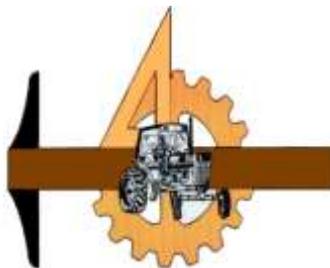


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”



DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



SENSORES DE DIAGNOSTICO APLICADOS A LA
LABRANZA PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

POR:

JESÚS GUTIÉRREZ MARISCAL

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MÉCANICO AGRÍCOLA

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

MAYO 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

SENSORES DE DIAGNOSTICO APLICADOS A LA LABRANZA PARA AGRICULTURA
DE PRECISIÓN

Por:
Jesús Gutiérrez Mariscal

Tesis

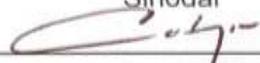
Que somete a consideración del H. jurado. Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

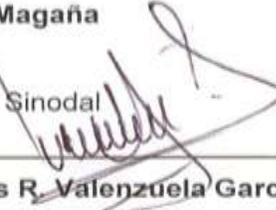
INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobado por el Comité de Tesis

Asesor principal

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal

Dr. Martin Cadena Zapata

Sinodal

Dr. Jesús R. Valenzuela García

Coordinador de la división de ingeniería
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"

MC. Luis Rodríguez Gutiérrez

Buenavista, saltillo, Coahuila México

Mayo 2012


Coordinación de
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A Dios. Por darme la vida, la salud y la capacidad de terminar mis estudios, por guiarme y librarme de todo peligro, también por darme una familia tan hermosa y maravillosa y gracias a Él he podido alcanzar mis objetivos, sueños y el deseo de seguir adelante en esta vida muchas gracias Dios.

A mi Alma Terra Mater Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Por haberme abierto las puertas para seguir estudiando y así cumplir con unos de mis sueños, objetivos, metas de mis estudios y concluir con una vida profesional.

AL Dr. Santos Gabriel Campos Magaña. Por brindarme su confianza, su apoyo, experiencia, su tiempo y conocimientos compartidos en este proyecto de tesis y durante toda mi carrera.

A los maestros del departamento de Maquinaria Agrícola, en especial a:

M.C. Héctor Uriel Serna Fernández

Dr. Martín Cadena Zapata

M.C. Juan Arredondo Valdez

Dr. Jesús R. Valenzuela García

M.C. Marco Antonio Reynolds

Ing. Rosendo González Garza

M.C. Juan A. Guerrero Hernández

M.C. Tomás Gaytan Muñiz

M.C. Blanca E. de la Peña Casas

A todos mis profesores que me brindaron sus conocimientos, sus experiencias, su tiempo y apoyo durante mi carrera a todos ellos muchas gracias.

A mis compañeros de la generación CXII de la carrera ingeniero mecánico agrícola en especial a: Víctor Hugo, Juan Antonio, Luis, Candelario, Juan Carlos, Víctor, Jhoni, Oscar, Paul, Andi Gadiel, Eduardo, Ariel, Alexander, Javier, Edgar, Abelardo. Gracias a mis compañeros de la carrera por los momentos que pasaron en estos cuatro años.

A mi familia. Porque estuvieron a mi lado a lo largo de mi vida como estudiante y me apoyaron incondicionalmente y que forman parte fundamental de esta etapa gracias por sus apoyos.

DEDICATORIA

Quiero agradecer antes que nada primeramente a Dios padre todo poderoso por darme unos padres que tanto los quiero y los admiro por sus sacrificios que ellos me dan y me dieron cuando yo más lo necesitaba desde el primer día de mi vida. Con mucho cariño, amor y respeto a las personas que admiro que Dios me los cuide siempre en donde quiera que ellos se encuentren.

A mis padres:

Sr. Basilio Gutiérrez Gutiérrez y Sra. Arminda Mariscal Ortega

Porque me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo mamá, gracias por todo papá. En especial para ti papá, por tus consejos, por creer en mí por tu apoyo incondicional, eres mi guía a seguir te quiero mucho padre. Gracias mami primero que nada por darme la vida por estar a mi lado en lo que llevo de vida por ser mi gran respaldo por esos consejos, por aquellas palabras de ánimo, gracias mami espero algún día poder pagarte por todo lo que has hecho por mi dios los cuide y los bendiga donde quieran que estén los quiero mucho.

A mis hermanitos:

Ana Albina Gutiérrez Mariscal (†)

Dolores Magda Gutiérrez Mariscal

Juan Gutiérrez Mariscal

Heriberto Victoriano Gutiérrez Mariscal

A ellos por brindarme su apoyo y su cariño, por apoyarme siempre en todas mis decisiones y por acordarse siempre de mi, que ustedes siempre estarán en mi corazón, muchas gracias y que dios este con ustedes.

A mis tíos

Rito Victoriano, Rosa, Por apoyarme durante mi carrera profesional en todas las cosas, consejos y porque siempre están conmigo Dios me los cuide siempre.

A mis primos (as)

Gerardo Fermín, Eva Leovilde, Laura, Arnulfo Fermín Gracias por apoyarme siempre en cualquier momento que necesitaba de ustedes muchas gracias que Dios los bendiga siempre en su vida.

A mi novia Concepción

Por su comprensión y paciencia que siempre tuvo durante mi estancia que Dios te bendiga siempre.

A mis amigos

Juan Antonio, Víctor Hugo, José Orbelin, Isai, Julio Cesar, Luis, Juan Carlos, por apoyarme durante mi carrera profesional y en todos los momentos difíciles de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS	
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	XI
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Hipótesis.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Agricultura de precisión	6
2.2 Mecánica de suelos.....	13
2.3 Resistencia a la penetración.....	14
2.4 Resistencia al esfuerzo cortante del suelo	19
2.5 Rotura del suelo por herramientas de tipo cincel.....	20
2.6 Diseño de transductores.....	21
2.6.1 Sensor Octagonal De Anillo Extendido.....	21
2.6.2 Galgas extensiométricas	22
2.6.3 Puente de Wheatstone	26
2.7 Adquisición de datos.....	27
2.7.1 Sistema de adquisición de datos	27
2.7.2 DAQ BOOK200/2000.....	29
2.8 Variabilidad.....	30
2.8.1 Medición de la Variabilidad	32
2.8.2 Mapa de Rendimiento.....	34
2.9 Dosis Variable	38
III. MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1 Materiales y equipo.....	40
3.2 Metodología.....	43
3.2.1 Desarrollo y Pruebas del Sensor de Resistencia a la Penetración	43
3.2.2. Consideraciones del Diseño del Sensor y Herramienta del Penetrómetro.	43
3.2.3. Montaje de Galgas Extensiométricas	45

