permiten estimar y deducir la distribución espacial de las propiedades del suelo (Cruz *et al.*, 2010)

En geoestadística se utilizan dos modelos teóricos de semivarianza, acotados (modelo esférico, exponencial y gaussiano) y no acotados (lineal, logarítmico y potencial). Estos modelos de semivarianza son producto de la representación de valores de cada región de muestreo frente a una distancia media, ajustados a modelos teóricos para ayudar a describir su comportamiento en distancias mayores y puntos no conocidos. Una vez ajustados los datos a modelos de distribución espacial, se procede a realizar mapas de interpolación para los cuales se selecciona la interpolación de Kriging, la cual encierra un conjunto de métodos de predicción espacial y se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Carvalho, 2004).

### **Manejo de Sitio Específico**

Las aplicaciones de insumos agrícolas por sitio específico se pueden implementar dividiendo un campo en zonas más pequeñas; que sean más homogéneas en las propiedades de interés que el campo en su totalidad. Un manejo de sitio específico se define como una porción del terreno que tiene una combinación homogénea de factores limitantes del rendimiento para los que se requiere de una dosis de un insumo agrícola en específico (Doerge, 1998). Así, el manejo de sitio específico en un campo puede ser diferente para los diferentes insumos. El manejo de un sitio puede ser delimitado por más de un insumo agrícola. En este caso, se aplica una dosificación simple para cada insumo dentro del sitio. El número de los diferentes sitios dentro de un mismo campo está en función de la variabilidad natural del campo, la extensión del terreno y ciertos factores de manejo. El tamaño mínimo de un sitio está limitado por la habilidad del agricultor para diferenciar regiones dentro de un campo. Si se utiliza un GPS para controlar la aplicación o para guiar el implemento, entonces no hay razón para restringir

la forma del sitio. Sin embargo, en realidad, cuando se delimitan los sitios específicos se debe considerar el patrón que seguirá el equipo de aplicación en el campo (Kvien & Pocknee, 2000).

El concepto de manejo de zona puede ser percibido como un retroceso desde el concepto inicial de la AP “la agricultura a pie”. Sin embargo, las zonas de manejo son más prácticas de implementar. La delimitación de zonas de manejo implica filtrado espacial para reducir los efectos del ruido en las mediciones de los factores individuales. La eliminación del exceso de detalles en la variabilidad dentro de campo simplifica las formas de las zonas y, por lo tanto, reduce los requisitos para el equipo VRT. Chang *et al.* (2000) compararon diferentes enfoques para clasificar las zonas de manejo de nutrientes. Zhang & Taylor (2000) introdujeron los métodos de delimitación de zonas de manejo utilizando herramientas de filtrado espacial morfológico-y filtrado de herramientas espaciales.

En la tecnología MSE es imprescindible delimitar áreas homogéneas de manejo dentro del lote y se requieren mapas a escalas de elevado detalle (e.g. 1:1200 a 1:8000). El uso de metodologías de relevamiento tradicionales sería muy costoso para adecuar los mapas de suelos disponibles. La utilización de otras fuentes de información, tales como mapas de rendimiento e imágenes satelitales de varios años son valiosos para delimitar con mayor precisión las unidades cartográficas.

El valor de la información recolectada por los monitores de rendimiento radica en su elevado nivel de detalle. Sin embargo, la utilización de los mapas de rendimiento como única herramienta para delimitar áreas homogéneas de manejo puede ser poco consistente cuando se desconocen las fuentes de variabilidad de los mismos entre años (Gutiérrez, 2012).

### **Diseño de Transductores de Fuerza**

Los transductores de fuerza son ampliamente usados en el campo de la industria y las investigaciones, presentando muchas configuraciones en equipos comerciales. Básicamente están compuestos por: una pieza monolítica conocida como elemento elástico y por extensómetros eléctricos que permiten medir, en el área de colocación de los mismos, los niveles de deformación preferiblemente uniformes, que experimenta el

transductor bajo la acción de una fuerza aplicada. Estos son diseñados, para que a fuerzas relativamente bajas permitan altos niveles de deformación, siendo precisamente el elemento elástico el componente más críticos del transductor (Martínez, 2008).

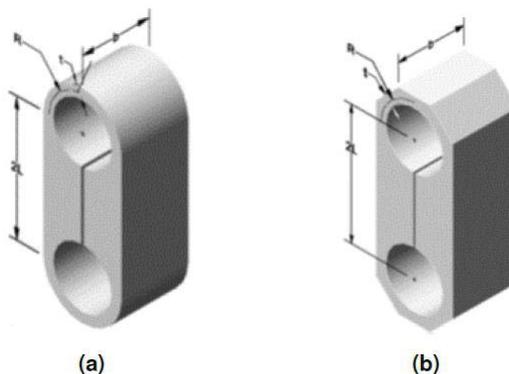
### Análisis teórico del diseño del transductor de anillo

Cook & Rabinowicz (1963) desarrollaron un transductor de anillo extendido obteniendo, como resultado de este análisis, las dos colocaciones de nodo de deformación son: ( $\theta = 39.6$ ) para la fuerza ( $F_x$ ) y ( $\theta = 90$ ) para la fuerza ( $F_y$ ). Para mayor información sobre el diseño y del octagonal de anillo extendido se presenta en el anexo (1)

### Sensores de anillo extendido

Los transductores octagonales de anillo extendidos han sido desarrollados como los que se muestran en la figura (3); tanto el anillo extendido y anillo octagonal extendido deben tener una sección central donde los accesorios de carga pueden ser atornillados. Las galgas extensiométricas (anexo 2), están montadas en las secciones más delgadas de anillo para la medición de fuerza. (Hoag & Yoerger, 1975).

La idea de emplear anillos octagonales extendidos (EOR siglas en ingles) en un sistema de medición fue introducido por primera vez por (Lowen et al., 1951). Hoag & Yoerger (1975) derivaron ecuaciones analíticas de distribución de fuerzas para transductores simples y octagonales de anillos extendidos para diferentes cargas y condiciones límites utilizando el método de tensión de energía.



**Figura 3.** Transductor de tipo anillo. (a) Anillo liso extendido; (b) anillo octagonal extendido

Godwin (1975) diseñó un transductor octagonal de anillo extendido para medir las fuerzas de reacción del suelo utilizando herramientas en dos direcciones, así como el momento en el plano de estas fuerzas. El reportó una buena linealidad, baja sensibilidad cruzada y la histéresis para el transductor. También encontró que las sensibilidades prácticas de las galgas extensiométricas fueron muchos mayores que los valores obtenidos a partir de ecuaciones analíticas vistas en anexo (3).

O'Dogherty (1975) diseñó un transductor para determinar las fuerzas de corte y verticales usando una cuchilla en remolacha azucarera utilizando el anillo octogonal extendida. Informó de una buena linealidad, baja histéresis en ciclos de carga y descarga, y sensibilidades cruzadas entre 4.1 y 6.5% para las fuerzas de corte y vertical respectivamente, en el proceso de calibración del transductor.

Godwin *et al.*, (1993) diseñó un dinamómetro utilizando dos EOR para medir las fuerzas y momentos ejercidos en herramientas de labranza. Utilizaron dos EOR en configuración espalda con espalda, donde los ejes longitudinales formaban ángulos de 90. Ellos reportaron una excelente linealidad entre las fuerzas y momentos aplicados, y la salida de voltaje en el puente, una pequeña cantidad de efecto de histéresis entre carga y descarga de las curvas de calibración, así como, una sensibilidad cruzada menor del 4 %.

McLaughlin *et al.*, (1998) diseñó y fabricó un octagonal de doble anillo extendido (DEOR por sus siglas en inglés) acoplado a una barra de tiro. Ellos calibraron el transductor utilizando métodos de carga uniaxiales y triaxiales. Los autores derivaron la regresión de un modelo para predecir las fuerzas de tiro, verticales, y las cargas laterales, e informó de la sensibilidad cruzada del sensor de 1.9 y 7.0% para el las fuerzas de tiro y verticales respectivamente.

### **Sistema de adquisición de datos**

Los sistemas de adquisición de datos se utilizan para medir y registrar señales obtenidas básicamente de dos maneras: a) aquellas que se originan a partir de la medición directa de cantidades eléctricas, que pueden incluir voltaje de corriente directa (CD) y corriente alterna (AC), frecuencia o resistencia; suele hallarse en las áreas de prueba de componentes electrónicos, estudios ambientales y trabajos de control de calidad. b).

Señales que se originan a partir de transductores, como galgas extensiométricas y termopares.

Campos *et al.*, (2000), describen la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización. Se puede decir que la mayoría de los sistemas de medición se pueden dividir en tres partes:

1. Etapa detectora-transductora, detecta la variable física y efectúa una transformación, ya sea mecánica o eléctrica para convertir la señal de una forma más manejable. Generalizando el concepto, un transductor es un dispositivo que transforma el efecto físico en otro, en gran mayoría de los casos, la variable física se transforma en una señal eléctrica, ya que ésta es la forma de señal más fácilmente medible.
2. Etapa Intermedia, modifica la señal que proviene del transductor, ya sea por amplificación, filtrado u otros medios para tener una salida deseable.
3. Etapa final o terminal, indica, graba o controla la variable que se desea medir.

En cuanto al hardware en varias investigaciones se puede identificar en todas y cada una de ellas, un sistema de acondicionamiento de señales provenientes de los sensores de fuerzas, un sistema convertidor analógico al digital y software para su funcionamiento (Moo, 1999).

El anterior sistema permite reproducir en términos de energía lo que está sucediendo en interacción suelo herramienta. Moo (1999) desarrollo un sistema de adquisición de datos para laboratorio y campo, que permite evaluar el desempeño de los implementos de labranza, además muestra el diseño de medidores de velocidad y desplazamiento. Campos (1993) menciona que dentro de la adquisición de datos en laboratorio, se cuenta con un tanque de suelos, el cual el sistema y los transductores se adaptan a éste. Y para el análisis de información proveniente de los procesos de muestreo (conversión analógica a digital) se utiliza la metodología del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de la potencia espectral.

Lickso & Harrison (1988) y Campos (1995) describieron la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de la fuerza de reacción del suelo, que

incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización, acondicionadores de señales y convertidores analógicos digitales.

Kheiralla & Azmi (2002), desarrollaron un sistema completo de adquisición de datos de instrumentación y fue desarrollado e instalado en un tractor Massey Ferguson 3060 para poder mapear la demanda de energía en la operación de campos agrícolas en Malasia.

El sistema de instrumentación, es capaz de medir y visualizar información sobre la velocidad del motor, la velocidad de toma de fuerza, velocidad de avance, deslizamiento de las ruedas de accionamiento, acres trabajado, el consumo de combustible por hora, el consumo de combustible por hectárea, acres por hora, factor de costo, combustible consumido, el combustible restante, y la distancia.

### **Desarrollo de Sensores Aplicados en la Agricultura**

Numerosos investigadores y fabricantes han desarrollado sensores “on-the-go” destinados a medir las propiedades del suelo mediante interacciones físicas con él mismo. Estos se pueden agrupar según su modo de interacción en: eléctricos y electromagnéticos, ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos (Adamchuk *et al.*, 2004). En la última década del siglo XX han proliferado distintos sensores eléctricos y electromagnéticos, ópticos, mecánicos, electro-químicos, acústicos y neumáticos, que pueden ser incorporados a vehículos móviles para la caracterización del suelo. La mayoría de ellos tiene como característica común su sensibilidad a más de un factor agronómico del suelo como se muestra en el cuadro (2).

### **Sensores para tratamiento en tiempo real**

La aplicación “en tiempo real” consiste en pulverizar los rodales de malas hierbas inmediatamente tras su detección. Se prevé una mayor aceptación de estos sistemas en el futuro y es donde se concentran los mayores esfuerzos, dado que la generación de mapas previos supone un gran costo debido al post-procesamiento de los datos.

El esquema más sencillo de un sistema de aplicación en tiempo real consiste en posicionar el equipo de detección en la parte delantera del tractor, utilizando el tiempo transcurrido desde la detección de las malas hierbas hasta la aplicación de herbicida por

parte del equipo pulverizador situado en la zona trasera del tractor, para el procesamiento de la información recogida por el sensor delantero (figura 4). En la actualidad, las aplicaciones en tiempo real están siendo utilizadas comercialmente en tratamientos de malas hierbas en las vías de tren, o en zonas urbanas (en las zonas de afloramiento entre las grietas del pavimento).

**Cuadro 2.** Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelo y atributos evaluados

	Textur a	M O	Humeda d	Salinida d	Compactació n	L S	p H	N	CI C
<b>Eléctricos y EM</b>	X	X	X	X		X		X	X
<b>Ópticos</b>	X	X	X				X	X	
<b>Mecánicos</b>					X				
<b>Electro- químicos</b>						X	X	X	

MO= Materia orgánica; LS= Labor de suelo; CIC= Capacidad de intercambio catiónico y EM=Electromagnéticos

La detección de estos sistemas se realiza mediante espectroscopia, con sensores que en tiempo real distinguen la presencia de vegetación y no las especies vegetales, lo que permite un gran ahorro en el procesamiento de la información.



**Figura 4.** Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado al frente del tractor

### Sensores mecánicos

La característica mecánica del suelo, tales como la resistencia del suelo (por lo general a través de la medición de resistencia mecánica) puede proporcionar información adicional útil sobre las condiciones del suelo (por ejemplo, la compactación). Regiones de alta resistencia mecánica en el suelo de forma natural pueden ser causadas por la

compactación de la maquinaria agrícola pesada, o por la formación de pisos de arado. En cada caso, las partículas del suelo se colocan más cerca entre sí, y el proceso se refiere a la compactación. Los suelos compactados reducen las tasas de crecimiento de las raíces de los cultivos y así limitan la disponibilidad de agua y nutrientes a la planta (Upadhyaya *et al.*, 1999).

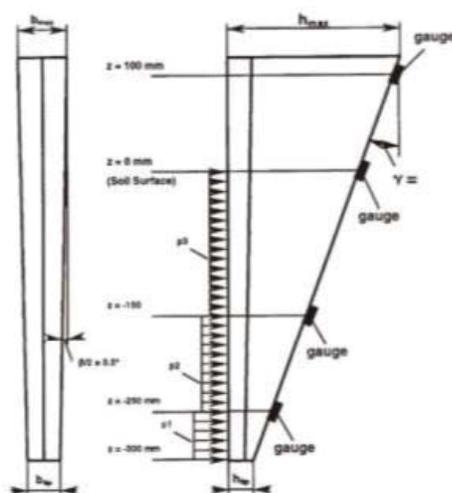
El penetrómetro de cono vertical estándar, se utiliza frecuentemente para medir la resistencia del suelo a la penetración (ASAE, 2002a), se cree puede ser la representación de la compactación del suelo. Incluso cuando las mediciones automatizadas del penetrómetro de cono son muy variables. Para superar estos problemas, una serie de prototipos de sistemas se han desarrollado para la detección “on-the-go” (en recorrido) de la resistencia mecánica del suelo.

Los medidores de deformación y células de carga, proporcionan una forma muy conveniente de medir las fuerzas que actúan en las herramientas de labranza, son relativamente baratos, muy robustos y son fácilmente interconectados a un sistema de adquisición de datos, lo que los hace ideales para aplicaciones en tiempo real. Las celdas de carga se utilizan habitualmente para medir la carga vertical, la fuerza lateral y momentos que actúan sobre implementos de labranza. Por ejemplo, en un estudio realizado por (Glancey *et al.*, 1996), la labranza en el lugar fue calibrada usando un enganche de tres puntos y dinamómetro en diferentes condiciones de suelo y en diferentes velocidades.

Alihamsyah *et al.* (1990) desarrollaron un sistema para el mapeo de la resistencia mecánica del suelo usando una cuña horizontal y penetrómetro de cono a una profundidad determinada. Los coeficientes de correlación entre las mediciones del penetrómetro horizontales y el estándar penetrómetro (vertical) se situaron entre 0,74 y 0,99. Un sistema de instrumentación para la medición de componentes horizontales y verticales de la resistencia mecánica a la labranza profunda fue diseñado por (Owen *et al.*, 1987). Del mismo modo, (Liu *et al.*, 1996) desarrollaron un diente equipado con una celda de carga para medir la resistencia del suelo al corte. Ellos plantearon la hipótesis, de que cuando un diente instrumentado se tira a través del suelo a una profundidad y velocidad constante, la fuerza requerida para tirar de la punta, es una función de la densidad del suelo (compactación), la textura y el contenido de humedad. Si la fuerza de

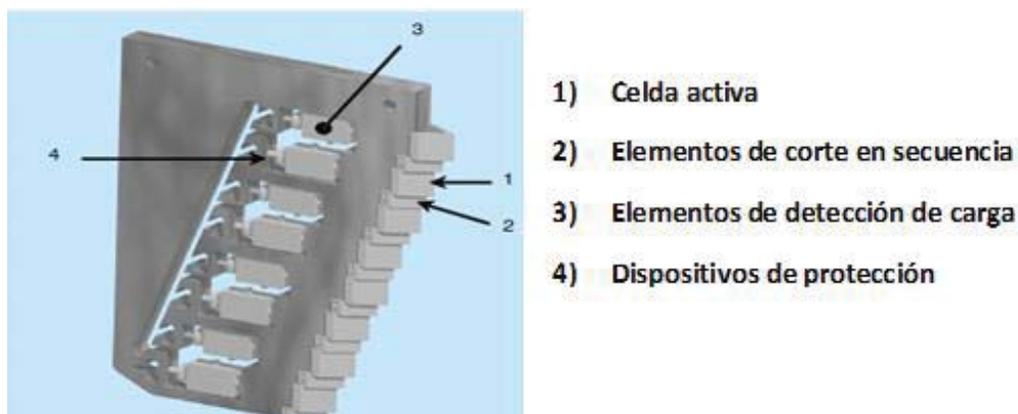
corte del suelo se corrige para el contenido de humedad, un índice llamado índice de textura - compactación (TCI) se puede determinar. Dado que la textura del suelo no cambia con el tiempo, las TIC pueden utilizarse para inferir el nivel de compactación del suelo.

El sistema era capaz de estimar la resistencia mecánica del suelo en tres intervalos de profundidad. En este sistema, la señal relativamente baja en proporción de ruido hace que sea difícil predecir la resistencia mecánica del suelo cerca de la superficie. Otro prototipo de la cuchilla vertical (figura 5) equipado con una serie de medidores de deformación, se utilizó para estimar tanto el patrón espacial de la resistencia del suelo como para identificar la tendencia de cambio de la resistencia del suelo con la profundidad, suponiendo un cambio lineal de la presión de la resistencia con la profundidad (Adamchuk *et al.*, 2001).



**Figura 5** Esquema ilustrativo de cuchilla plana

Andrade *et al.* (2001, 2002, 2008) desarrollaron un sensor con perfil de compactación que utiliza ocho celdas de carga independiente (figura 6), situadas en el cuerpo del vástago para medir la fuerza de corte del suelo, actuando más de ocho elementos cortantes espaciados a 5 cm. Estos elementos de corte, se distribuyeron de manera uniforme sobre una profundidad de operación de 61 cm. Pruebas de campo indican que la fuerza de corte de suelo, fue pronosticado a partir de valores de índice de cono medido y que es comparable a la fuerza de corte real de suelo medido, utilizando el sensor de compactación del suelo.



**Figura 6.** Modelo CAD del sensor de perfil de compactación del suelo (SCP)

### **Sensores de proximidad para la medición de profundidad**

Son utilizados los sensores de posición, normalmente constituidos de reglas electroópticas, también se usan sensores basados en ultrasonido. Este mismo tipo de sensor es utilizado para la determinación de la altura de corte de los cabezales de cosechadoras de cereales y forraje (Silva & Borges, 1998). Son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias de hasta 8 m. El sensor emite impulsos ultrasónicos, estos reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración. Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y de diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo han de ser deflectores de sonido. Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco.

El sensor ultrasónico LV-MaxSonar-EZ1 es un buen compromiso entre la sensibilidad y el rechazo de objetos secundarios. El sensor tiene integrado el receptor y transmisor en una sola capsula. Puede detectar distancias desde 15cm a 6 m. Ofrece señales de salida: analógica, digital por pulsos y de comunicación serial TTL.

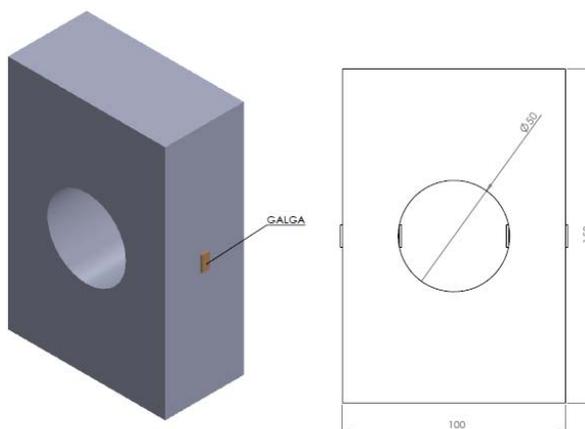
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño de Sensores

#### Penetrometro

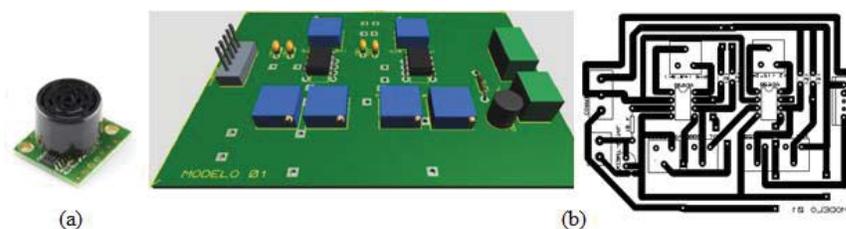
El sensor penetrómetro está integrado por dos componentes: el sensor de fuerza y sensor de profundidad de penetración (PP):

El sensor de fuerza se empleó la metodología desarrollada por Campos & Wills (1995), para desarrollar un sensor de fuerza tipo anillo simple con capacidad de 10 kN. El acero empleado para la construcción del transductor fue 1020 (AISI) con un límite de fluencia 380 MPa. Utilizando galgas extensiométricas de 350  $\Omega$  tipo KFG-5-350-C1-11 de la marca Kyowa con un factor de galga de 2.11, en arreglo de puente de Wheatstone completo más información acerca del puente se presenta en anexo (4). La posición de las galgas en el anillo fue en la parte interior y exterior, como se observa en la figura (7), empleando el procedimiento descrito por Sakurai (1996).



**Figura 7.** Dimensiones de sensor y colocación de galgas

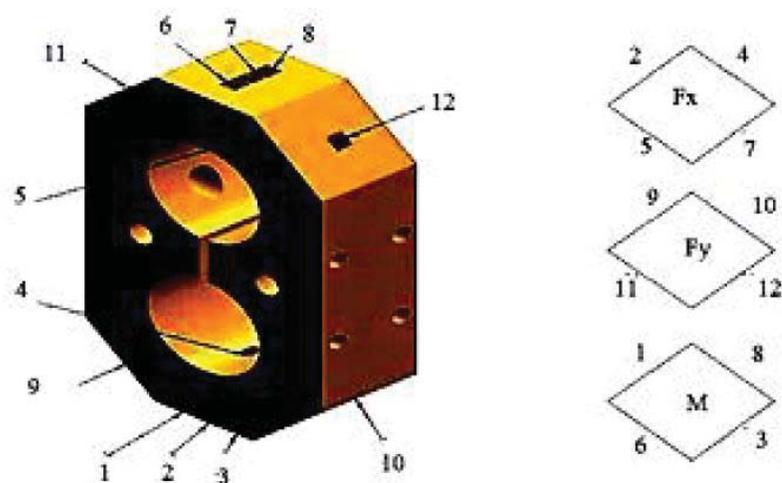
Y el sensor de profundidad fue seleccionado para mediciones en un rango de 30 a 600 mm y está integrado por un sensor de distancia LV-MaxSonar-EZ1 de la empresa MaxBotix, dos amplificadores en serie AD620AN y un filtro pasa-bajo Resistivo-Capacitivo (RC). Esta combinación de circuitos integrados acondicionan las señales para un porcentaje menor al 2% de ruido magnético en el registro de datos. En a) y b) de la figura (8), se observa los componentes del sensor.



**Figura 8.** a) LV-MaxSonar-EZ1 b) Circuito de AD620AN y filtro RC

### Transductores octagonales de anillo extendido (OAE)

Para la determinación de las magnitudes de las fuerzas de reacción del suelo se construyeron dos transductores octagonales de anillo extendido con capacidad de 40 kN. Los parámetros y construcción se realizaron con el proceso según Cook y Robinowicz (1963). El OAE fue elaborado de acero 4140, con un esfuerzo máximo de 900-1050 MPa. Utilizando galgas extensiométricas de  $350 \Omega$  tipo KFG-5-350-C1-11 de la marca Kyowa con un factor de galga de 2.11, en tres arreglos de puentes de Wheatstone completos. La posición de las galgas y conectividad fueron, realizados de acuerdo a la metodología propuesta por Afzalnia & Roberge (2009) como se observa en la figura (9).



**Figura 9.** Posición y conectividad de galgas para un transductor OAE

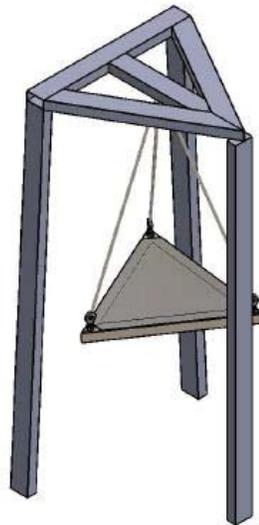
### Calibración de Sensores

Para efectuar las pruebas en campo se requiere previa calibración de los sensores, bajo condiciones de laboratorio y con ello conocer la relación de voltaje – variable.

Se instaló una computadora con un sistema de adquisición de datos Daqbook/2000. En el puerto analógico se conectó un amplificador de señal DBK43A para aumentar el número de canales de conexión, en donde estos canales necesitan la siguiente configuración de operación 9.5, 4.5 y 4.5v para *Excitation*, *Input Gain*, *Scaling Gain* respectivamente, con una frecuencia de adquisición a 20 Hz. La calibración de los sensores se describe a continuación:

### Penetrómetro

El sensor de fuerza se posiciono en el tripie de calibración como se observa en la figura (10) en donde se colocaron al centro de la canastilla seis pesos (Cuadro 3) uno a uno a cada 500 datos, al tener el peso máximo se remueven de la misma forma que fueron agregados hasta quitar todos los pesos de la canastilla dando un total de 6000 datos registrados, esto con la finalidad de generar una gráfica escalonada, para conocer los promedios de cada escalón como se observa en la figura (12), con cinco repeticiones para ajustar los datos a un modelo de regresión lineal con unidades Newtons por cada miliVolt ( $N\ mV^{-1}$ ).



**Figura 10.** Tripie de calibración

Por otro lado con el sensor de profundidad se sigue la misma metodología de realizar graficas escalonadas cada 500 datos a una frecuencia de 20 Hz, el sensor LV-MaxSonar-EZ1 junto con el circuito de filtro AD620AN, se coloca en la parte frontal un objeto reflector de señal el cual se recorrió cada 50 mm hasta llegar a la distancia de 500 mm

obteniendo 10500 datos de registro, se realizaron cinco repeticiones para elegir los promedios de cada escalón como se muestra en la figura (12), y se ajustó un modelo de regresión lineal con unidades de Volt por cada milímetros ( $V\ mm^{-1}$ ).