3.2.4 Calibración del Sensor (RING)	45
3.3 Desarrollo y Pruebas del Sensor a la Falla de Suelo.....	46
3.3.1 Calibración del Sensor de Torque	47
3.3.2 Consideraciones del Diseño del Sensor y Herramienta del Torque.....	48
3.4 Pruebas de Campo del sensor de Resistencia a la Penetración y sensor de falla del suelo ..	51
3.5 Realización del mapeo	52
IV. RESULTADOS.....	53
4.1 Características y Calibración del sensor Ring Para Resistencia a la Penetración.....	53
4.1.1 Evaluación del Sensor Ring Para Determinar la Resistencia a la Penetración y Localización de Áreas Compactadas del Suelo bajo condiciones de campo.....	56
4.2 Características y Calibración del sensor de esfuerzo a la falla del suelo	62
4.2.1 Evaluación del Sensor de fuerza a la falla de suelo y herramienta.....	67
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Recomendaciones	72
VI. LITERATURA CITADA.....	73
VII. ANEXOS	77
Anexo 7.1 Detalles de calibración bajo condiciones de laboratorio del sensor Ring del Penetrometro para su uso.	77
Anexo 7.2 Datos Obtenidos del Penetrómetro con el Sensor Ring en Pruebas de Campo.....	79
Anexo 7.3 Detalles de Cada Dato de Calibración bajo condiciones de laboratorio del Sensor de esfuerzo a la falla del suelo Con Diferentes Cargas a Diferentes Posiciones. Los datos de las graficas aparecen en la parte de resultados en el cuadro (4.3).....	85
Anexo 7.4. Detalles de Cada Dato de pruebas bajo condiciones de campo del Sensor de esfuerzo a la falla del suelo.....	87
Anexo 7.5 Procedimiento para generar los mapas.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Las tres etapas de la agricultura de precisión, fuente: AGCO.....	6
FIGURA 2.2 Herramientas para la agricultura de precisión que permiten obtención y análisis de datos geo-referenciados.....	7
FIGURA 2.3 Pasos involucrados en la agricultura de precisión.....	8
FIGURA 2.4. Interacción entre varios elementos que integran la agricultura de precisión, fuente: Universidad del País Vasco, 2000.....	9
FIGURA 2.5. Galga extensiométrica uniaxial: a) alambre; b) laminilla. (Cooper, 1991).....	24
FIGURA 2.6 Roseta de dos elementos, a) laminillas apiladas a 90°C; b) laminillas plana a 90°C; laminilla plana delgada a 90°C. (Cooper, 1991).....	25
FIGURA 2.7. Puente empleado para las mediciones de precisión de resistencias en el rango de fracciones de Ohm hasta varios MegaOhms.....	27
FIGURA 2.8 Sistema de adquisición de datos analógicos.....	28
FIGURA 2.9 Dispositivo de adquisición de datos DAQ BOOK200.....	29
FIGURA 2.10 Importancia de la variabilidad.....	32
FIGURA 2.11. Mapa de preproducción.....	33
FIGURA 2.12. Mapas de rendimientos de diferentes años.....	33
FIGURA 2.13 Variabilidad de la estimación del rendimiento.....	34
FIGURA 2.14. A la izquierda, representación de los datos de posición y rendimiento, sin tratamiento con SIG. A la derecha, la misma parcela tras tratar los datos con un SIG.....	34
FIGURA 2.15. Sistema de adquisición de datos para obtención de mapas de rendimiento.....	36
FIGURA 2.16. Manejo de sitio específico.....	38
FIGURA 3.17 Materiales y equipo.....	40
FIGURA 3.18. Configuración de las galgas en el puente de wheatstone.....	45
FIGURA 3.19. Herramienta del sensor de falla del suelo (torque).....	47
FIGURA 3.20. Barra de torsión para el sensor de cohesión y sus radios.....	47
FIGURA 3.21. Proceso de pruebas en laboratorio del sensor de cohesión y contrapesos empleados en la calibración.....	48
FIGURA 3.22. Barra circular en torsión pura.....	48
FIGURA 3.23. Sensor del esfuerzo a la falla del suelo. a) cableado del sensor del tubo circular cableado en los dos lados opuestos del mismo. b) representación de las fuerzas actuando en la	

herramienta del de falla del suelo y el arreglo de circuitos con galgas extensiométricas en puentes de wheatstone.	50
FIGURA 3.24. Especificaciones de galgas extensiométricas empleadas en el elemento sensor, en arreglos de Puente de Wheatstone.	50
FIGURA 3.25 Predio, Tractor y Carro-portasensores empleados en campo para medir la resistencia a la penetración en el campo experimental rancho navidad.	52
FIGURA 4.26. Diseño del carro porta sensores con dimensiones en 3D con la herramienta del sensor (ring) y penetrómetro. En SolidWorks Premium 2010.	53
FIGURA 4.27. Dimensiones del transductor del ring con un acero 1045 para una resistencia a la penetración de 10 KN.	54
FIGURA 4.28. Sensor de resistencia a la penetración. (a) cableado del sensor del ring. (b) representación de la fuerza actuando en la herramienta para la penetración y el arreglo de circuitos con galgas extensiométricas que están representadas con los números en puentes de wheatstone.	54
FIGURA 4.29. Especificaciones de galgas extensiométricas empleadas en el elemento sensor, en arreglos de puente de wheatstone.	55
FIGURA 4.30. Calibración de fuerzas del sensor ring con una capacidad de 10 N. a diferentes fuerzas.	55
FIGURA 4.31. Ecuación de respuesta de la fuerza, aplicada del sensor del ring con una capacidad de 10 KN.	56
FIGURA 4.32. Evaluación encampo para determinar la resistencia a la penetración a diferentes profundidades y generación de mapas con sistema de información geográfica.	57
FIGURA 4.33. Datos de fuerza del penetrómetro en campo a 10, 20, 30 y 40 cm de profundidad. ..	57
FIGURA 4.34 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 10 cm.	58
FIGURA 4.34 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 10 cm.	58
FIGURA 4.35 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 20 cm.	59
FIGURA 4.35 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 20 cm.	59

FIGURA 4.36 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 30 cm.....	60
FIGURA 4.36 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 30 cm.....	60
FIGURA 4.37 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 40 cm.....	61
FIGURA 4.37 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 40 cm.....	61
FIGURA 4.38. Características del carro porta sensores y herramienta del sensor (torque). En SolidWorks Premium 2010.	62
FIGURA 4.39. Calibración del de fuerzas del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento en los pesos de izquierda-derecha.....	63
FIGURA 4.40. Cargas y descargas considerando pesos y distancias para la calibración del sensor de esfuerzo a la falla del suelo. A una posición de la fuerza de 18, 28, y 38 cm con respecto del centro del sensor.	63
FIGURA 4.41. Ecuación de respuesta, fuerza, del sensor con una capacidad de 1.62 N-m.....	67
FIGURA 4.42. Evaluación en campo para determinar la demanda de fuerza para la falla del suelo.	68
FIGURA 4.43. Datos de demanda de fuerza para la falla del suelo de en campo.....	68
FIGURA 4.44 A. Mapa de fuerza a la falla del suelo.	70
FIGURA 4.44 B. Imagen en 3d de fuerza a la falla del suelo.	70

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 2.1. Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (Adaptado de USDA, 1998).....	12
CUADRO 3.2. Datos que se utilizaron en la calibración del sensor en la escala del acondicionador de señales DBK– 43.....	46
CUADRO 4.3. Datos de calibración bajo condiciones de laboratorio de fuerzas (N) en mili volts (mV) del sensor de esfuerzo a la falla del suelo, en tres posiciones diferentes respecto al centro del sensor; izquierda derecha a 38, 28 y 18 cm a tres diferentes pesos A=910.7, B=493.5 y C=244 gr.....	64
CUADRO 4.4. Datos de las pruebas del sensor esfuerzo a la falla del suelo bajo condiciones de campo.....	69

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en “El Departamento de Maquinaria Agrícola de la UAAAN” y forma parte del proyecto titulado: “Desarrollo de equipos, sensores e instrumentos para agricultura de precisión y labranza de conservación” que dentro de sus objetivos destaca, la medición de resistencia al corte y penetración geo-referenciados. Se adecuó el tractor, John Deere 6403 para recibir el sistema de adquisición de datos, computadoras así como la alimentación de energía (110v) para las mismas. Se adecuó el marco del equipo MCC 3/5/7 de la empresa TECNOMEC AGRÍCOLA S.A de C.V como carroportasensores incorporándole un sistema con gato hidráulico para controlar la profundidad de 30 a 60cm. Para esto se tuvo que diseñar un penetrómetro con un sensor de anillo, cuya capacidad fue de 10 KN, para medir la resistencia a la penetración capaz de trabajar en un rango de profundidades de 0.0 a 0.40 m y un sensor de falla de suelo con una capacidad de 1.6 N.m. El equipo diseñado mostró una alta sensibilidad en la medición de fuerzas de resistencia a la penetración de 1.462 mv-N, con un coeficiente de correlación de 99.7%. El sensor de torque mostro durante su calibración una sensibilidad de 0.03511 Mv-NM y un coeficiente de correlación de 99.6%. La evaluación en campo del sistema, tanto para la penetración y la falla del suelo se realizó en un terreno de 100 x 100 m² con muestreos cada 20 m, teniendo un total de 25 puntos. La información fue mapeada empleando el sistema de información geográfica (GIS), con 3 niveles de interpolación (0.02, 1.0 y 1.0 m). En el mapeo de las pruebas de campo, se detectaron capas compactadas en profundidades mayores a los 20 cm en determinadas áreas del terreno en evaluación. Se requiere incorporar al sistema del Penetrómetro el sensor de profundidad de avance del mismo.

PALABRAS CLAVE: COMPACTACIÓN, SENSOR, SENSOR DE RESISTENCIA DEL SUELO, PENETRÓMETRO, SENSOR DE COHESIÓN, GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS, TORQUE.

I. INTRODUCCIÓN

La presente propuesta tiene como propósito contribuir al desarrollo de equipo e instrumentos que permitan medir capas compactas del suelo por medio de la penetración con el propósito de contar con herramientas confiables tanto para docencia, como para investigación en el manejo de sitio específico. Teniendo como objetivos el diseñar y contribuir un bastidor y sensor que provea y soporte a un sistema de componentes electrónicos y mecánicos capaz de realizar mediciones del estado físico mecánico en suelos agrícolas.

La Agricultura de precisión o manejo de sitio específico es la utilización de herramientas que permiten la obtención y análisis de datos geo-referenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos; así como, una disminución sustantiva en la contaminación.