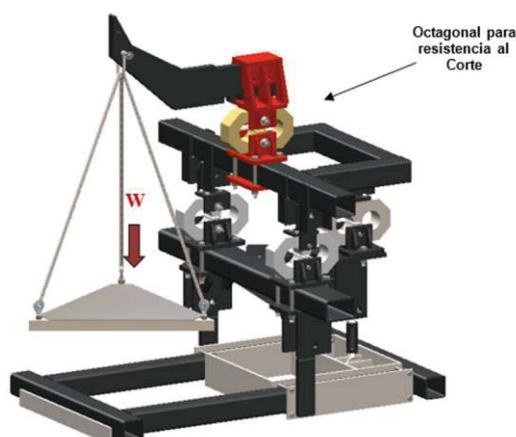
**Cuadro 3.** Pesos para calibración

Pesos	Kg	Newtons	Newtons acumulados
<b>W1</b>	45	441.45	441.45
<b>W2</b>	45	441.45	882.90
<b>W3</b>	45	441.45	1324.35
<b>W4</b>	35	343.35	1667.70
<b>W5</b>	35	343.35	2011.05
<b>W6</b>	30	294.3	2305.35

W: pesos, Kg: kilogramos

### Transductores octagonales de anillo extendido (OAE)

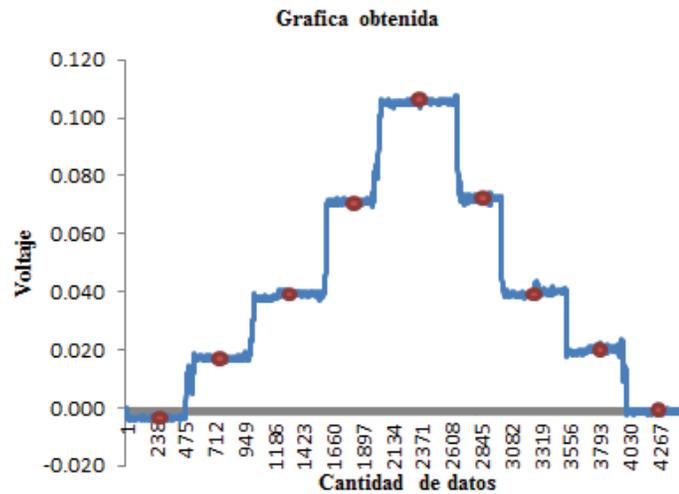
Los transductores, Verde-Azul y Rojo-Amarillo se colocaron de forma individual en un banco de calibración para el registro de datos a diferentes distancias (0.54, 0.64 y 0.74m) que simulan las profundidades de trabajo como se observa en la figura (11).



**Figura 11.** Banco de calibración de transductores octagonales

Al igual que con los sensores anteriores se generaron graficas escalonadas siguiendo el mismo proceso con ocho pesos (cuadro 4) y seis repeticiones para seleccionado los promedios de cada escalón como se muestra en la figura (12) con puntos rojos, y ajustar

los datos en un modelo de regresión lineal con unidades en Newtons por cada miliVolt ( $N\ mV^{-1}$ ).



**Figura 12.** Grafica escalonada para calibración

Finalmente los datos obtenidos de los sensores se analizaron con en el software R v. 3.3.3, generando así las ecuaciones de calibración ajustadas al modelo de regresión lineal representado en la ecuación (1).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

$y_i$  = Es la variable a determinar según el tipo de sensor (Newtons o milímetros)

$x_i$  = Variable independiente (Volts)

$\beta_0$  y  $\beta_1$  = Ordenada y pendiente, respectivamente

$\varepsilon_i$  = Error experimental

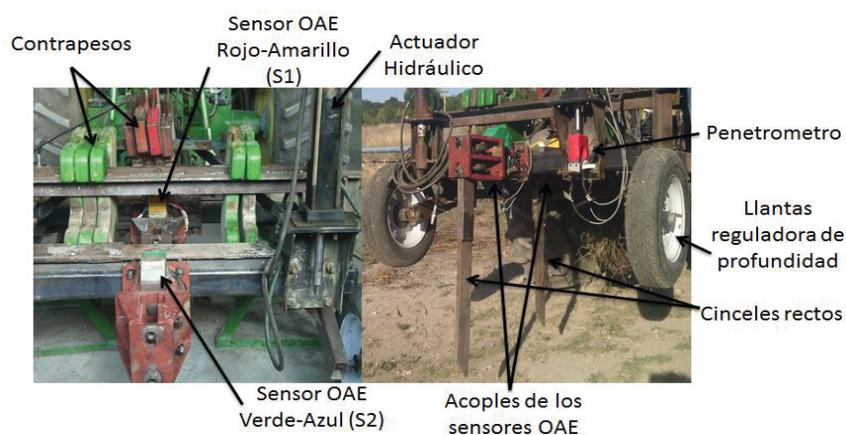
**Cuadro 4.** Pesos para calibración

Pesos	Kg	Newtons	Newtons acumulados
W1	48	470.88	470.88
W 2	48	470.88	941.76
W 3	48	470.88	1412.64
W 4	73	716.13	2128.77
W 5	35	343.35	2472.12
W 6	35	343.35	2815.47
W 7	30	294.30	3109.77
W 8	30	294.30	3404.07

W: Peso, Kg: Kilogramos

### Acondicionamiento del Carro-Porta-Sensores

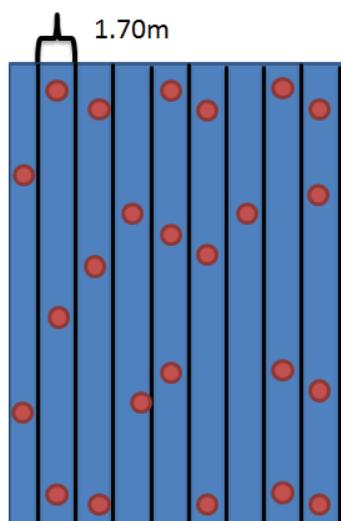
El registro de datos en condiciones de campo requirió el acondicionamiento del Carro-Porta-Sensores con un actuador hidráulico acoplado en el extremo inferior el sensor penetrómetro con una sonda de punta cónica de 20.27 mm de base y ángulo de 30° (Norma ASAES313.3, 2002). Se construyeron acoples entre Carro-Porta-Sensores, sensores OAE y cinceles para un arreglo de alineación de sensores y registrar de las fuerzas de reacción a profundidades de 0-20, 20-30 y 30-40 cm, con cinceles rectos para las dos últimas profundidades y un cincel curvo con alas de 15 cm para el cincel frontal, un par de llantas reguladoras de profundidad y contrapesos para evitar el efecto de la fuerza normal (figura 13).



**Figura 13.** Acondicionamiento de Carro Porta Sensores

### Pruebas Bajo Condiciones de Campo

Las pruebas en campo se realizaron en dos etapas de Primavera-Verano de 2017 en los sitios experimentales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el Jardín hidráulico corresponde a campo 1 (C1) y el campo de prácticas agrícolas a campo 2 (C2) con coordenadas geográficas de longitud y latitud: (-101.035676, 25.354313), (-101.031676, 25.351562) respectivamente para los campos. Predominando la textura de suelo migajón arcilloso. Para la recolección de datos se utilizó un tractor instrumentado y como herramienta el Carro-Porta-Sensores. El registro de datos se realizó con un sistema de adquisición LookBook 360, amplificador de señal DBK43A con especificaciones de *Input Gain*, *Scaling Gain*: 4.5 Volts y *Excitation*: 9.5 Volts, localizando los sitios de muestreo en tiempo real con un GPS diferencial Trimble 132. El muestreo se define para ambos campos como simple aleatorio sin reemplazo. Para C1 se tomaron 27 líneas para medir la resistencia de roturación (RR) con magnitudes de Newtons ( $N$ ) y 72 puntos para medir resistencia a la penetración (RP) con magnitud de mega Pascales ( $MPa$ ), mientras que en C2 se registraron 18 líneas y 50 puntos. Con esto se probaron diferentes modelos de regresión con la finalidad de encontrar el mejor modelo que explique la variable dependiente RP en función de la variable independiente RR (figura 14).



**Figura 14.** Distribución de muestreo aleatoria las líneas y puntos representan RR y RP respectivamente

## Ecuación de Predicción de RR vs RP

### Análisis de datos

Se crean dos macros en Microsoft Excel 2010 que facilitaron la conversión de las coordenadas de minutos decimales a grados decimales y de voltajes a RP, profundidad (PP) y RR con unidades en Mega Pascales (MPa), milímetro (mm) y Newtons (N) respectivamente para su posterior análisis.

Los sensores de RR registraron las fuerzas de reacción a una profundidad real de 10 cm, donde se presenta una diferencia entre las magnitudes de sensor 2 (S2) y sensor 1 (S1). El S2 es el primero en penetrar por esta razón un aumento significativamente los valores de fuerza del sensor. Debido a esto se realizó un ajuste de escalas entre S1 y S2 con la siguiente ecuación (2) de proporción.

$$P = \frac{\overline{RR_2} - \overline{RR_1}}{\overline{RR_1}} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

$P$ : Proporción

$\overline{RR_1}$  : Resistencia de roturación del sensor 1 (N)

$\overline{RR_2}$  : Resistencia de roturación del sensor 2 (N)

El interés de la presente investigación fue conocer el grado de relación existente entre los sensores RR Vs RP a profundidades de 20-30 y 30-40 cm por lo tanto se eligieron los valores promedios de RP en los intervalos de  $20 \leq pp < 30$  y  $30 \leq pp \leq 41$  cm. Con el arreglo de los sensores alineados se logró conocer los promedios más el espectral de frecuencia de RR, con el método de la transformada de Fourier codificado en Matlab V. R2012a, en las profundidades antes mencionadas.

### Modelo estadístico

En el software R v. 3.3.3, se codificó un script para realizar el análisis de los modelos de regresión lineal, y comprobar los supuestos estadísticos para la confiabilidad de los mismos, estas pruebas son: Normalidad (Shapiro-Wilk), independencia de los errores (Durbin-Watson y Box-Ljung) y heterocedasticidad (Breusch-Pagan). Resultando que

los supuestos de los modelos de regresión cumplen con supuestos se tiene buena confiabilidad para su posterior uso.

### **Generación de mapas**

Para la generación de los mapas de diagnóstico se realizaron en el software ArcView 3.2 utilizando archivos con extensión texto delimitado por tabulación (.TxT) para el ingreso de datos al programa habilitando la extensión *3D Analyst* para generar interpolaciones de tipo distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas en ingles) de los campos de pruebas y se clasificaron en 5 intervalos para identificar las áreas comunes de los sitios de trabajo de las variables RR y RP.

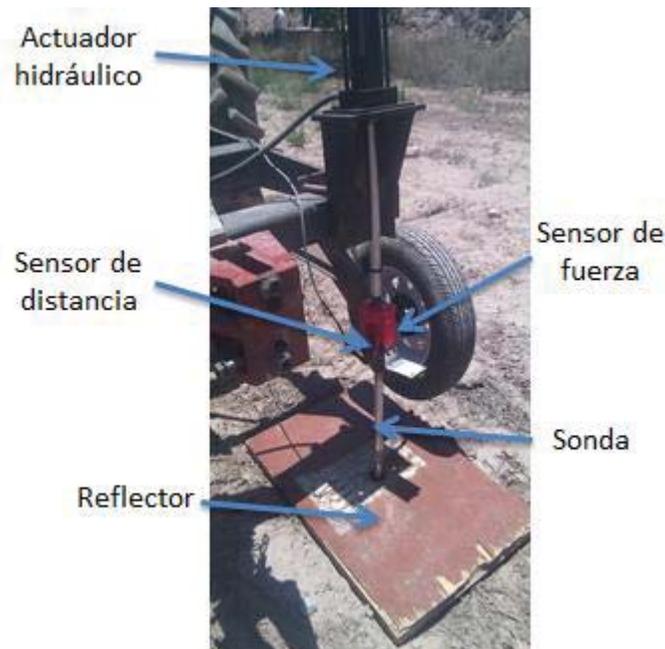
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diseño de Sensores

#### Penetrómetro

El sensor de fuerza es un transductor de anillo simple de 10 kN de capacidad, acero AISI 1020, esfuerzo flector de 48 MPa, último esfuerzo de 380 MPa y un factor de seguridad (FS) de 7.91. Para las consideraciones de diseño del transductor de anillo simple se empleó el método desarrollado por Campos & Wills (1995), un diseño similar fue desarrollado por Laffita *et al.* (2012) desarrollo un transductor tipo S utilizando el análisis numérico por el método de elemento finito, para garantizar la linealidad durante los registros de carga y descarga del transductor, así como un bajo efecto de histéresis.

Por otra parte con el sensor de medición de profundidad de penetración es una integración de un sensor comercial tipo LV-MaxSonar-EZ1, con un circuito de dos amplificadores AD620AN en serie y un filtro pasa bajo para obtener una buena linealidad con porcentajes de ruido magnético por debajo del 2%, este sensor cuenta con características de desplazamiento máximo 600 mm con una precisión de 10 mm. Se tiene resultado similar de la integración de la tecnología en un penetrómetro por Campos *et al.* (2015a) (figura 15).



**Figura 15.** Sensor de resistencia a la penetración

### Transductores octagonales de anillo extendido (OAE)

Se elaboraron dos transductores octagonales de anillo extendido para medir las fuerzas de reacción del suelo con acero 4140, capacidad de 80 kN, con un esfuerzo máximo de 900-1050 MPa. Las galgas o medidores de deformación fueron colocadas en los dos transductores de acuerdo a lo descrito por Campos & Wills (1995) y Abbaspour & Haghghat (2011) en el ángulo de  $90^\circ$  y  $39.54^\circ$  con arreglos de puentes de Wheatstone para medir las fuerzas horizontales y verticales de forma independiente respectivamente (figura 16).



**Figura 16.** Sensores Octagonales de Anillo Extendido

### Calibración de Sensores

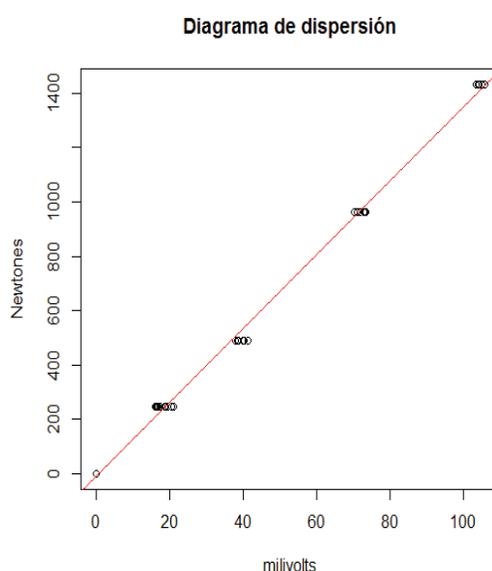
#### Penetrómetro

La calibración después de la construcción del sensor penetrómetro se realizaron de forma independiente de los sensores que lo integra, para el sensor de fuerza se monta en un tripie de calibración para obtener los datos, figura (12).