La agricultura de precisión consiste en un conjunto de tecnologías altamente desarrolladas, que comprenden sistemas satelitales y maquinaria agrícola, los cuales están integrados por diferentes sistemas como son: Sistemas de información geográfica (SIG); Sistemas de posicionamiento global (GPS); Computadoras, sensores y controladores, así como, Maquinaria especializada.

La agricultura de precisión es el conjunto de técnicas que permiten un mejor gerenciamiento de la de la producción, fundamentado en el manejo diferenciado de áreas agrícolas. Representan un avance en la búsqueda del aumento de la productividad agrícola, reducción del uso indiscriminado e irracional de los insumos y consecuentemente de la reducción de los costos de producción.

El manejo de sitio específico, comienza por los mapas de rendimiento geoposicionados; así como, por los mapas de prescripción, para correlacionar la variabilidad de rendimiento con la variabilidad del suelo tanto en nutrientes, topografía, como en aspectos físico-químicos del mismo, con la finalidad de realizar y elaborar mapas de prescripción correspondientes para la aplicación de dosis variable de insumos.

Mapas de Diagnóstico alude, en general, al análisis que se realiza para determinar cualquier situación y cuáles son las tendencias. Esta determinación se realiza sobre la base de datos y hechos recogidos y ordenados sistemáticamente, que permiten juzgar mejor qué es lo que está pasando.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc.

Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable de instrumentación, con lo que puede decirse también que es un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades, con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo. Como por ejemplo el termómetro de mercurio que aprovecha la propiedad que posee el mercurio de dilatarse o contraerse por la acción de la temperatura. Un sensor también puede decirse que es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Áreas de aplicación de los sensores: Industria automotriz, Industria aeroespacial, Medicina, Industria de manufactura, Robótica, etc.

A nivel mundial las oportunidades y riesgos actuales en la producción de alimentos están vinculadas con: alta demanda mundial de alimentos (granos, carne, aceite, proteína, bioenergía); alta demanda y costo de petróleo y gas natural en todo el mundo (el gas natural es 90% del costo de la producción de amoníaco); aumento del área fertilizada en el mundo; deficiencias de nutrientes que limitan la producción de cultivos y forrajes; así como, altos índices de contaminación ambiental entre otros.

Una forma de contrarrestar estos efectos y corregir algunas de sus causas, es mediante el manejo óptimo en la aplicación de insumos en la agricultura. Para la aplicación de esta tecnología se requiere de una fase de diagnóstico previo de rendimiento, combinado con muestreos de ambientes a nivel de periodo, para determinar los factores limitantes de la producción; así como su localización precisa para poder de ahí realizar las prescripciones en tiempo real y sitio específico de insumos. Se requiere para lo anterior contar con sistemas que se integren entre otros por; Sistema de Posicionamiento Global (AgDGPS), Sensores, Sistema de Información Geográfica (SIG); así como, equipos de dosificación variable de insumos. A nivel mundial, como un indicador existen alrededor de 20 países que han incorporado estos sistemas inteligentes y automatizados en la aplicación de insumos agrícolas, entre los que destacan Estados Unidos con 30,000 unidades de producción, Argentina con 1200, Brasil con 250, Reino Unido con 4000, Paraguay con 4 y México con cero unidades.

Actualmente, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) no se cuenta con maquinaria ni equipos e instrumentos para docencia e investigación en mecanización para la agricultura de precisión. Durante la convocatoria interna 2009, para Proyectos de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro fue autorizado un proyecto denominado: DESARROLLO DE EQUIPOS, SENSORES E INSTRUMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISION Y LABRANZA DE CONSERVACION. Cuyos objetivos planteados fueron:

- ✓ Fortalecer la enseñanza e investigación en agricultura de precisión.
- ✓ Evaluación de calidad de equipos agrícolas de labranza de conservación.
- ✓ Desarrollo de un Sistema de simulación de dosis variable de semillas.
- ✓ Sistema de Dosificación Variable de Semillas en tiempo real.
- ✓ Desarrollo de equipo para la Generación de Mapas de Conductividad Eléctrica, resistencia al corte y penetración geo-referenciados.
- ✓ Desarrollo de un Sistema Integral para el Monitoreo de Fuerzas en Equipos de Labranza.

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un bastidor que provea y soporte a un sistema de componentes electrónicos y mecánicos capaz de realizar mediciones del estado físico mecánico en suelos agrícolas.

1.2 Objetivos específicos

- ✓ Validar un sistema integral GPS-SENSORES-GIS que permita medir el estado físico del suelo.
- ✓ Evaluación de un Penetrómetro con capacidad de 10,000 N y con una profundidad de penetración de 0.0 – 0.40 m.
- ✓ Evaluación del sensor de falla de suelo con capacidad de 1.62 N.m
- ✓ Evaluación bajo condiciones de campo de resistencia a la penetración y al corte.

1.3 Hipótesis

Es posible medir los parámetros físicos del suelo mediante la utilización del sensor de Penetración y medidor de la falla del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agricultura de precisión

Los agentes involucrados en el desarrollo y adopción de las prácticas de agricultura de precisión suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes AGCO 2005 (Allis Corporación Gleaner), (figura 2.1): 1) Recolección de datos 2) procesamiento e interpretación de la información 3) Aplicación de insumos.

Con base en 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 tradicionales en toda el área. Es una optimización del uso de los insumos que deposita en el suelo la cantidad de semilla que cada punto soporta, la cantidad de nutrientes requeridos, y además el control de malezas, plagas y enfermedades se hace solamente en los puntos que demanden tal control.



FIGURA 2.1. Las tres etapas de la agricultura de precisión, fuente: AGCO.

Bragachini *et al.*, (2004) la agricultura de Precisión es una tecnología de información basada en el posicionamiento satelital y que consiste en obtener datos georeferenciados en los lotes para un mejor conocimiento de la variabilidad de rendimiento expresado por los cultivos en diferentes sitios como loma, media loma y bajo (figura 2.2); se obtiene mejor respuesta en lotes que posean alta variabilidad de potencial de rendimiento ya sea por relieve, historia 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, espaciamiento entre hileras, etc. Los beneficios se pueden resumir valorando el análisis y diagnóstico posible de 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.

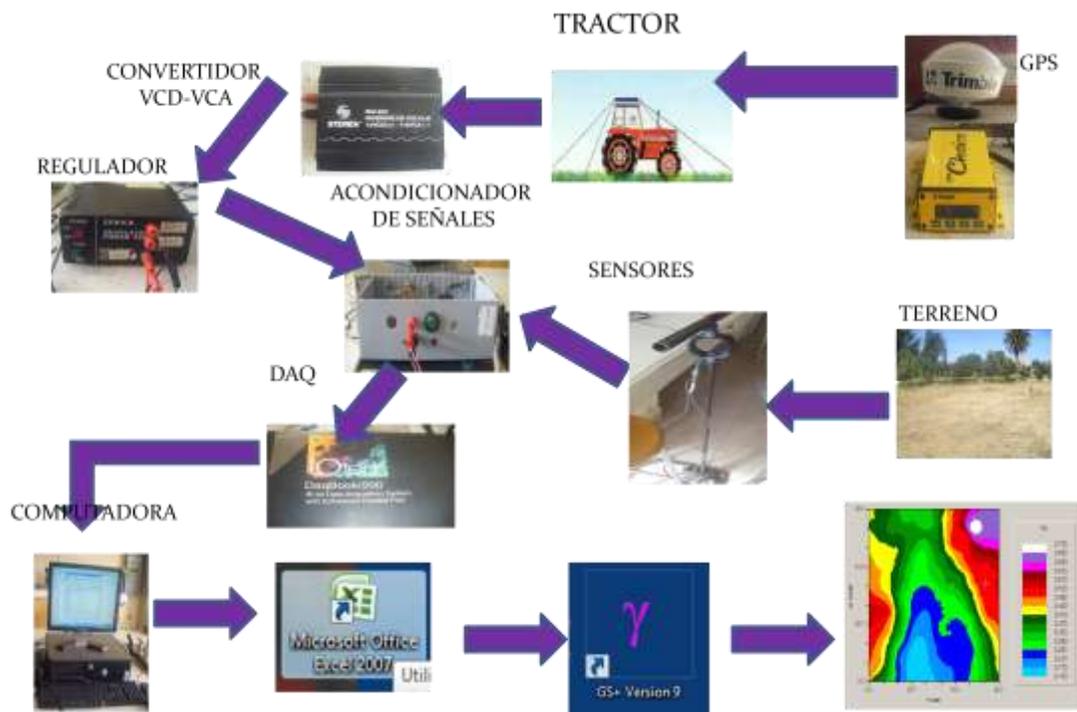


FIGURA 2.2 Herramientas para la agricultura de precisión que permiten obtención y análisis de datos georeferenciados.

Bongiovanni, (2003) agricultura de Precisión es el uso de la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente dentro de un lote. La agricultura de precisión involucra el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de otros medios electrónicos para obtener datos del cultivo. La información obtenida puede usarse para implementar planes de manejo de la variabilidad. Junto a la biotecnología, la agricultura de precisión es uno de los cambios tecnológicos más importantes que ha vivido la agricultura en los últimos años.

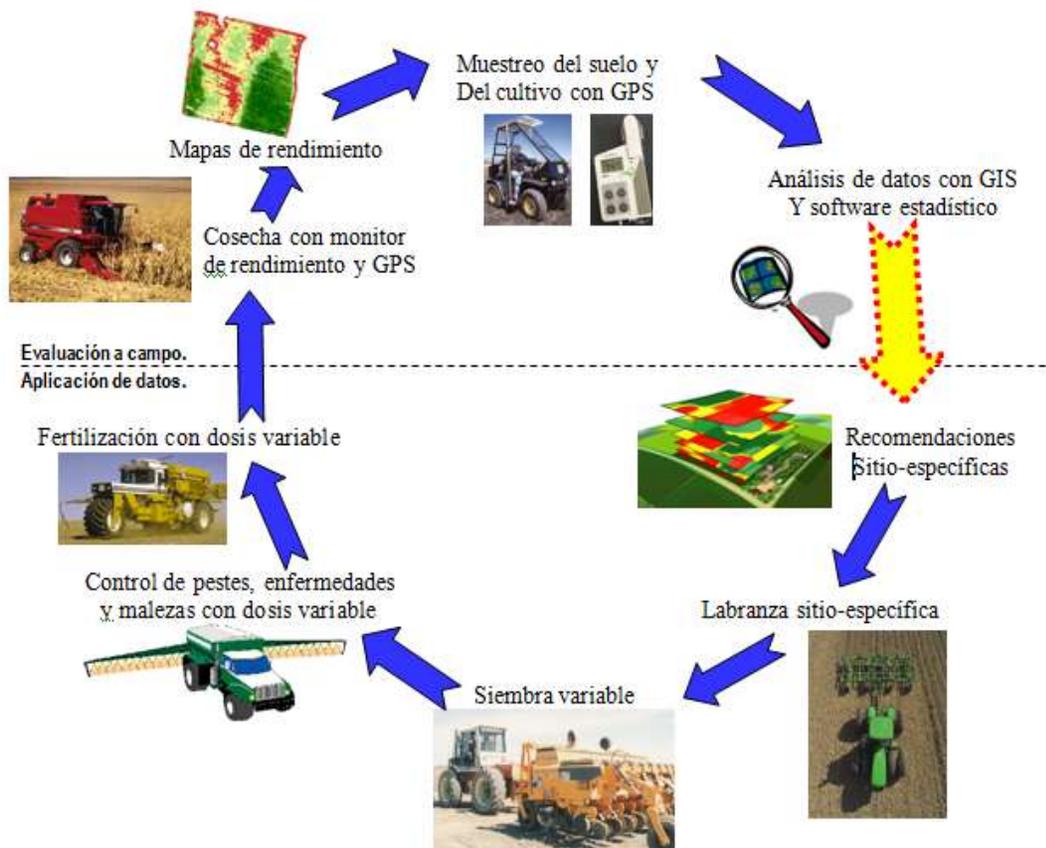


FIGURA 2.3 Pasos involucrados en la agricultura de precisión

La agricultura de precisión está haciendo que la agricultura se parezca cada vez más a un proceso industrial, aunque la adopción de esta tecnología ha sido relativamente lenta hasta el momento. Una de las barreras clave ha sido el análisis de los datos, tanto agrícolas como ganaderos (Bullock *et al.*, 2002). Entre el análisis de datos y las recomendaciones sitio-específicas existe una brecha de

información (Figura 2.3) que hace difícil determinar cómo deberían ajustarse las dosis variables de semillas, pesticidas, fertilizantes y otros insumos para maximizar la rentabilidad, minimizar el impacto ambiental y alcanzar otros objetivos.

Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y tiempo) y en el tiempo. La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos, dependiendo del potencial y la necesidad de cada punto de las áreas de manejo. (Figura 2.4).

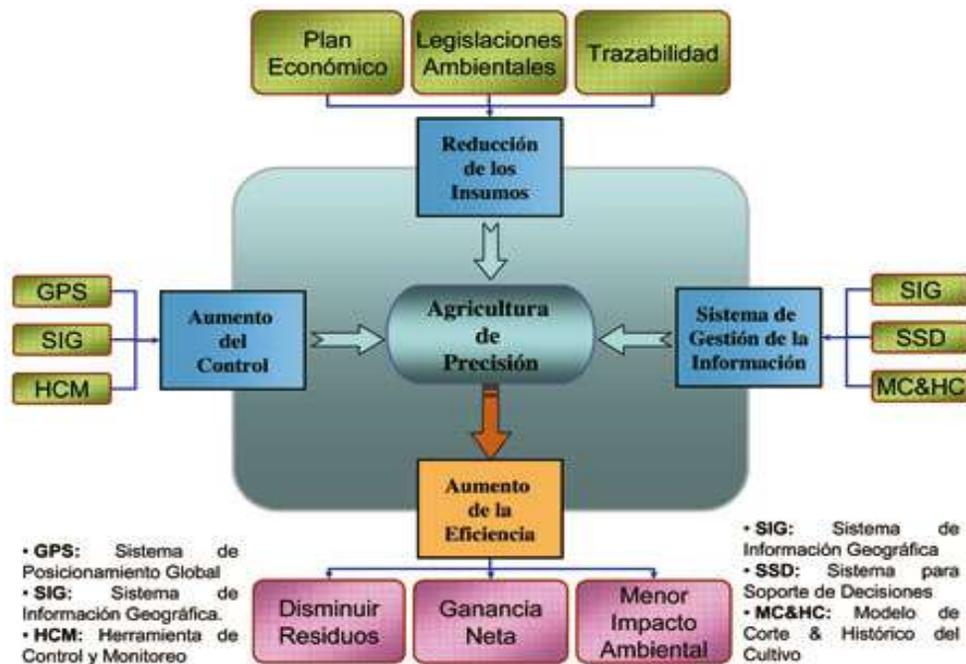


FIGURA 2.4. Interacción entre varios elementos que integran la agricultura de precisión, fuente: Universidad del País Vasco, 2000

La agricultura de precisión no consiste en medir solamente la variabilidad existen en el área sino también en la adopción de prácticas administrativas que se realizan en función de esa variabilidad. De acuerdo con Robert (1999), la observación de la existencia de la variabilidad en las propiedades o en factores

determinantes de la producción en los agro-ecosistemas no es una novedad. Lo que es diferente, en realidad, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad. Más aun, es posible geo-referenciar y aplicar los insumos con dosis variables en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas.

DOERGE T.A. (1999) define la agricultura de precisión como un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de variabilidad en campo. Por otro lado HEIMLICH, (1998) menciona que la agricultura de precisión corresponde a una estrategia de administración que utiliza tecnología de la información y las comunicaciones para recolectar datos útiles desde distintas fuentes con el fin de apoyar decisiones asociadas a producción de cultivos.

La agricultura de precisión (AP) es una estrategia de manejo que utiliza la tecnología de la información para captar datos de múltiples fuentes para generar decisiones asociadas a la producción e cultivos (US National Research Council, 1997).

La agricultura de precisión podría definirse como: “un conjunto de prácticas agrícolas utilizadas para identificar y registrar la variabilidad de ciertos parámetros agronómicos dentro de un mismo lote. Sobre la base de dicha información se aplican dosis variables de insumos posicionándolos en el lote acorde a la necesidad de un nivel de productividad prefijado” definición propuesta por Maroni y Gargicevich (1996).

Otra definición de la AP es un sistema de producción que se basa en la integración de la información y la producción. Está diseñado para sitios específicos y la unidad completa de producción, con objeto de incrementar en el largo plazo, la eficiencia, productividad y margen de ganancia, minimizando los indeseados impactos sobre el ambiente (US Farm Bill, 1996).

La agricultura de precisión es una aproximación a un sistema para manejar cultivos y suelos en forma selectiva de acuerdo con sus necesidades. Utiliza la experiencia de muchas disciplinas e integra las últimas herramientas por

tecnológicas de información que permiten a los administradores de fincas tener una mejor comprensión y control de sus lotes.

Tres tipos de variabilidades han sido identificados. El primer tipo es la variabilidad espacial, la cual puede ser vista como los cambios a través del lote. Un ejemplo, puede ser cuando un sector del lote genera rendimientos superiores frente a otro sector del mismo lote, inclusive frente a uno vecino. La segunda variabilidad es la temporal que se refiere a cuando los parámetros cambian a través del tiempo. Puede verse cuando un cultivo tiene una buena fase de desarrollo pero posteriormente arroja varios rendimientos. El tercer tipo es la variabilidad predictiva que explica la diferencia entre lo que el productor predice que va a suceder y lo que realmente ocurre.