**Figura 17.** Calibración de sensor de fuerza para el penetrómetro

Con los datos del sensor de fuerza para la calibración se ajustaron a un modelo de regresión resultando una pendiente de calibración de  $13.58 \text{ mV N}^{-1}$ , lo que indica que por cada Newton existe un incremento de deformación de la galga en promedio de 13.58 mili Volts. Cabe indicar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de este modelo fue de 99.73%. También se obtuvo un intervalo de confianza al 95% para la pendiente, presentándose como límite inferior 13.36 y como límite superior 13.79 mV, la tendencia de los datos se observa en la figura (18). Sun *et al.* (2006) y Laffita *et al.* (2012) en trabajos similares reportaron, calibraciones de transductores de fuerza tipo S, aplicando valores de fuerzas conocidas obteniendo resultados confiables para los sensores.



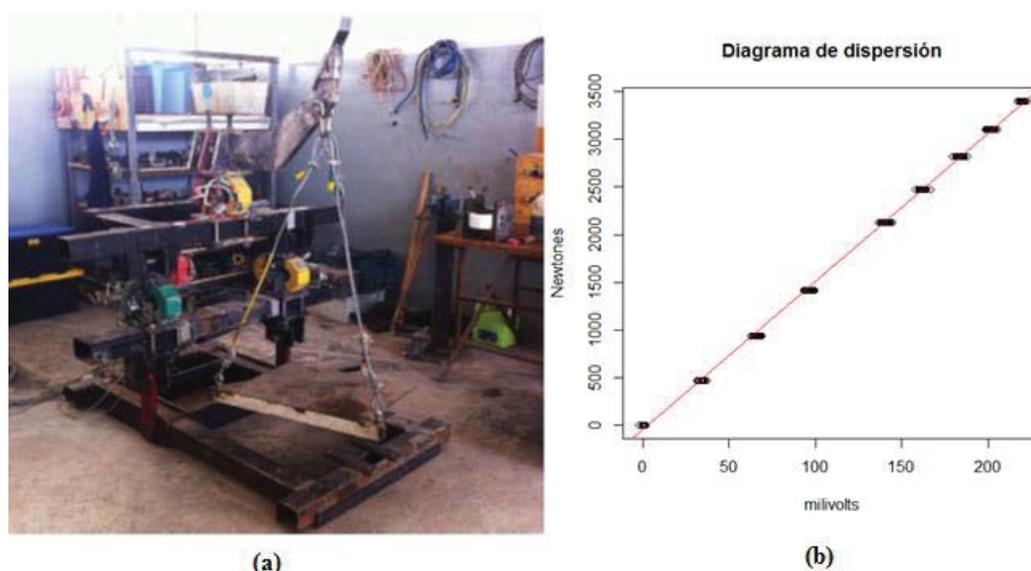
**Figura 18.** Tendencia lineal de los datos

Como complemento del sensor penetrómetro se calibro la distancia, obteniendo una pendiente de calibración de  $258.4 \text{ V mm}^{-1}$ , con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 99.99%. Resultando un intervalo de confianza al 95% para la pendiente, donde el límite inferior es 259.04 y límite superior de 258.88 Volts. Campos *et al.* (2015a) con trabajos semejantes de un sensor de medición obtuvieron ruidos menores del 2%.

### **Sensores Octagonales de Anillo Extendido (OAE), Rojo-Amarillo y Verde-Azul**

En este caso es necesario generar las pendientes de calibración como se describió en la metodología. Pero como no se cumplieron los supuestos estadísticos se realizó un

análisis de regresión robusta. Logrando conseguir las pendientes para los OAE Rojo-Amarillo y Verde-Azul de  $15.58 \text{ mVN}^{-1}$  y  $15.53 \text{ mVN}^{-1}$ , con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 99.9 y 99.12% respectivamente para los sensores. El proceso de calibración y la tendencia lineal se presentan en la figura (19). Los autores, Godwin *et al.* (1993); McLaughlin *et al.* (1998); Khan *et al.* (2006) y Campos *et al.* (2015b), reportaron resultados similares en la calibración de sensores OAE.



**Figura 19.** (a) OAE Rojo-Amarillo colocado en el marco de calibración; (b) Tendencia lineal

### Pruebas Bajo Condiciones de Campo

La distribución del muestreo para las variables RR y RP se observan en el la figura (20), donde los puntos de color verde representan RR y los anaranjados RP. Resultados similares reportaron Campos *et al.* (2015b) y Reynolds *et al.* (2015), con el registro de fuerzas de reacción del suelo utilizando OAE, donde se obtuvieron buen comportamiento de los sensores para evaluar implementos. Con esto se permite la identificación de las capas compactadas de forma dinámica en los sitios de trabajo con mayor cobertura.

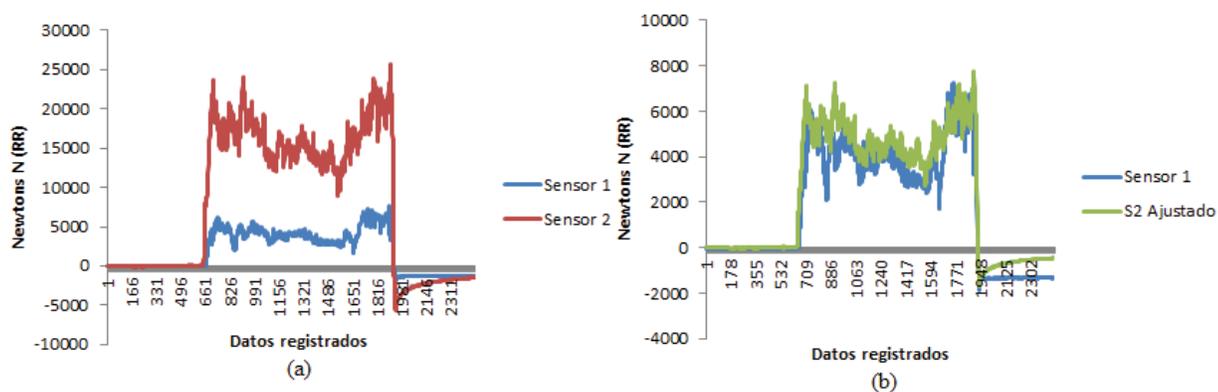


**Figura 20.** Datos de campo (a) C1: Jardín Hidráulico; (b) C2: Prácticas Agrícolas

### Ecuación de Predicción de RR vs RP

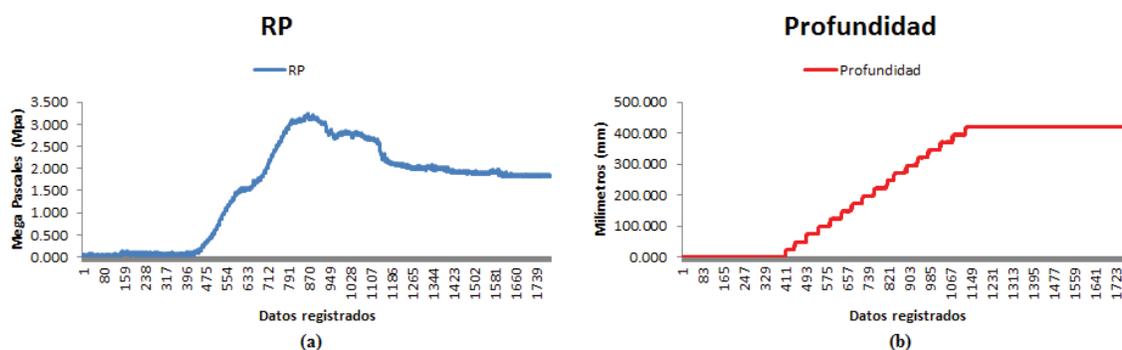
#### Análisis de datos

Como seguimiento de las pruebas en campo en el análisis se obtienen gráficas para todos los sensores en la figura (21 (a)), se observa el comportamiento de las fuerzas de reacción de los sensores OAE, como complemento se presenta en la figura (21 (b)) las gráficas ajustadas con la ecuación (2) de proporción descrita en el capítulo anterior.



**Figura 21.** Graficas de fuerzas de reacción del suelo, (a) originales y (b) ajustadas

Otro tipo de muestreo fue el estático con un penetrómetro de cono obteniendo como resultado las capas de compactación del suelo a profundidades de cero hasta 40 cm, como se observa en la figura (22).

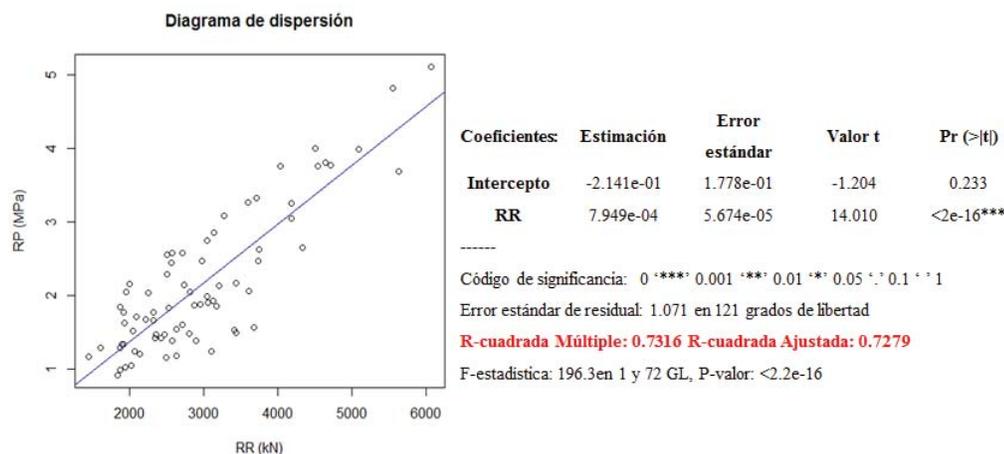


**Figura 22.** Medición del penetrómetro, (a) RP y (b) Profundidad de capas compactadas

Además estas graficas (figura 22) permiten conocer las magnitudes de RP con profundidades puntuales. Esto es de vital importancia debido a que el crecimiento radicular se ve afectado significativamente a los 2 MPa, los datos anteriores fueron encontrados por Taylor & Gardner (1963); Atwell (1993); Silva & Kay (1996); Raper *et al.* (2005a). Además que Clark (1999); Raper *et al.* (2005b) encuentran que las profundidades de la capa de compactación era completamente variable en todo el terreno desde 0.10 a 0.25 m. Esta situación indica que para optimizar la energía en el laboreo del suelo es esencial conocer si es necesario realizar un trabajo a profundidades mayores de 0.25 m. esta investigación contribuye a conocer las magnitudes de RP para caracterizar el suelo y poder tomar decisiones en trabajo de labranza mayo a 0.20 m.

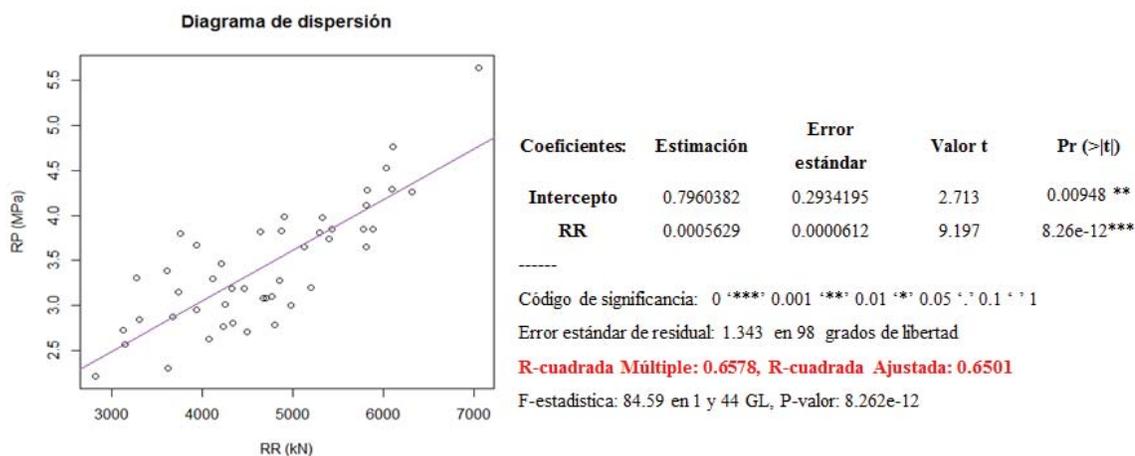
### **Modelo estadístico para campo 1 (C1) y campo 2 (C2)**

Los resultados obtenidos del modelo de regresión lineal de los datos de C1, es  $RP = -2.141 \times 10^{-1} + 7.949 \times 10^{-4} RR$  con un índice de determinación ( $R^2$ ) de 73.16%. La pendiente del modelo describe que por cada Newton de RR existe un incremento promedio  $7.949 \times 10^{-4}$  de RP. Por otra parte, el intercepto ( $-2.141 \times 10^{-1}$ ) para este modelo de regresión no tiene una explicación practica y es una constante para lograr las mejores estimaciones de RP, la figura (23) representa el análisis y tendencia de las variables.



**Figura 23.** Tendencia de la línea y análisis de los datos de C1

Mientras que para los datos de C2 el modelo de respuesta estimado es  $RP = 0.7960 + 5.629 \times 10^{-4} RR$ , con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 65.78%. Los resultados del análisis y tendencia se visualizan en la figura (24). Los modelos anteriores cumplieron con los supuestos estadísticos por lo tanto se pueden utilizar para posteriores análisis.



**Figura 24.** Tendencia y análisis de los datos de C2

Para finalizar los análisis individuales de los campos de prueba se presenta el cuadro (5), donde se indica que modelos fueron significativos para la estimación de RP en función de RR.

**Cuadro 5.** Concentrado de ecuaciones de los modelos

	<b>Modelo Lineal</b>	<b>R<sup>2</sup> %</b>	<b>R<sup>2</sup> Ajustada %</b>
<b>C1**</b>	$RP = 7.949 \times 10^{-4} RR$	73.16	72.19
<b>C2**</b>	$RP = 0.7960 + 5.629 \times 10^{-4} RR$	65.78	65.01

\*\* : Modelos regresión con el método clásico; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación

### Modelos estadísticos considerando C1 más C2

Siguiendo con el estudio, se analizó los datos incorporando C1 más C2, donde se estimó un modelo de regresión clásica de tipo lineal. Y el modelo presenta propiedades estadísticas confiables. En particular el que mejor se ajustó fue para el modelo  $RP = 7.262 \times 10^{-4} RR$  con coeficiente de determinación de 80.45% y un coeficiente de correlación (Pearson) de 89.69%. En el cuadro (6) se presenta el análisis.