El ejemplo básico de esta variabilidad predictiva es cuando el productor predice que una cierta productividad puede ser lograda, si determinada cantidad de fertilizante es aplicada, pero el cultivo no alcanza esto por causa del cambio climático u otro factor, cada tipo de variabilidad puede ser medida, evaluada y posiblemente influenciada, dependiendo cuán significativa es.

En el cuadro (2.1), se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP (Agricultura de Precisión), las tecnologías involucradas y las actividades realizadas.

En AP existen dos aproximaciones para la aplicación en variables de insumos. La primera de ellas se basa en el muestreo y mapeo de los factores de producción a ser manejados en forma diferencial (fertilidad del suelo, malezas, etc.) y la posterior elaboración de mapas de prescripción para la aplicación variable de los insumos (fertilizantes, herbicidas, etc.). La segunda aproximación es el sensoriamiento directo del suelo y/o cultivo para la aplicación inmediata de los insumos en forma variable. El uso de una u otra dependerá del nivel tecnológico disponible y del costo de operación involucrado.

CUADRO 2.1. Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (Adaptado de USDA, 1998).

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

Pires y Costa (2001), las herramientas que están disponibles para la agricultura de precisión son sensores de pH, de materia orgánica, de conductividad eléctrica y NO₃ en el suelo, de nitrógeno en la planta, de humedad y proteínas de granos, el sistema de información geográfica; así como clorofilómetros, penetrómetros, recogedores de muestras de suelo, sistemas que identifican plantas dañinas, marcadores de fajas de aplicación de productos químicos, etc.

2.2 Mecánica de suelos

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos Doran y Parkin, (1994). La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo Carter *et al.*, (1997). El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo.

Ortiz *et al.*, (1989) en la agronomía, el suelo es la capa superficial de la corteza terrestre que contiene minerales, materia orgánica, aire, agua y los nutrientes necesarios para dar sostén y desarrollo a las plantas superiores.

La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la física y las ciencias naturales a los problemas que involucran las cargas impuestas a la capa superficial de la corteza terrestre. Esta ciencia fue fundada por Karl von Terzaghi, a partir de 1925.

La fuente original de los constituyentes inorgánicos de los suelos son las rocas superficiales, ya sean ígneas, sedimentarias o metamórficas, desintegradas y descompuestas por una serie de factores naturales.

La teoría de falla de suelo indica que para herramientas de labranza con geometría simétrica tales como cinceles, subsuelos, cultivadores, etc., las fuerzas significativas son las componentes de tiro (paralelo a la dirección de avance) y las fuerzas de sección o verticales (que son perpendiculares a la dirección de avance). Otros elementos presentan un tercer componente dado que su geometría no es simétrica con respecto a la línea de trabajo mismo, como en el caso de los arados de discos y vertederas, los cuales presentan reacciones de fuerzas laterales con ángulos de acción no predecibles. Las magnitudes estimadas de estas fuerzas de reacción dependen entre otros, de los siguientes parámetros: Profundidad de trabajo, densidad de suelo, humedad del suelo, coeficiente de adherencia metal-suelo, geometría de la herramienta.

Estos parámetros combinados permiten predecir las magnitudes de la fuerza de tiro y de penetración para herramientas de geometría simétrica. Un cambio en la geometría requiere el desarrollar instrumentos que nos detecten en forma precisa las magnitudes de las fuerzas de reacción del suelo; así como, la dirección de la misma.

2.3 Resistencia a la penetración

La compactación del suelo ocurre cuando se aplica presión o carga a la superficie del suelo, como resultado de pisoteo de animales y personas, la inadecuada utilización de equipos como tractores, especialmente cuando el suelo está húmedo (Bassuk y Whitlow, 1988)

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 (Patterson *et al.*, 1980; Handreck y Black, 1994). Al incrementar la densidad del suelo se crea una barrera física que no permite que las raíces penetren adecuadamente (Patterson *et al.*, 1980). Estas pueden modificar el crecimiento radicular y pueden experimentarse en la compactación del suelo, siendo difícil diferenciar entre sus efectos (Scott-Russell, 1977).

La compactación puede producirse en suelos naturales sometidos a una carga de herbívoros superior a la admitida por el suelo, lo que en la mayor parte de los casos está causado por la modificación de la fauna preexistente con una disminución importante de los depredadores naturales de los herbívoros, generalmente introducidos por el hombre (Casanova, 1991).

La compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él.

Estas fuerzas externas, en la actividad agrícola, tienen su origen principalmente en: Implementos de labranza del suelo, cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre, pisoteo de animales (Casanova, 1991).

En condiciones naturales (sin intervención antrópica) se pueden encontrar en el suelo, horizontes con diferentes grados de compactación, lo que se explica por las condiciones que dominaron durante la formación y la evolución del suelo. Sin embargo, es bajo condiciones de intensivo uso agrícola que este fenómeno se acelera y llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas (Casanova, 1991).

El aumento de la resistencia mecánica del suelo va a restringir el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, tales como los que se ubican entre las estructuras (terrones), en cavidades formadas por la fauna del suelo (lombrices) y en espacios que se producen por la descomposición de restos orgánicos gruesos (raíces muertas). Esta situación va a producir un patrón de crecimiento característico de raíces aplanadas, ubicadas en fisuras del suelo, con una escasa exploración del volumen total del suelo (Gavande, 1973).

La forma más fácil de medir el grado de compactación del suelo es la determinación del valor de la densidad aparente, si bien este parámetro presenta unos valores críticos diferentes según la textura del suelo en su capa compactada. A medida que la textura se hace más gruesa la densidad aparente presenta un valor crítico más alto. Este hecho es lógico porque la macroporosidad, que es la más afectada por el fenómeno de compactación, se ve menos influida por la disminución general de porosidad a medida que la textura se hace más arenosa y el dominio de los poros gruesos es más amplio (Jaramillo, 2002).

Adicionalmente, se ha demostrado que la compactación del suelo es dañina, cuando ocurre en los primeros 50cm de la superficie del suelo, donde ocurre el mayor crecimiento radical de las plantas (Foster y Blaine, 1978). Cuando el suelo es compactado, se reduce o se destruye el sistema de macroporos presente en el suelo. Los macroporos son importantes para el movimiento del agua y el aire en el

suelo y sin ellos se presentan condiciones anaeróbicas en la etapa de crecimiento. Al ocurrir condiciones anaeróbicas en el suelo, se reduce el oxígeno disponible, trae como consecuencia reducción en la desnitrificación, pérdida de nutrimentos en las raíces y cambios en el metabolismo de las plantas.

Otros estudios en suelos compactados demuestran que las raíces que encuentran mayor resistencia mecánica tienden a crecer menos y a ser más finas y con más ramificaciones laterales que en suelos no compactados (Materechera *et al.*, 1991).

Cuando las raíces se encuentran en un suelo demasiado denso, no pueden penetrar y cambian la dirección de crecimiento o detienen su crecimiento. Esto ocurre frecuentemente en ambientes descritos anteriormente, donde las raíces de plantas sembradas sujetas a suelos compactados, tienden a crecer solamente en los primeros 10- 20 cm de profundidad esto aumenta el área superficial del sistema radical por volumen de suelo a diferentes profundidades (Liu y Waldron, 1988) y aumenta la susceptibilidad a estrés de sequía, especialmente en verano (Grimes *et al.*, 1972; Bassuk y Whitlow, 1985; Grabosky y Bassuk, 1995).

También la disponibilidad de nutrientes y de agua tiende a ser poca o ninguna. Niveles extremos de compactación pueden romper raíces finas de 1-2 mm de diámetro. Los síntomas típicos de las plantas afectados por la compactación del suelo fluctúan desde la reducción del crecimiento y desarrollo de las plantas (Foster y Blane, 1978), caída masiva de las hojas, pérdida de las propiedades físicas y eventualmente la muerte.

El contenido de agua es un factor muy asociado al grado de compactación de los suelos. Los suelos en estado natural presentan más o menos resistencia de acuerdo a la mayor o menor presencia de humedad, fenómeno que se agudiza en los Vertisoles donde, por su composición montmorillonítica, ocurren procesos tales de dilatación - contracción que provocan agrietamientos en la capa superficial durante los períodos prolongados de sequía (García *et al.*, 1999).

Kepner *et al.*, (1978), describe que las reacciones de los suelos debido a fuerzas aplicadas por implementos de labranza son afectadas por la resistencia del suelo a la compresión, la resistencia al corte, adhesión (fuerzas atractivas entre el suelo y algún otro material), y la resistencia a la fricción. Estas son todas las propiedades dinámicas que se ponen de manifiesto solamente a través del movimiento del suelo.

Cañavate (1989), menciona que la resistencia de un suelo a la penetración de una determinada herramienta de sondeo, constituye una variable que aglutina otras propias del suelo tales como compactación, cohesión y rozamiento interno. Esta nos da una idea de la dureza de ese suelo para las condiciones específicas que se encuentra en un determinado momento.

Cerisola (2003), dice que el Penetrómetro es el aparato que permite obtener el valor de la resistencia a la penetración del suelo. Esta es la fuerza por la unidad de superficie necesaria para introducir una punta cónica hasta una cierta profundidad. El tamaño de las puntas y la velocidad con que se introducen en el suelo han sido normalizadas por la ASAE, (1992).

Payan y Sánchez (2003), señalan que la penetrometría 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.

Tomando en consideración problemas actuales y potenciales de manejo y degradación física de suelos en las zonas agrícolas bajo secano del país, y las limitaciones actuales en cuanto a la adquisición, calibración y mantenimiento de equipos desarrollados en el exterior, se realizó un estudio de la resistencia mecánica de suelos venezolanos utilizando prototipos de equipos de penetrometría desarrollados y construidos en el país. La resistencia a la penetración resultó ser un parámetro físico muy adecuado para obtener

información inicial sobre la dinámica en el espacio y en el tiempo de las propiedades físicas del suelo que determinan la resistencia mecánica. Su evaluación puede realizarse a través de determinaciones bastante sencillas que fácilmente pudieran realizarse en forma rutinaria. En este sentido, no es importante el tipo de equipo que se utilice para obtener la información, pues un equipo poco costoso como el penetrómetro de impacto puede ser utilizado tan efectivamente como el más costoso que incluya registros automáticos y computarizados.

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. La penetrabilidad del suelo permite conocer la facilidad con que un objeto puede ser introducido en el, 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.

Por otro lado, la penetrabilidad es un índice que puede ser evaluado a través de una determinación sencilla, rápida, y que puede ser hecha directamente sobre el terreno, permitiendo así, realizar un alto número de mediciones que contrarrestan el problema de variabilidad espacial.

Muchos estudios han utilizado el penetrómetro para caracterizar la resistencia natural del suelo. A pesar de la diversidad de equipos y métodos utilizados, existe evidencia de que la resistencia o dureza del suelo es caracterizada adecuadamente. Cuando se trabaja con penetrómetro de punta cónica, el área de la base de la punta y el ángulo de ésta tienen un gran efecto sobre la resistencia encontrada por la punta. El aumento del ángulo y del área de base de la punta incrementan los valores de las lecturas.

2.4 Resistencia al esfuerzo cortante del suelo

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.

El francés C.A. Coulomb 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. En (1776) Coulomb físico e ingeniero francés, 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 al esfuerzo cortante constante, independiente del esfuerzo normal aplicado. Otros suelos tenían un comportamiento intermedio, con una ley de resistencia al esfuerzo cortante.

Toda obra de ingeniería exige seguridad, funcionalidad y economía. Cuando se habla de seguridad en el caso específico de los suelos, se busca que el sistema que forman la cimentación y el suelo no genere un mecanismo de falla que ponga en peligro la estabilidad de la obra. Para llevar a cabo el análisis de la estabilidad de una estructura, desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica, es necesario determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos involucrados en el mecanismo potencial de falla. Sin embargo, dicha determinación implica grandes retos para el ingeniero de mecánica de suelos, en virtud de las variables involucradas en el problema, tales como: tipo de suelo, grado de compacidad o consistencia, grado de saturación y anisotropía, entre otras. El grado de saturación, por ejemplo, ha permitido crear la "Mecánica de Suelos Tradicional" (para suelos 100% saturados) y la "Mecánica de suelos no saturados".

Flamand (1995), indica que la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo puede definirse como la oposición máxima que presenta sus partículas a un desplazamiento relativo, bajo ciertas condiciones dadas principalmente de drenaje. Un suelo invariablemente pierde constancia bajo una condición de esfuerzos normales y cortantes en el plano de falla, los esfuerzos normales proporcionan una parte de la resistencia al esfuerzo cortante debido a la fricción. La evolución de dicha resistencia es importante en la mayoría de los problemas de estabilidad de masa de suelo y diseño de estructuras.

En 1936 Hvorslev hace notar que la cohesión de las arcillas saturadas no es una constante sino que depende de su contenido de agua. En 1958 Roscoe, Sholfield y Wroth crean la “Teoría del Estado Crítico” que es un modelo elastoplástico unificado que relaciona la resistencia con los cambios de volumen o cambios en la relación de vacíos del suelo.

Se ha usado en las últimas dos décadas para la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, correlacionando el número de golpes necesarios para penetrar una punta cónica en el suelo en una longitud determinada, similar a una prueba de penetración estándar convencional (Gonzales et al, 2004).

2.5 Rotura del suelo por herramientas de tipo cincel

Flamand (1995), cuando un cincel rompe el suelo trabajando a una profundidad, el área afectada; así como, la resistencia ofrecida son función de las variables mecánicas del suelo. En este sentido durante los últimos treinta años se han venido sucediendo una serie de teorías que tratan de explicar el proceso de rotura del suelo en diferentes estados y con distintas herramientas. Cuando un diente de mayor anchura que la profundidad de trabajo se desplaza con un ángulo de inclinación α se produce la rotura del suelo en sentido longitudinal de modo que si es mayor de $45 - \alpha_i/2$, aparecen dos zonas bien diferenciadas. El tramo AB se

asocia a la ecuación de una espiral cuyo origen es el punto P, mientras que el BD es un tramo recto cuyo ángulo ODB es igual a $45 - \alpha_i/2$.

La fuerza F por unidad de anchura de trabajo necesaria para producir la rotura es una función $F = (\gamma, \alpha, C, \delta, Ca, \alpha, p, q)$.

Donde:

- ✓ γ : Peso específico.
- ✓ α_i : Angulo de rozamiento interno.
- ✓ c : Cohesión.
- ✓ δ : Angulo de rozamiento metal suelo.
- ✓ Ca : Coeficiente de adherencia metal-suelo.
- ✓ α : Angulo de ataque de la herramienta.
- ✓ p : Profundidad.
- ✓ q : Sobrecarga en el suelo.

2.6 Diseño de transductores

2.6.1 Sensor Octagonal De Anillo Extendido.

Campos *et al.* (1992) desarrollo 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. Campos demostró que existe un efecto de la longitud del plato sobre la localización de los nudos de deformación, cosa que cabe señalar que *Godwin* 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

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 $\theta = 391/4^\circ$ y se encontró las sensibilidades para cada nudo de deformación.

Campos (1993). Uno de los transductores más apropiados para determinar las fuerzas de reacción del suelo en los implementos de labranza es el transductor octagonal extendido, que tiene las ventajas sobre otros comúnmente empleados en la evaluación de equipos de labranza cuando la precisión de la localización de las galgas extensiométricas ha sido realizada.

Un análisis teórico de la aplicación del anillo extendido del transductor octagonal fue desarrollado por Cook (*et. al.*, 1963) citado por Varela, (2000) está basado en el análisis de la energía elástica de un anillo usado como una celda de carga

Consideraciones adicionales para el diseño del anillo extendido fueron dadas por Hoag (1977) Citado por Campos (1993). Estos tienen el objetivo de mejorar la sensibilidad del anillo por medio de aumentar al máximo la relación $[\epsilon/S \{x, y\}]$. Esta relación representa la cantidad de deformación por unidad de desplazamiento relativo del anillo del fondo medio.

Para obtener máxima ejecución del anillo en la tensión-proporción del desplazamiento, sugirió Hoag, (1977) citado por Varela (2000) que la relación $(t r^2)$ debe aumentarse al máximo. Para los requerimientos específicos esperados de cualquier fuerza máxima o momento, la deformación máxima en el anillo puede ser seleccionando el material del anillo apropiado junto con un máximo conveniente a la deformación aceptable.

2.6.2 Galgas extensiométricas

Una galga extensiométrica o extensómetro es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica, Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge en 1938.

Cooper (1991), las galgas extensiométricas son un ejemplo de transductores pasivos que convierten un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Una galga extensiométrica es un dispositivo delgado, como una oblea, que se

puede unir 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 como constante (marca registrada). Constante, es una aleación de níquel-cobre que contiene 60% de cobre y 40% de níquel, o grabado en laminillas metálicas delgadas. La resistencia de las galgas extensiométricas tiene una lámina delgada o un alambre con una longitud, a medida de que el material sufre tensiones o compresiones. Este cambio en la resistencia es proporcional a la tensión aplicada y se mide con un puente de wheatstone adaptado especialmente.