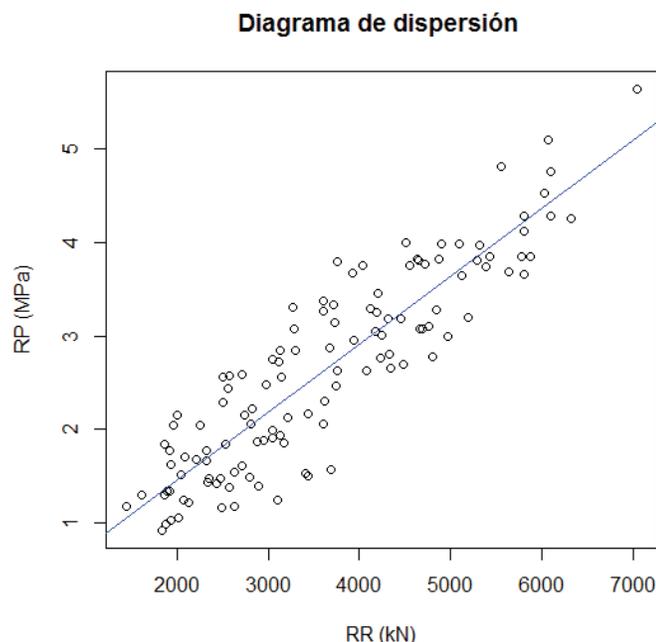
**Cuadro 6.** Análisis de regresión lineal

<b>Coefficientes:</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>valor t</b>	<b>Pr (&gt; t )</b>
<b>Intercepto</b>	5.139e-03	1.271e-01	0.04	0.968
<b>RR</b>	7.262e-04	3.295e-05	22.04	<2e-16 ***

----  
 Error estándar de residual: 0.4681 en 118 grados de libertad  
 R-cuadrada Múltiple: 0.8045, R-cuadrada Ajustada: 0.8029  
 F-estadística: 485.7 en 1 y 118 GL, p-valor: < 2.2e-16

Código de Significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

En la figura (25) se observa la tendencia del modelo de color azul con las magnitudes de RR Vs RP.



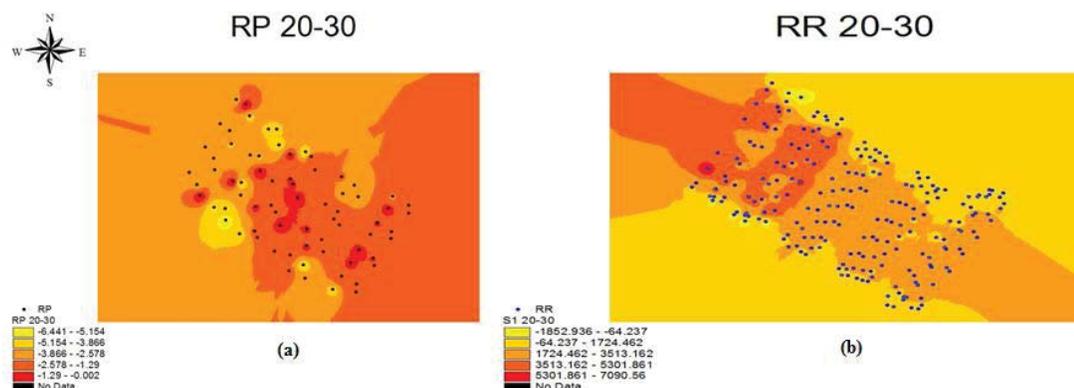
**Figura 25.** Tendencia del modelo de regresión lineal

Diversos autores reportan comparación de sensores para caracterización del suelo. Tal es el caso de Sudduth *et al.*, (2008) que comparando dos sensores horizontales contra un penetrómetro estándar de cono obtuvo un  $R^2$  de 19 y 20% para cada sensor. Por otro lado Andrade & Upadhyaya (2007a), Andrade *et al.* (2007b) y Sun *et al.* (2006), encontrando un comportamiento lineal entre penetrómetro estándar de cono y un penetrómetro horizontal, encontrando este último con una  $R^2$  de 51.3%. La contribución de esta investigación fue la comparación entre sensores de penetrómetro de cono y octagonales de anillo extendido (OAE). La generación del modelo permite registrar resistencia de roturación con muestreos dinámicos ya que al contar con sensores OAE por su diseño más complejo tienen mayor sensibilidad y confianza. Y lograr diagnosticar los sitios de trabajo con menor tiempo. En comparación con investigaciones anteriores que cuentan con sensores horizontales de tipo anillo simple que tienen menor sensibilidad.

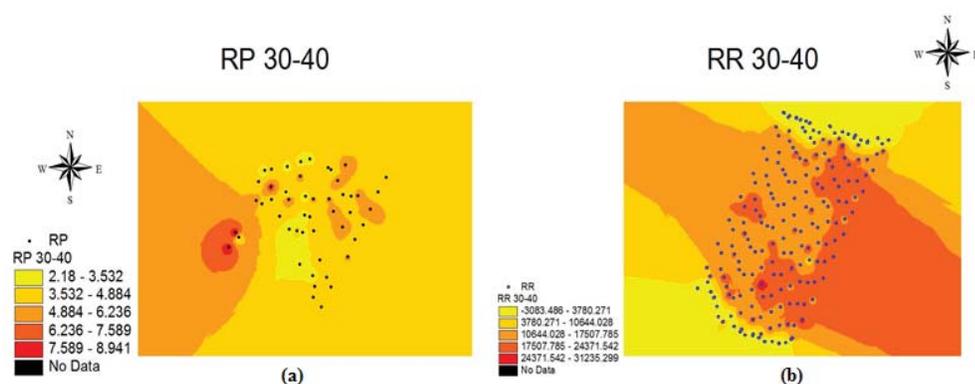
### Generación de Mapas

La generación de los mapas sirven para visualizar las características de las variables, en el C1, comparando entre métodos de muestreo a profundidad 20-30. Se obtiene cuando se utiliza el método tradicional con sensor penetrómetro (figura 26 (a)) la densidad de

puntos son escasos debido al tiempo que se tarda en realizar el muestreo mientras que con los sensores OAE (figura 2b (b)) se muestran mejor distribución de la variable en sitio.



**Figura 26.** Mapas de C1; (a) Resistencia a la penetración, (b) Resistencia de roturación. Para finalizar con los mapas de C2, no presentas una igualdad en áreas esto puede ser debido al bajo muestreo y a la distribución de puntos de resistencia la penetración (figura 27). Esto puede servir para un posterior análisis de mapas debido a que, Andrade & Upadhyaya (2007) y Campos *et al.* (2015a) realizaron, mediante sistemas de información geográfica (GIS) y sensores locales diagnosticaron parámetros físicos del suelo en tiempo real. En el anexo (5) se observa el procedimiento de la generación de mapas de caracterización en el software ArcView 3.2.



**Figura 27.** Mapas campo 2; (a) Resistencia a la penetración y (b) Resistencia de roturación

## CONCLUSIONES

- \* La construcción de acoples para los sensores octagonales de anillo extendido logra alinear los sensores en el Carro-Porta-Sensores para cuantificar la resistencia de roturación a profundidades de 20-30 y 30-40 *cm* con cinceles rectos teniendo al frente un cincel curvo con alas de 15 *cm* roturando a profundidad de 0-20 *cm* para optimizar el muestreo.
- \* El acondicionamiento del Carro-Porta-Sensores permite generar una metodología de muestreo dinámico, para conocer las fuerzas de reacción del suelo con sensores de alta sensibilidad, permitiendo minimizar tiempos con un modelo estocástico que explica la variable RP.
- \* Con los datos se ajustó un modelo de regresión lineal que explica la variable de resistencia a la penetración (RP) con una capacidad explicativa del modelo de 80.45%.
- \* Con menor tiempo en una proporción de 1 a 10 se logró caracterizar el sitio de trabajo para analizar la variabilidad de compactación de suelo.

## RECOMENDACIONES

- \* El Carro-Porta-Sensores es necesario verificar la alineación de los cinceles siempre que se registren datos de resistencia de roturación.
- \* Para validar la confiabilidad en campo del modelo estadístico se requiere realizar muestreos preliminares en suelos que tengan una cohesión en un rango de 10 hasta 60  $kNm^2$ .
- \* Es necesario analizar los mapas en dos y tres dimensiones de las variables con software de GIS para realizar diagnóstico más concreto de los sitios de trabajo y poder realizar prescripciones.

## REFERENCIAS

- Abbaspour G., And S. Haghighat S. 2011. Extended octagonal ring transducer for measurement of tractor implement forces. *Instruments and Experimental Techniques*. 54(1): 136-140.
- Adamchuk, V.I., J.W. Hummel, M.T. Morgan, and S.Upadhyaya, K.. 2004, On- the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 44(1): 71-91.
- Adamchuk, V.I., M.T. Morgan and H. Sumali. 2001. Mapping of spatial and vertical variation of soil mechanical resistance using a linear pressure model. *ASAE Annual Meeting*. Paper No. 01-1019 (p. 1).
- Adamsen, F., E. Barnes, D. Hunsaker, E. Bautiska and A. Clemmens. 2000. Surface irrigation and precision crop management. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-14). American Society of Agronomy.
- Agamennoni, R. 1996. Rotaciones y labranzas en la región semiárida bonaerense sur. *Labranza en la región semiárida Argentina*. 103-112.
- Alihamsyah, T., E.G. Humphries and C. Bowers G. 1990. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. *Transactions of the ASAE*. 33(1): 73-77.
- Allen, R. R. and C. Fenster R. 1986. Stubble-mulch equipment for soil and water conservation in the Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*. 41(1): 11-16.
- Aluko, O.B. and D.A. Seig. 2000. An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil and Tillage Research*. 57(3):143-157.
- Andrade, P., U.A. Rosa, S.K. Upadhyaya, B.M. Jenkins, J. Aguera and M. Josiah. 2001. Soil profile force measurements using an instrumented tine. *ASAE Annual Meeting*. Paper No. 01-060 (p. 1).
- Andrade, P., S.K. Upadhyaya, B.M. Jenkins and S. Filho A. G. 2002. Evaluation of UC Davis compaction profile Sensor. *ASAE Annual Meeting*. Paper No. 02-1185 (p. 1)
- Andrade S., P., S. K. Upadhyaya, B. M. Jenkins, C. Plouffe, and B. Poutre. 2004. Field evaluation of the improved version of the UC Davis compaction profile sensor (UCD CPS). Paper number 041037. *ASAE Annual Meeting*. (doi:10.13031/2013.17644).

- Andrade-Sánchez, P. and S. Upadhyaya K. 2007a. Using GIS and on-the-go soil strength sensing technology for variable-depth tillage assessment. *GIS Applications in Agriculture Series. CRC, Press.* 163-183.
- Andrade-Sánchez, P., S. K Upadhyaya and B. Jenkins M. 2007b. Development, construction and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*. 50(3): 719-725.
- ASAE S313.3. 2002. Soil cone penetrometer. *American Society of Agricultural and Biological Engineers.*
- Andrade S. P., S. K. Upadhyaya and B. Jenkins M. 2008. Development, construction and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 719-725.
- Atwell, B. J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and Experimental Botany*. 33(1): 27-40.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and experimental botany*. 33(1): 27-40.
- Auernhammer, H. 2001. Precision farming—the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture* 30(1), 31 – 43.
- Barber, R.G., F. Navarro and M. Orellana. 1993. Labranza Vertical. *Centro de Investigación Agrícola Tropical, Misión Británica en Agricultura Tropical (CIAT)*. 32.
- Bauer, M., J. Davis, K. Sudduth and S. Drummond. 2000. Agronomic and economic evaluation of variable-rate seeding on missouri soils. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA. 16-19 July, 2000* (pp. 1-13) American Society of Agronomy.
- Bolstad, P. 2005. GIS fundamentals: A first text on geographic information systems. *Eider Press*. 543.
- Boone, F.R. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Tillage Research*. 11(3-4): 283-324.
- Bradford, J. L. 1986. Penetrability. *Methods of Soil Analysis*. 9(2): 463-477.
- Bragachini, M. 2010. Red de agricultura de precisión misterios de agricultura de la nación. *9no Curso internacional de agricultura de precisión. Argentina.*
- Bragachini, M., A. Méndez and F. Scaramuzza M. 2004. Agricultura de Precisión y Siembra Variable de insumos en tiempo real mediante el uso de GPS y una prescripción con sembradora IOM Inteligente Mega de 12 surcos a 52.5 cm.

*Curso Internacional de Agricultura de Precisión. 6. Expo de Máquinas Precisas. 1. 2006 07 25-27, 25 al 27 de Julio de 2006. Manfredi, Córdoba. AR. 32p*

- Bramley R. 2009. Lessons from nearly 20 years of precision agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop and Pasture Science*. 60(3):197–217
- Camacho-Tamayo, J. H. and G. A. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agricultura Técnica*. 67(1): 60-67.
- Campos M., S.G. 1995. Force measurement recording and data analysis for tillage tools. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 26(4): 13-16.
- Campos, M.S.G, B. Wills and Cadena Z. M. 1992. Consideraciones para el diseño de transductores octagonales y su aplicación en la evaluación de implementos de labranza. *Memorias del 2<sup>th</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola (AMIA). Guanajuato, México*. 210-217.
- Campos, M.S.G. 1993. Development of minimum maize planter for Mexican agriculture. *Doctoral dissertation, unpublished PhD thesis, Newcastle University, England*. 167p.
- Campos, M.S.G., R.A. Aragón and Z. Cadena M. 2000. Diseño y comportamiento de tres transductores de fuerzas para la evaluación de herramienta de labranza. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. CLIA. X Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola AMIA*.
- Campos-Magaña, S. G and B. Wills M. D. 1995. Force measurement-recording and data analysis for tillage tools. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 24(4): 13-17.
- Campos-Magaña, S. G., J. A. López-López, M. Cadena-Zapata, M. A. Reynolds-Chávez, N Cuervo-Piña and G. Ramírez-Fuentes. 2015a. Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración de suelo. *Terra Latinoamérica*. 33(2): 119-128.
- Campos-Magaña, S. G., M. A. Reynolds-Chávez, M. Cadena-Zapata, J. A. López-López, N Cuervo-Piña and G. Ramírez-Fuentes. 2015b. Desarrollo de un sistema integral de medición de fuerzas para la evaluación de implementos de labranza. *Terra Latinoamérica*. 33(2): 139-149.
- Carvalho, G.E. 2004. Geoestadística básica y aplicada. En: núcleo de estudios estadísticos e biométricos, facultad de matemática universidad federal de uberlândia.

- Chang, J., D. Clay, C. Carlson, S. Clay and C. Reese. 2000. The influence of different approaches for identifying inorganic n and p management zones on fertilizer recommendation. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-10). American Society of Agronomy.
- Chung, O. S. and K. Sudduth A. 2006. Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*. 49(4): 851-863.
- Clark, R. 1999. Evaluation of the potential to develop soil strength maps using a cone penetrometer. *American Society of Agricultural Engineers*. Paper 993109.
- Cook N.H. and E. Rabinowicz. 1963. Physical measurement and analysis. *Addison-Wesley Pub. C.* 160–164.
- Cook, S., M., Adams and R. Bramley. 2000. What is obstructing the wider adoption of precision agriculture technology?. *In Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-7). American Society of Agronomy.
- Cooper D.W. and D. Helfrick A. 1991. Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. *Editorial Prentice-Hall Hispanoamerica, SA México*. 101p.
- Corwin, D.L. and S. Lesch M. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*. 46(1):11-43.
- Coulomb, C. A. 1776. An attempt to apply the rules of maxima and minima to several problems of stability related to architecture. *Mémoire de l'Académie Royales des Sciences*.. 7(1): 343-387.
- Cruz, J., R. Nonato, S. Rocha, J. Camacho and R. Castro. 2010. Spatial analysis of physical attributes and organic charcoal from yellow-red alfissol with sugarcane crop. *Ciencia e agrotecnologia*. 34(2): 217-278.
- Daberkow, S. and W. McBride. 2000. Adoption of precision agriculture technologies by us farmers. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-12). American Society of Agronomy.
- De León G. F., Z. F. Payán and S. Sánchez. 1998, Localización de capas compactadas en el perfil del suelo mediante Penetrómetro, *Revista Terra Latinoamérica*. 16(4): 303-307.
- Doerge, T. 1998. Defining management zones for precision farming. *Crop Insights*. 8(21): 1-5.

- Doran, J.W., T.B. Parkin, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek and B. Stewart A.1994. Defining and Assessing Soil Quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. 1-21.
- Ellsbury, M., D. Malo, D. Clay, S. Clay and C. Carlson. 2000. Spatial distribution of soil dwelling stages of northern corn rootworm in relation to measurable soil and crop characteristics. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-4). American Society of Agricultural.
- Evans, D., E. Sadler, C. Camp and J. Millen. 2000. Spatial canopy temperature measurements using center pivot mounted IRTs. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> international Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-11). American Society of Agronomy.
- Fidalski, J., C. A. Tormena and C. Scapim A. 2007. Espacializacao vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 31(1): 9-19.
- Food and Agricultural Organization (FAO). 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín de tierras y aguas de la FAO*. 204.
- Food and Agricultural Organization (FAO). 2003. Agricultura de conservación, uniendo producción con sostenibilidad. [http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/agse\\_s/general/OBJECT.htm](http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/agse_s/general/OBJECT.htm)
- Friedrich, T. 1997. Conceptos y objetivos de la labranza en agricultura conservacionista. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín Food and Agricultural Organization (FAO)*. 8: 29-38.
- Gimenez, A. and A. Lamothe. 2000. Site specific management: Zinc deficit in an irrigated corn field. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA*.
- Glancey, J.L., S.K. Upadhyaya, W.J. Chancellor, and J. Rumsey W. 1996. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. *Soil and Tillage Research*. 37(1): 47-65.
- Godwin, R. and M. O'Dogherty. 2007. Integrated soil tillage force prediction models.
- Godwin, R. J. 1975. An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. *Journal Agricultural Engineering Research*. 20(4): 347-352.
- Godwin, R. J., A. J. Reynolds, M. J. O'Dogherty and A.A. Al-Ghazal. 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. *Journal Agricultural Engineering Reserarch*. 55(3): 189-205.

- Griffin, T., Popp, J. and D. Buland. 2000. Economics of variable rate applications of phosphorus on a rice and soybean rotation in Arkansas. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000. (PP. 1-11)*. American Society of Agronomy.
- Gutiérrez, M., J. 2012. Sensores de Diagnostico Aplicados a la Labranza para Agricultura de Precisión. Tesis de Nivel Licenciatura. Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Hayhoe, H., D. Lapen, N. McLaughlin, G. Topp and W. Curnoe. 2000. Spectral analysis and filtering of measurements of mouldboard plow draft. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA (pp. 1-14)*. American Society of Agronomy.
- Heiniger, R. and A. Meijer. 2000. Why variable rate application of lime has increased grower profits and acceptance of precision agriculture in the southeast. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> international Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000 (PP 1-17)*. American Society of Agronomy.
- Henríquez C. and G. Cabalceta. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque Agrícola. ACCS. 1 ed. San José, Costa Rica. 111 p.
- Hoag, D.L. and R. Yoerger R. 1975. Analysis and design of load rings. *American Society of Association Executive ( ASAE)*. 19(1): 995–1000.
- Hoogmoed, W. 1999. Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. *Wageningen Agricultural University. The Netherlands*. 2-190.
- IDAE. 2006. Ahorro, eficiencia energética y sistemas de laboreo agrícola. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España. 2<sup>a</sup> Edición, Corregida.
- Iqbal J.; J. Thomasson, J. Jenkins, P. Owens and F. Whisler. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*. 69(4): 1338-1350.
- Johnson, R. and J. Bradow. 2000. Potential for precision management of cotton fiber quality. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000 (pp. 1-10)*. American Society of Agronomy.
- Jorajuria D. 2004. La resistencia a la penetración como parámetro mecánico del suelo. *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría EDULP*. 43-53.

- Khan, J., R. J. Godwin, J. Kilgour and S. Blackmore B. 2006. Design and calibration of a direct mounted strain gauged lower links system for measurement of tractor-implement forces. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 1(1): 22-25.
- Kheiralla, A.F. and Y. Azmi. 2002. A Tractor instrumentation and data acquisition system for power and energy demand mapping. *Pertanika Journal Science Technology*. 9(2): 1-14.
- Kheiralla, A.F., A. Yahya, M. Zohadie and W. Ishak. 2003. Design and development of a three-point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*. 20(3/4): 271-288.
- Kvien, C. and S. Pocknee. 2000. Introduction to why management zone. *Technical report, National Environmentally Sound Production Agriculture Laboratory (NESPAL), College of Agricultural and Environmental Science, The University of Georgia*.
- Laffita L. A., C. E. Ramos, C. A. H. P. A. García de la Figal, Valdés, and R. Torres C. 2012. Diseño, construcción y calibración de un transductor de fuerza tipo S. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 21(2): 11-16.
- Lal, R. 1995. Tillage systems in the tropics: management options and sustainability implications. *Boletín, Food and Agricultural Organization (FAO)*. 71: 1-53.
- Lickso, Z.J. and P. Harrison H. 1988. Acquisition and processing of soil reaction forces on tillage tools. *Transactions of the ASAE*. 3(2): 315-318.
- Liu, W., S.K., Upadhyaya, T. Kataoka and S. Shibusawa. 1996. Development of a texture/soil compaction sensor. *Precision Agriculture, (Precisionagricu3)*. 617-630.
- Lowen, E.G., E.R. Marshall and M.C. Shaw. 1951. Electric strain gauge tool dynamometers. *Proc. Soc. Exp. Stress Analysis*. 8(2): 1-16.
- Lowenberg, J. 2002. Agricultura de precisión en EE.UU. y potencial de adopción en los países en desarrollo. *Curso de Agricultura de Precisión*. 4. 2002 07 24-25, 24 y 25 de Julio de 2002. *Oncativo. Córdoba. AR*. 32p
- Lowenberg-DeBoer, J. 1997. Economics of precision farming: payoff in the future. *Soil Science News & Views*. 18(5): 1-7
- Magalhaes, P.S.G., W.R. Souza. 1990. Subsolador: Influencia de parámetros geométricos no mecanismo de forcas. 2:1033. *En XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Piracicaba, Sao Paulo, Brasil, Julio de 1990. Sociedad Brasileira de Ingeniería Agrícola, Jaboticabal, Sao Paulo, Brasil*.

- Martínez, R. A. 2008. Sistema de medición. Aplicación Ingeniería Mecánica Agrícola, 52pp., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Mecanización, La Habana, (Reseña).
- McKinion, J. M., J. N. Jenkins, D. Akins, S. B. Turner, J. L. Willers, E. Jallas and F. Whisler D. 2001. Analysis of a precision agriculture approach to cotton production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 32(3): 213-228.
- McKyes, E. 1985. soil cutting and tillage. *Elsevier*.7: 217
- McLaughlin, B. N., S. Tessier And A. Guilbert. 1998. Improved double extended octagonal ring drawbar transducer for 3-D force measurement. *Canadian Agricultural Engineering*. 40(4): 257-264
- McLaughlin, N. B. and Y. Chen. 2012. Effect of strain gage misalignment on cross sensitivity of extended ring (ER) transducers. *Canadian Biosystems Engineering*. 54(2): 23-31
- Moo-Yam, V.M.J. 1999. Desarrollo y evaluación de un sistema de adquisición de datos para la evaluación de implementos de labranza. *Tesis, Maestría, Universidad Veracruzana, Instituto de ingeniería, Veracruz, Veracruz, México*.
- O'Dogherty, M. J. 1975. A Dynamometer to Measure the Forces on a Sugar Beet Topping Knife. *Journal Agricultural Engineering Research*. 20(4):339-345.
- Oriade, C. A. and M. Popp, P. 2000. Precision farming as a risk reducing tool: a wholefarm investigation. In *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000 (pp. 1-9)*. American Society of Agronomy.
- Ortega, B. R and M. Flores L. 2008. Introducción al manejo sitio-especifico. Agricultura de precisión. *Ministerio de Agricultura, Instituto de investigación agropecuaria. CRI Quilamapu, (Chile)*. 13-46.
- Owen, G.T., H. Drummond, L. Cobb and R. Godwin J. 1987. An instrumentation system for deep tillage research. *Transactions of the ASAE*. 30(6): 1578-1582.
- Patterson, J. C. 1977. Soil compaction-effects on urban vegetation. *Journal of Arboriculture*. 3:161-167.
- Patterson, J.; J. Murray and J. Short. 1980. The impact of urban soils on vegetation. *Proceedings of the third conference of the metropolitan tree improvement alliance (METRIA)*. 3: 33-56.
- Phillips, S.H. y H.M. Young Jr. 1973. Agricultura sin laboreo: Labranza Cero. *No. Sirsi:SBUV040857*. 223

- Pires da Silva, A.; S. Inhoff and M. Corsi. 2003. Evaluation of soil compaction in an irrigated short grazing system. *Soil and Tillage Research*. 70(1): 83-90.
- Popp, J. and T. Griffin. 2000. Adoption trends of early adopters of precision farming in Arkansas. In *Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-10). American Society of Agronomy.
- Porta C.J., R.M. López. and D. Roquero C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. España. 3a ed. 929 p.
- Raper, R. L. and J. S. Bergtold. 2007. In-row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Applied. Engineering in Agricultural*. 23(4): 463-471.
- Raper, R. L., E. B. Schwab and M. Dabney S. 2005b. Measurement and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the Southeastern United States. *Soil Tillage Research*. 84(1): 7-17.
- Raper, R. L., E. B. Schwab, K. S. Balkcom, C. H. Burmester and D. Reeves W. 2005a. Effect of annual, biennial, and triennial in-row subsoiling on soil compaction and cotton yield in southeastern U.S. silt loam soil. *Applied Engineering in Agriculture*. 21(3): 337-343.
- Reutebuch, S., J. Fridley and L. Johnson. 1999. Integrating real-time forest machine activity with GPS positional data. *American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*. Paper No. 99-5037). 18-21.
- Reynolds-Chávez, M. A., S. G. Campos-Magaña, M. Cadena-Zapata, J. A. López-López and N. Cuervo-Piña. 2015. Vertical tillage parameters to optimize energy consumption. *Agric. Eng. Int.: CIGR Journal*. 17(4): 130-140.
- Roel, A., R. Plant, G. Pettygrove, J. Williams, J. Young and J. Deng. 2000. Interpreting yield patterns for California rice precision farm management. In *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture (CD), July 16<sup>th</sup>/19*.
- Rosa, U., S. Upadhyaya, M. Koller, M. Josiah and S. Pettygrove. 2000. Precision farming in a tomato production system. In *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000* (pp. 1-15). American Society of Agronomy.
- Rucks, L., F. García, A. Kaplan, L. J. Ponce and M Hill. 2004. Propiedades Físicas del suelo. *Facultad de Agronomía, Departamento Suelos y Aguas; Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay*. 68 p.

- Schuler, R. and B. Lowery. 2000. TDR soil moisture sensor for a subsoiler shank. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA.*
- Shanahan, J., T. Doerge, C. Snyder, A. Luchiari and J. Johnson. 2000. Feasibility of variable rate management of corn hybrids and seeding rates. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000* (pp. 1-12). American Society of Agronomy.
- Shibusawa, s. 1998. Precision farming and terra-mechanics. *In Fifth ISTVS Asia-pacific regional conference in Korea, October: 20-22.*
- Silva, A. P. and D. Kay B. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil.* 184(2): 323-329.
- Silva, F. M. and P. Borges H. 1998. Mecanizacao e agricultura de precisao. SBEA/UFLA, Pocos de caldas. Pp. 232.
- Stafford, J. and K. Evans. 2000. Spatial distribution of potato cyst nematode and the potential for varying nematicide application. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA* (pp. 1-10). American Society of Agronomy.
- Steiner, K.G. 1998. Conserving natural resources and enhancing food security by adopting no tillage. *Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ).* 4-45.
- Stoorvogel, J. and R. Orlich. 2000. An integrated system for precision agriculture in bananas. *In Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000* (pp. 1-14). American Society of Agronomy.
- Sudduth, K. A., S. O. Chung, P. Andrade-Sanchez and S. Upadhyaya, K. 2008. Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *Computers and Electronics in Agriculture.* 61(1): 20-31.
- Sun, Y., D Ma., P Schulze., O Schmittmann. And M. Rose. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Tillage Research.* 86(2): 209-217.
- Taboada M. and C. Álvarez. Fertilidad física de los suelos. Segunda edición. Editorial Facultad Agronómica (UBA). 2008. 272 p.
- Taylor, H. M. and R. Gardner H. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science.* 96(3): 153-156.