La sensibilidad de una galga extensiométrica se describe en términos de una característica llamada factor de galga k que se define como la unidad de cambio de la resistencia por la unidad de cambio de longitud, donde dicho valor viene proporcionando en el empaque de la galga.

Para la configuración de las galgas la forma del elemento sensor (galga) se selecciona de acuerdo con la tensión mecánica por medir; uniaxial, biaxial o multidireccional. Para aplicaciones uniaxiales a menudo se utilizan elementos sensores largos y para maximizar la tensión del material sensor en la dirección de interés. Los lazos finales son pocos y cortos, de modo que la sensibilidad a tensiones transversales sea baja. La longitud de la galga se elige según el campo de tensión por investigar.

Para la mayoría de las mediciones de tensión, una galga de 6 mm. De longitud ofrece una buena operación y la instalación es fácil.

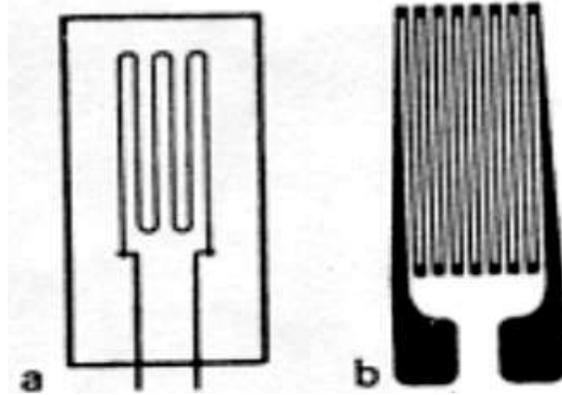


FIGURA 2.5. Galga extensiométrica uniaxial: a) alambre; b) laminilla. (Cooper, 1991).

Se pueden lograr mediciones simultáneas de esfuerzos en más de una dirección colocando galgas de un solo elemento en dirección correcta. Sin embargo, para simplificar esta tarea y obtener mayor exactitud, se dispone galgas de múltiples elementos o rosetas.

Las rosetas de dos elementos suelen utilizarse en transductores de fuerza. Las galgas se conectan en un circuito puente de Wheatstone para proporcionar una salida máxima. En análisis de esfuerzos, los elementos axial y transversal pueden tener diferentes resistencias que se pueden seleccionar para que la salida combinada sea proporcional al esfuerzo. Las rosetas de tres elementos frecuentemente se utilizan para determinar la dirección y magnitud de las tensiones principales que resultan de cargas estructurales complejas.

Una roseta de deformación es un arreglo de tres galgas extensiométricas utilizado para medir el estado de deformaciones de un material en el plano, lo cual implica medir la deformación normal en x (ϵ_x), la deformación normal en y (ϵ_y), y la deformación cortante en el plano (γ_{xy}). Debido a que una galga sólo puede medir la deformación normal, a veces resulta más conveniente utilizar una roseta de deformación. Aunque pueden crearse infinidad de combinaciones para el arreglo de galgas, existen dos que son las más utilizadas: la roseta rectangular y la roseta delta. Para nombrar a cada una de las galgas se usan las primeras letras del abecedario, comenzando por la roseta horizontal y siguiendo el sentido opuesto de las manecillas del reloj.

Los tipos más comunes tienen desplazamiento angular de 45° o 60° entre los elementos sensores. Las rosetas de 60° se usan cuando la dirección de la tensión principal se desconoce. Las rosetas de 45° proporcionan una resolución angular mayor y normalmente se utilizan cuando se conocen las direcciones de las tensiones principales.

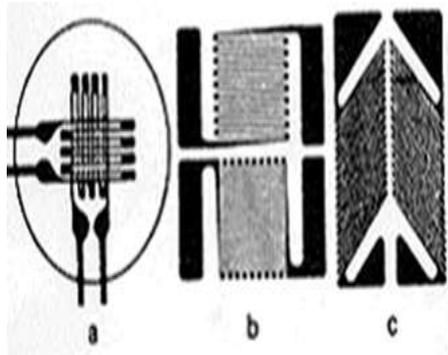


FIGURA 2.6 (a)

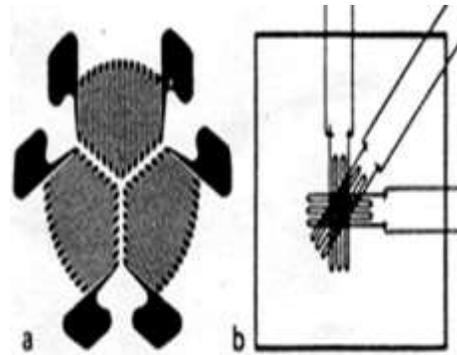


FIGURA 2.6 (b)

FIGURA 2.6 Roseta de dos elementos, a) laminillas apiladas a 90° ; b) laminillas plana a 90° ; laminilla plana delgada a 90° . (Cooper, 1991).

Mojica (2000), otro tipo son las galgas extensiométricas soldadas que consiste en un marco estacionario y una armadura que está colocada en el centro del marco. La armadura solo se puede mover en una dirección. El desplazamiento está limitado por cuatro filamentos de alambre sensible a la tensión, devanado entre aisladores rígidos montados en el marco y en la armadura. Los filamentos son de igual longitud y tienen un arreglo.

Cuando se aplica una fuerza externa a la galga extensiométrica, la armadura se mueve en dirección indicada. El cambio de resistencia de los filamentos es proporcional al cambio de longitud, y estos se pueden medir con un puente de wheatstone.

Cuando un elemento de maquinaria se somete a una fuerza, este sufre una deformación proporcional a la fuerza aplicada. La deformación puede ser causada por una carga axial, por una torsión o por un momento. Esta deformación puede

ser medida para conocer la fuerza que está actuando sobre el elemento, esta es censada mediante galgas extensiométricas. Las galgas extensiométricas pueden ser utilizadas para transformar esta deformación en valores de voltaje, estas son adheridas al material en el cual se desea conocer la fuerza aplicada, al deformarse el material, la galga aumentaría o disminuiría su longitud con el material, variando así su resistencia. (Moo, 1999).

Por lo tanto para los transductores de fuerzas se necesita un elemento elástico que traduzca a la fuerza en deformación. El material para construir los transductores de fuerza debe tener las siguientes características: rigidez elevada, carga de ruptura elevada, limite elástico y módulo de elasticidad bajo. Y para la elección de las galgas de deformación se consideran los siguientes factores: longitud de carga, factor de galga, salida de galga, temperatura característica, deslizamiento característico, endurecimiento y bajo costo.

2.6.3 Puente de Wheatstone

Un puente de Wheatstone Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida

Cooper (1991), las medidas de precisión de los valores de componentes se han hecho por muchos años utilizando diferentes tipos de puentes. El más simple tiene el propósito de medir la resistencia. El circuito puente forma la parte principal en algunas mediciones y como interface de transductores.

En la figura (2.7), el puente tiene cuatro ramas resistivas, junto con una frecuencia de (batería) y un detector de cero, generalmente un galvanómetro u otro medidor sensible a la corriente. La corriente a través del galvanómetro depende de la diferencia de potencial entre los puntos c y d. Se dice que el puente esta balanceado (o en equilibrio) cuando la diferencia de potencial a través del

galvanómetro es 0 V, de forma que no hay paso de corriente a través de él. Esta condición se cumple cuando el voltaje del punto c al punto a, es igual que el voltaje del punto d al punto a; o bien, tomando como referencia la otra terminal de la batería, cuando el voltaje del punto c al b es igual que el voltaje del punto d al punto b. por tanto, el puente esta en equilibrio.

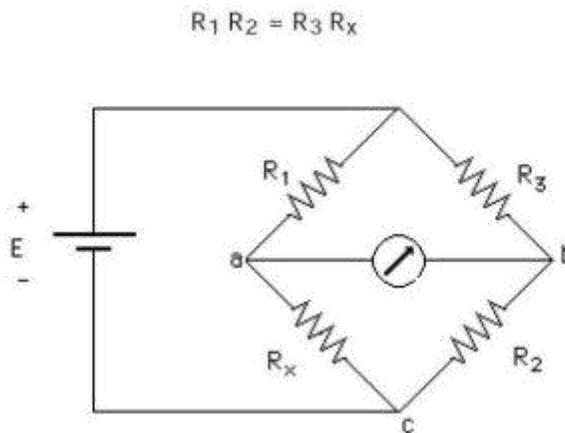


FIGURA 2.7. Puente empleado para las mediciones de precisión de resistencias en el rango de fracciones de Ohm hasta varios MegaOhms.

2.7 Adquisición de datos

2.7.1 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 (ca), 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.