- Upadhyaya, S.K., U. A. Rosa, M. Ehsani, M. Koller, M. Josiah and T. Shikanai. 1999. Precision Farming in a Tomato Production System. *ASAE Paper. No. 99-1147*.
- Vaughan, J. 1975. Application of B and K equipment to strain measurements. *Bruel & Kjaer*.
- Velázquez, J.U. 2011. Rediseño de prototipo para labranza de precisión. Tesis de licenciatura. Departamento de maquinaria agrícola. UAAAN Buena Vista, Saltillo; Coahuila, México.
- Venialgo, C. A., N. C. Gutiérrez, A. Corrales, D. Drganc and A. Asselborn. 2002. Estabilidad de agregados y resistencia a la penetración en series de suelos con distintos usos en el Sudoeste del Chaco. *Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas-UNNE*.
- Vivero, W. 1998. Prácticas de Conservación de suelos. *Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable de Montañas. (Quito, Ec.)*. 36-361.
- Whelan, B., A. McBratney and B. Boydell. 1997. The impact of precision agriculture. *In Proceedings of the ABARE Outlook Conference, 'The Future of Cropping in NW NSW', Moree, UK, p. 5*.
- Zhang, N. and R. Taylor. 2000. Applications of a field-level geographic information system (FIS) in precision agriculture. *Applied Engineering in Agriculture*. 17(6): 885.
- Zhang, N., M. Wang, and N. Wang. 2002. Precision agriculture—a world overview. *Computers and Electronics in Agriculture*. 36(2): 113-132.
- Zhang, N., R. Taylor, M. Schrock and S. Staggenborg. 1999. Applications of a field-level geographic information system (FIS) in decision making for precision agriculture. *American Society of Agricultural Engineers. ASAE Paper No. 99-3046*.

ANEXOS

A.1 Análisis Teórico del Diseño del Transductor de Anillo

Un análisis teórico de la aplicación del anillo extendido del transductor octagonal fue desarrollado por Cook & Rabinowicz (1963), esto es basado en el análisis de la energía elástica de un anillo usado como una celda de carga. En la Figura (28) se muestra las fuerzas actuando en un elemento del anillo; donde el momento flexionante ( $M\theta$ ) a cualquier punto en el anillo es calculado y es dado por la ecuación (3).

$$M\theta = \frac{1}{2} F_x r \left( \text{sen}\theta - \frac{2}{\pi} \right) - \frac{1}{2} F_y r \cos\theta \dots\dots\dots(3)$$

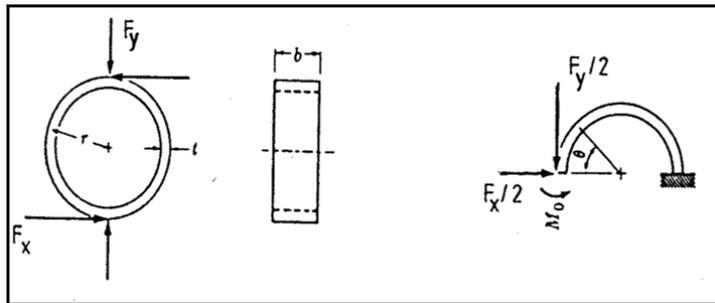


Figura 28. Fuerza actuando en un elemento del anillo

La colocación del nodo para cada fuerza individual involucrada en el elemento del anillo se encuentra cuando el momento producido por  $1/2F_x$  se vuelve cero y esto es verdadero cuando  $\text{sen}\theta$ , ( $\theta = 39.6$ ). El momento debido a  $1/2F_y$  es cero cuando  $\cos\theta$  ( $\theta=0$ ), ( $\theta = 90$ ).

Como resultado de este análisis, las dos colocaciones de nodo de deformación son: ( $\theta = 39.6$ ) para la fuerza ( $F_x$ ) y ( $\theta = 90$ ) para la fuerza ( $F_y$ ). La deformación esperada ( $\varepsilon$ ), producida por el momento en el anillo de carga se obtuvo y está dado por las ecuaciones (4) y (5) siguientes:

$$\varepsilon_{39.6} = \frac{2.31F_y r}{E b t^2} \tag{4}$$

$$\varepsilon_{90} = \frac{1.09F_x r}{E b t^2} \tag{5}$$

Godwin et al., (1993), diseñaron un dinamómetro para medir las fuerzas y momentos que actúan sobre implementos de labranza. El diseño fue basado en dos anillos octagonales extendidos montados “espalda con espalda” o “espaldas no discretas” arreglados con sus ejes longitudinales en ángulos correctos, estos anillos se encontraban montados en un plato cada uno con la finalidad de ser colocado ante el tándem del implemento y así poder ser transportados, también se encontraban montados sobre un tubo con el propósito de medir las fuerzas que ocasiona un par o una fuerza lateral a un implemento. Mediante su investigación encontraron la posición óptima para el montaje de las galgas extensiométricas y fue de 22.5 considerando que es una modificación apropiada para la teoría de un anillo delgado. Las sensibilidades experimentales determinadas son dadas por las ecuaciones (6) y (7) siguientes:

$$\varepsilon_{22.5} = \frac{2.66Fyr}{Ebt^2} \quad (6)$$

Campos et al., (1992) desarrollaron una metodología sencilla para el diseño de Anillos Octagonales teniendo en mente su aplicación en la evaluación de implementos de labranza bajo condiciones de campo. Demostró que existe un efecto de la longitud del plato sobre la localización de los nudos de deformación, cosa que cabe señalar que Godwin *et al.*, (1993) no menciona el efecto de la longitud de los platos (en función del largo total del anillo extendido) sobre la sensibilidad del transductor y su efecto sobre la localización de los nudos de deformación.

$$\varepsilon_{90} = \frac{1.13Fxr}{Ebt^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

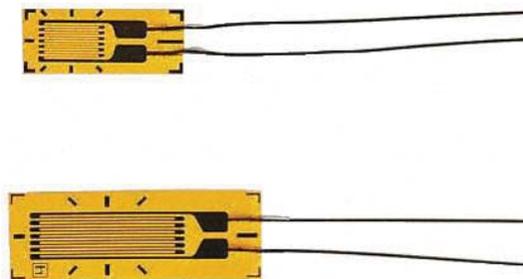
Esto se derivó en realizar una determinación experimental de las dimensiones apropiadas del plato, así como su efecto en la nueva localización de los nudos de deformación para la fuerza horizontal ( $F_x$ ), corrigiendo así la localización del nudo de deformación producido por la componente horizontal localizándose a  $\theta = 39 \frac{1}{4}$  y se encontró que las sensibilidades para cada nudo de deformación dada en las ecuaciones (8) y (9) siguientes:

$$\varepsilon_{39.25} = \frac{2.24Fyr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\varepsilon_{90} = \frac{2.12Fxr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (9)$$

## A.2 Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas son un ejemplo de transductor pasivo que convierte un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Es un dispositivo delgado, con una oblea, que se puede unir (soldar) a una variedad de materiales con el fin de medir los esfuerzos aplicados. Las galgas extensiométricas metálicas se fabrican con alambres resistentes de diámetros muy pequeños o grabado en laminillas metálicas delgadas (figura 29). La resistencia del alambre o de la lámina delgada cambia de longitud a medida que el material al cual esta soldada sufre tensiones o compresiones. Este cambio de resistencia es proporcional a la tensión aplicada y se mide con un puente de Wheatstone adaptado especialmente (Cooper y Helfrick, 1991).



**Figura 29.** Galgas extensiométricas

## A.3 Sensibilidad de Galgas Extensiométricas

La sensibilidad de galgas de deformación es moderada en términos de “factor de las galgas”. La fórmula para el factor de la galga se explica como la Ley de Hook para los materiales como metales generalmente se expresa como la ecuación (10). Según la ecuación (10) puede decirse, que la tensión es obtenida por la determinación de deformación en la región elástica. Aunque hay varios métodos para determinar la deformación, se usan ampliamente las galgas para medir la deformación, porque la

tecnología de usar métodos de galga extensiométrica es la simplicidad de manejo y su alta precisión.

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} = \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots (10)$$

Cuando la deformación ocurre, la resistencia eléctrica de una galga cambia y esto se ilustra en la ecuación (11).

$$\frac{dL}{L} = K\varepsilon \dots\dots\dots (11)$$

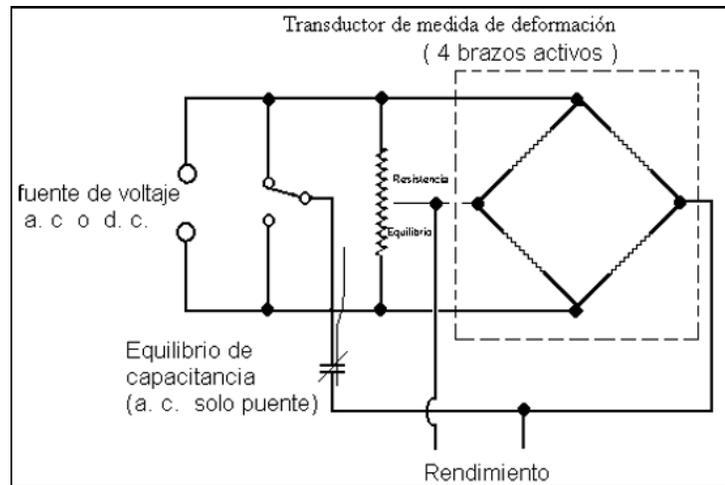
Subsecuentemente, la relación entre las resistencias  $R$  y la sección de material se expresa en la ecuación (12).

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (12)$$

Vaughan, (1975) menciona que una viga bajo una carga de tensión simple, esta incrementa en su longitud y al mismo tiempo es correspondiente a un decremento en la sección transversal. Este es conocido como el efecto Poisson, de manera que la deformación es medida en cualquiera de los planos perpendiculares correspondientes a la carga aplicada, una deformación negativa con valores muy pequeños será detectada. La magnitud de esta deformación es pequeña dependiendo de la relación de Poisson ( $\mu$ ), y esta constante varía de material a material. Este usualmente es sobre 0.3, así que la deformación medida perpendicular a la carga será aproximadamente 0.3 veces la deformación paralela a la carga.

#### A.4 Puente de Wheatstone

Es un dispositivo eléctrico que es normalmente usado para medir  $\varepsilon K = dR/R$  y para convertir esta medición de cambio de resistencia en deformación; se utiliza el potenciómetro y el puente de Wheatstone como se muestra en la figura (30). El puente de Wheatstone puede determinar lecturas de galgas de tensión dinámica y estática. El voltaje de excitación puede ser CA o DC.



**Figura 30.** Puente de Wheatstone

De lo anterior se describe en la siguiente ecuación (1) para el mejor entendimiento e interpretación matemática.

$$V = \frac{U \times FG \times n \times \varepsilon}{4} \times Gain \dots\dots\dots (13)$$

### A.5 Generación de mapas de caracterización del sitio en el software ArcView 3.2

Se procede a la captura de los datos obtenidos por el geoposicionador Ag GPS 132 Trimble. Insertamos una nueva columna en longitud (100°) y latitud (25°), para sumar los grados, minutos y convertirlos a grados decimales.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		Grados	Minutos		Grados	Minutos		Altitud msnm				
2	1	100	37.24000		25	2.14474		1877.3				
3	2	100	37.29862		25	2.13508		1876.81				
4	3	100	37.35706		25	2.12551		1877.54				
5	4	100	37.41541		25	2.11567		1876				
6	5	100	37.93499		25	2.10570		1875.84				
7	6	100	37.47292		25	2.10363		1876.06				
8	7	100	37.41489		25	2.11319		1875.93				
9	8	100	37.35646		25	2.12289		1876.93				
10	9	100	37.29814		25	2.13235		1877.03				
11	10	100	37.23936		25	2.14214		1877.23				
12	11	100	37.23930		25	2.13988		1877.63				
13	12	100	37.29752		25	2.12961		1876.93				
14	13	100	37.35589		25	2.12016		1876.87				
15	14	100	37.41464		25	2.11054		1875.8				

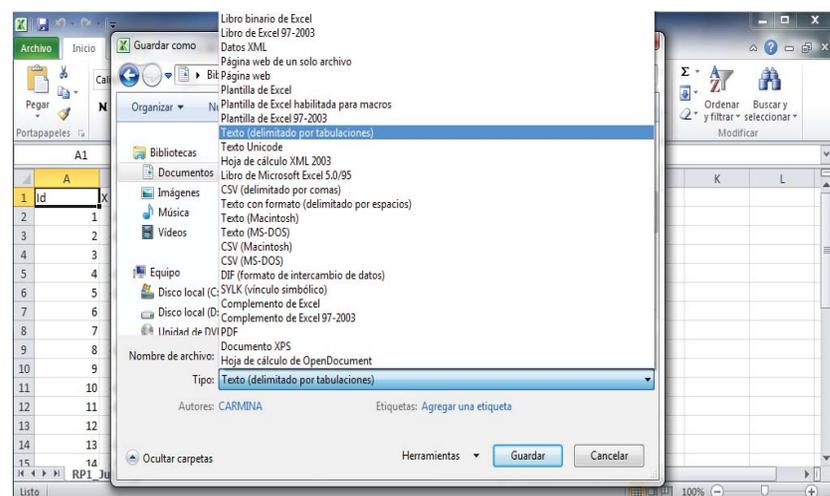
En la nueva columna se coloca la formula = (Grados + (Minutos/60)) en el caso de longitud se multiplicara por -1 por situación geográfica.

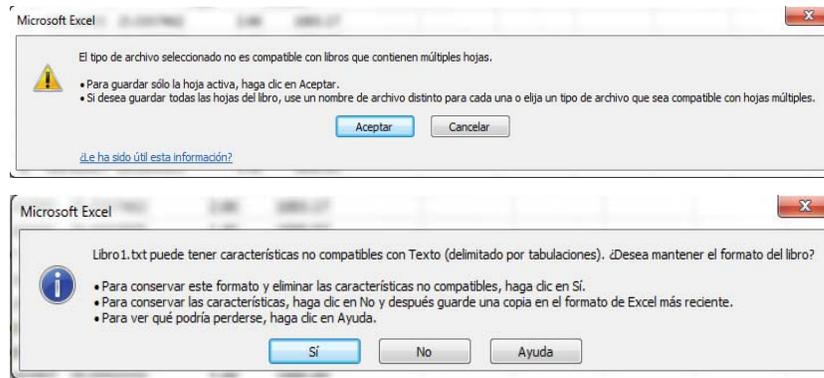
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Grados	Minutos		Grados	Minutos		Altitud msnm			
2	1	100	37.24000	=(B2+(C2/60))*-1	25	2.14474	=(E2+(F2/60))				
3	2	100	37.29862		25	2.13508		1876.81			
4	3	100	37.35706		25	2.12551		1877.54			
5	4	100	37.41541		25	2.11567		1876			
6	5	100	37.93499		25	2.10570		1875.84			
7	6	100	37.47292		25	2.10363		1876.06			
8	7	100	37.41489		25	2.11319		1875.93			
9	8	100	37.35646		25	2.12289		1876.93			
10	9	100	37.29814		25	2.13235		1877.03			
11	10	100	37.23936		25	2.14214		1877.23			
12	11	100	37.23930		25	2.13988		1877.63			
13	12	100	37.29752		25	2.12961		1876.93			
14	13	100	37.35589		25	2.12016		1876.87			
15	14	100	37.41464		25	2.11054		1875.8			

En una nueva hoja de Excel se copian X, Y, Mpa y altitud.

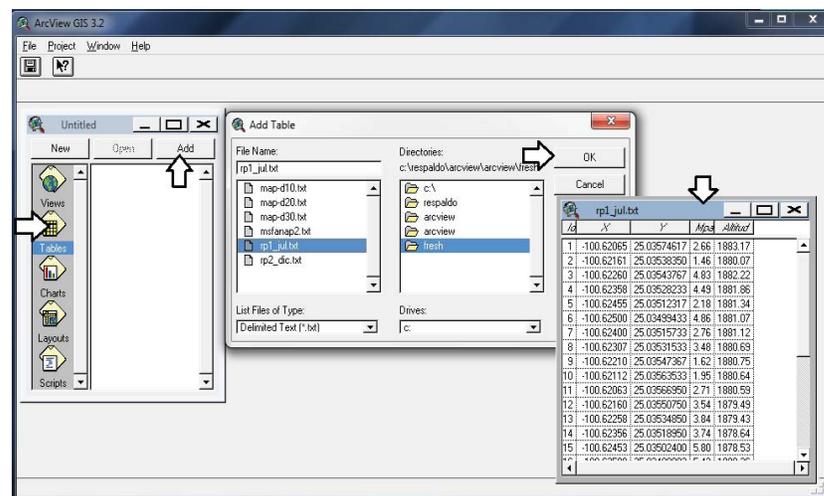
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Id	X	Y	Mpa	Altitud							
2	1	-100.62065	25.0357462	2.66	1883.17							
3	2	-100.62161	25.0353835	1.46	1880.07							
4	3	-100.6226	25.0354377	4.83	1882.22							
5	4	-100.62358	25.0352823	4.49	1881.86							
6	5	-100.62455	25.0351232	2.18	1881.34							
7	6	-100.625	25.0349943	4.86	1881.07							
8	7	-100.624	25.0351573	2.76	1881.12							
9	8	-100.62307	25.0353153	3.48	1880.69							
10	9	-100.6221	25.0354737	1.62	1880.75							
11	10	-100.62112	25.0356353	1.95	1880.64							
12	11	-100.62063	25.0356695	2.71	1880.59							
13	12	-100.6216	25.0355075	3.54	1879.49							
14	13	-100.62258	25.0353485	3.84	1879.43							
15	14	-100.62356	25.0351895	3.74	1878.64							

Procedemos a guardar la información como (Delimitado por Tabulación).TxT, le damos guardar en las próximas dos ventanas que genera se le dará aceptar y si respectivamente.

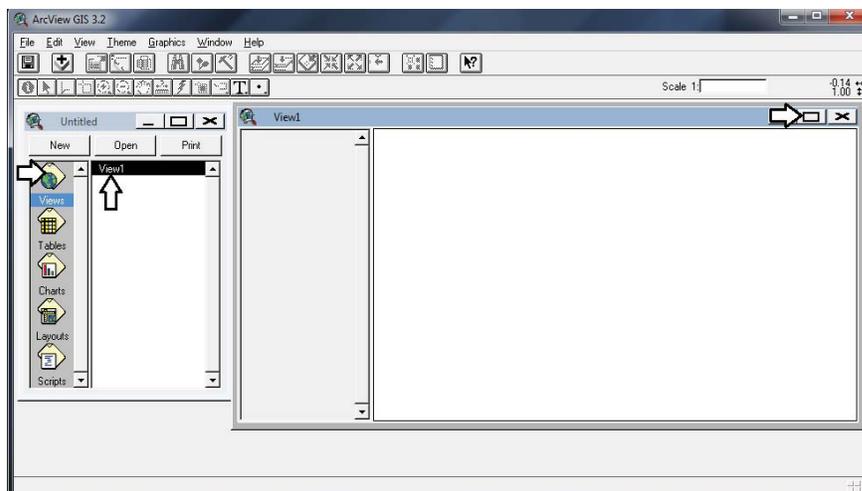




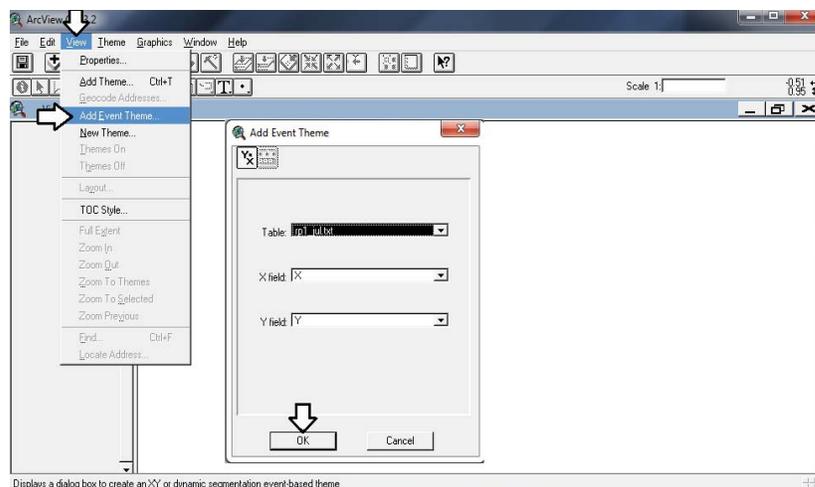
Una vez guardado abrimos el software ArcView 3.2, seleccionamos TLABLE + ADD buscaremos nuestro archivo .TxT, le damos Ok y nos aparecerá la tabla de datos.



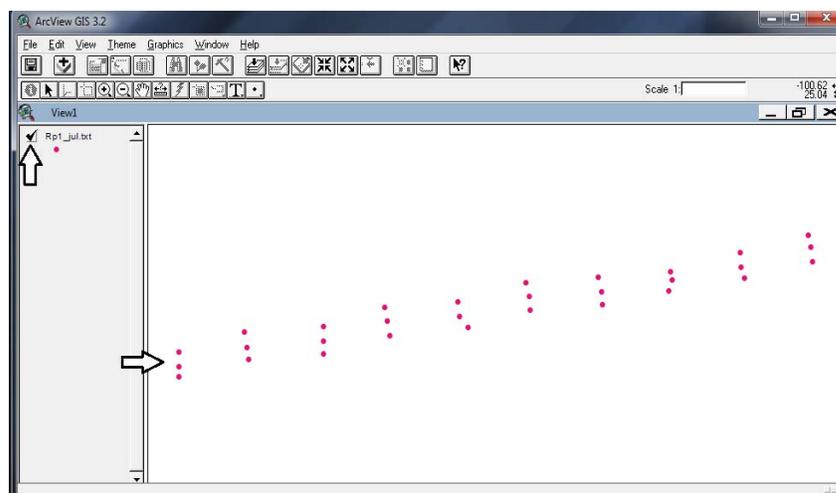
Seleccionamos Views + doble clic en View1 y se abrirá la ventana de trabajo.



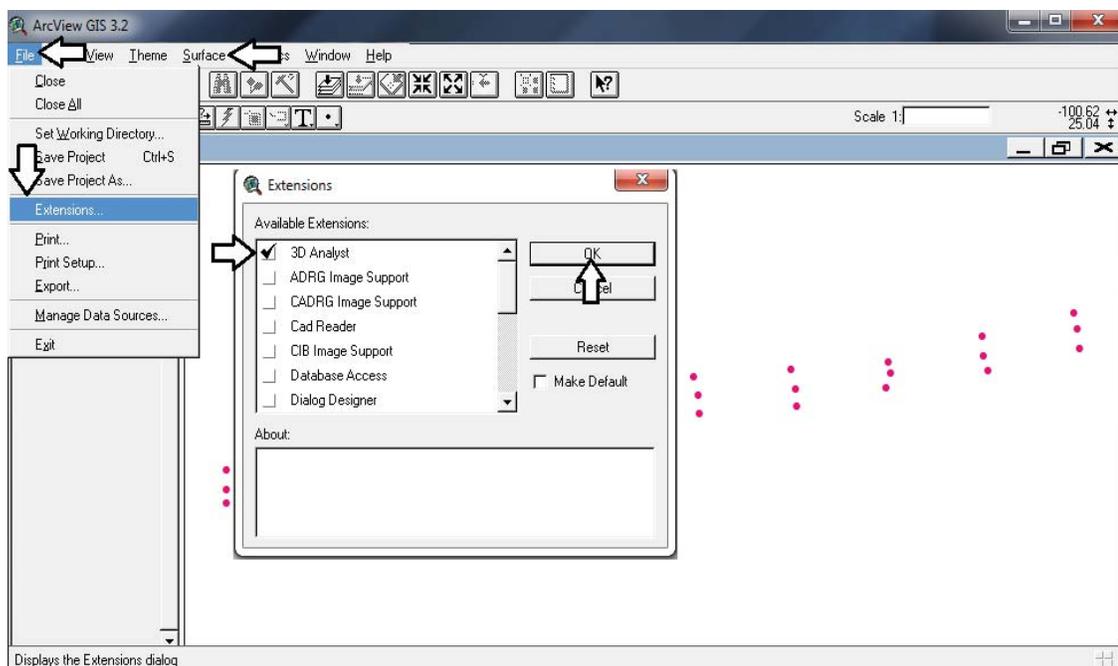
En View + Add Event Theme nos arroja una ventana donde nos pide el nombre de la tabla, X y Y esto por defecto nos lo proporciona el software le damos Ok.



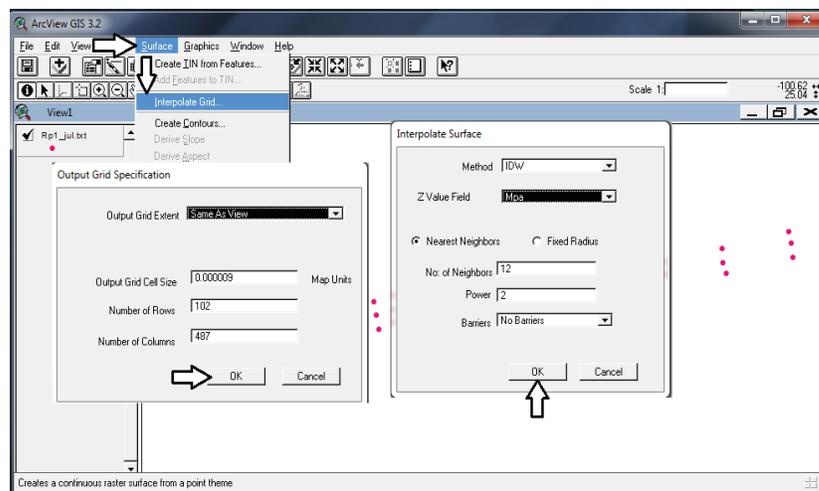
Nos abre el nuevo tema con el nombre de la tabla, para visualizarlo lo seleccionamos.



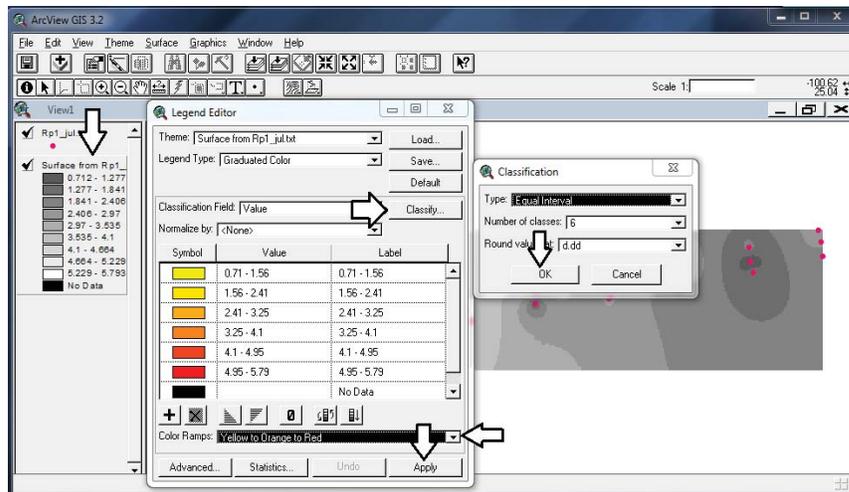
Para realizar la interpolación con función la resistencia a la penetración, se tiene que activar la extensión 3D ANALISYS. Esto se hará *File + Extensions + 3D ANALISYS + OK*, listo aparecerá la extensión Surface.



Con esta nueva extensión *Surface + Interpolate Grid* nos aparecerá una ventana “*Output Grid Specification*” en *Output Grid Extent* seleccionaremos *Same As View* al darle OK nos arroja una nueva ventana “*Interpolate Surface*” en ella seleccionamos en *Method* *IDW* y en *ZValue Field* *Mpa* y finalmente *OK*.



Nos generara un nuevo tema con la interpolación esta la llevaremos debajo del tema de puntos y la seleccionaremos para poder visualizar los dos temas. Para editar la interpolación se da doble clic en el tema de interpolación abre la ventana “*Legend Editor*” seleccionas *Classify*, abrirá *Classification* en *Number of clases* y *Round values at* seleccionamos la opción 6 y d.dd respectivamente *OK*, finalmente seleccionas el color y se oprime *Apply*.



Al final visualizará tu interpolación de la siguiente manera.