Los sistemas de instrumentación se pueden clasificar en dos clases principales: analógicos y digitales. Los sistemas analógicos tratan en forma analógica la

información de mediciones. Un sistema analógico se puede definir como una función continua, como una gráfica de voltaje contra tiempo, o desplazamiento contra presión. Los sistemas digitales manejan la información en forma digital. Una cantidad digital puede consistir en un número de pulsos discretos y discontinuos cuya relación de tiempo contiene información referencial a la magnitud o naturaleza de la cantidad.

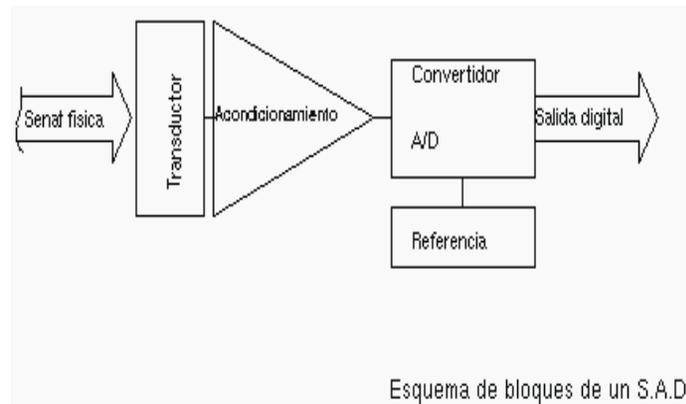


FIGURA 2.8 Sistema de adquisición de datos analógicos

Un sistema de adquisición de datos analógico consta de algunos o todos los elementos siguientes:

- ✓ **Transductores.** Para la transformación de parámetros físicos en señales eléctricas.
- ✓ **Acondicionador de señales.** Para la amplificación, modificación o selección de ciertas partes de estas señales.
- ✓ **Instrumentos de registro de datos.** Para obtener un registro permanente de los datos de entrada.
- ✓ **Los sistemas de adquisición de datos** se utilizan en un gran número de aplicaciones (en constante aumento), en una variedad de áreas industriales y científicas, como la industria biomédica, aeroespacial y telemetría. El tipo de sistema de adquisición de datos, analógica o digital, depende del uso de los datos registrados.

En general, los sistemas de datos analógicos se utilizan cuando se requiere un amplio ancho de banda o cuando se puede tolerar poca exactitud. Los sistemas digitales se aplican cuando el proceso físico que en estudio varía poco (ancho de banda angosta) y cuando se necesita una exactitud alta y bajo costo por canal.

Los sistemas digitales varían en complejidad desde sistemas de un solo canal para medición y registro de voltajes, corriente directa de parámetros de entrada, los comparan con respecto a condiciones o límites preestablecidos y llevan a cabo cálculos y toman decisiones sobre la señal de entrada. Los sistemas digitales en general son más complejos que los analógicos, tanto en términos de volumen y complejidad de los datos de entrada que pueden manejar.

2.7.2 DAQ BOOK200/2000

El DaqBook200/2000 (figura 2.9) es un dispositivo de adquisición de datos donde podemos observar las diferentes entradas analógicas de medida, entradas de frecuencia, y entradas digitales. El DaqBook200/2000 está equipado con una función de señal con una capacidad, que puede ser ampliado y mejorado con más de 40 canales.



FIGURA 2.9 Dispositivo de adquisición de datos DAQ BOOK200

La serie DaqBook200/2000 incluye un orden interfaz interno Ethernet (red de área local) de 10/100BaseT capaz de la transferencia de los datos adquiridos de

nuevo a la PC en la lectura total de 200/s de medición tipo del DaqBook. Múltiples DaqBook se pueden conectar a un PC a través de un concentrador o conmutador Ethernet, capaz de ser sincronizada y la transferencia de datos continua a toda velocidad en el PC. <http://www.iotech.com.mx>

2.8 Variabilidad

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 2.10). 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 (Khosla *et al.*, 2002; Ruffo *et al.*, 2006; Urricariet & Zubillaga, 2007).

Los mapas de rendimientos permiten cuantificar la variabilidad de rendimiento existente durante la cosecha de un cultivo dentro del lote, quedando gravada espacialmente. La variabilidad de los lotes es uno de los factores que pueden justificar la realización de dosis variables en la siembra, fertilización, pulverización, etc. y gracias al GPS y algunas herramientas de la agricultura de precisión, entre ellas el monitor de rendimiento, podemos conocer el área que ocupa cada sitio y cuantificar sus diferencias de rendimiento.

Comprender la variabilidad es una de las claves de la Agricultura de precisión. Se han identificado tres formas principales de variabilidad a tener en cuenta: espacial, temporal y en la estimación.

La variabilidad espacial, es la que se da a lo largo y ancho del terreno. Esta variabilidad se puede reflejar mediante mapas de suelo. Si esta variabilidad es significativa, es el agricultor el que debe tomar las decisiones, aunque lo normal es contrastar este mapa con los de rendimiento.

La existencia de variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos a escala de lote fue reconocida en trabajos previos realizados en la Región Pampeana (Di Pietro *et al.*, 1986; Giuffré *et al.*, 1994).

La variabilidad temporal se pone de manifiesto al comparar mapas de rendimientos de un año a otro, y su significado también debe ser deducido, aunque se pueden obtener mapas de tendencias que muestren las características fundamentales.

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) (Moore *et al.*, 1993; Sadler *et al.*, 1998). 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 (Niborski *et al.*, 2004).

El valor de la información recolectada por los monitores de rendimiento radica en su elevado nivel de detalle (Timlin *et al.*, 2001). 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 (Godwin *et al.*, 2003; Urricariet & Zubillaga, 2007).

La variabilidad en la estimación, es la diferencia de lo estimado, con respecto a lo obtenido. Para un correcto aporte de inputs, se deben hacer ciertas aseveraciones, para obtener el rendimiento estimado. Si ese rendimiento no se obtiene, las aseveraciones que se hicieron en un primer momento, deberán ser mejoradas.

Antes de entrar a tomar decisiones respecto a estas variabilidades, se deben comprender, por lo tanto previamente como medirlas.



FIGURA 2.10 Importancia de la variabilidad

2.8.1 Medición de la Variabilidad

La variabilidad espacial: esta se puede medir mediante la obtención de datos sobre factores con localización precisa. Los mapas de rendimientos se producen realizando un seguimiento del rendimiento a la cosechadora, o maquina recolectora, tal que se conoce la cantidad cosechada en un determinado tiempo.

Un DGPS (GPS Diferencial) se utiliza para obtener la localización de la posición de los rendimientos que se están obteniendo. Un sistema similar se utiliza para el muestreo del suelo, excepto si las muestras se recogen a mano, y se envían posteriormente al laboratorio para su análisis, en este último caso se utiliza un GPS para el posicionamiento del lugar de la toma de muestras (figura 2.11).

Estos datos se filtran y se representan como mapas que muestran la variabilidad espacial.

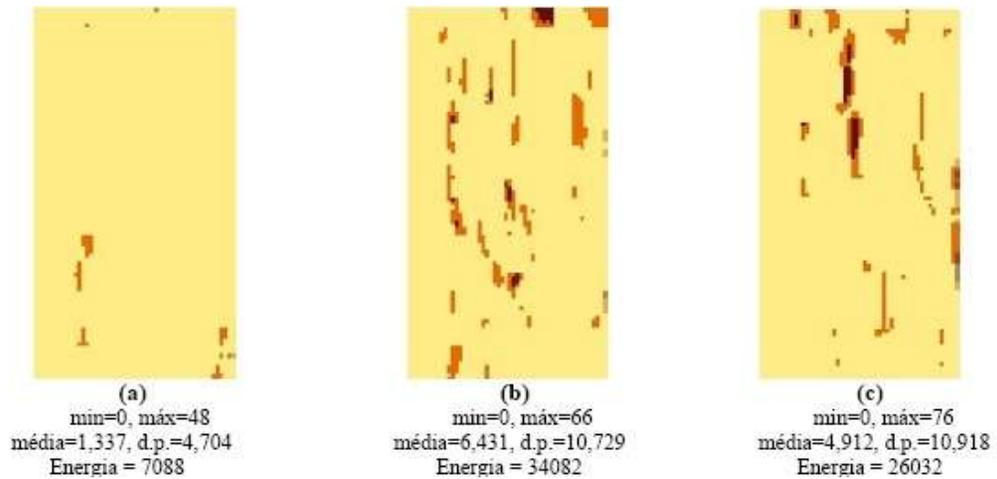


FIGURA 2.11. Mapa de preproducción.

La variabilidad temporal: se obtiene mediante la información y comparación de mapas que han sido obtenidos a lo largo del tiempo. (Figura 2.12).

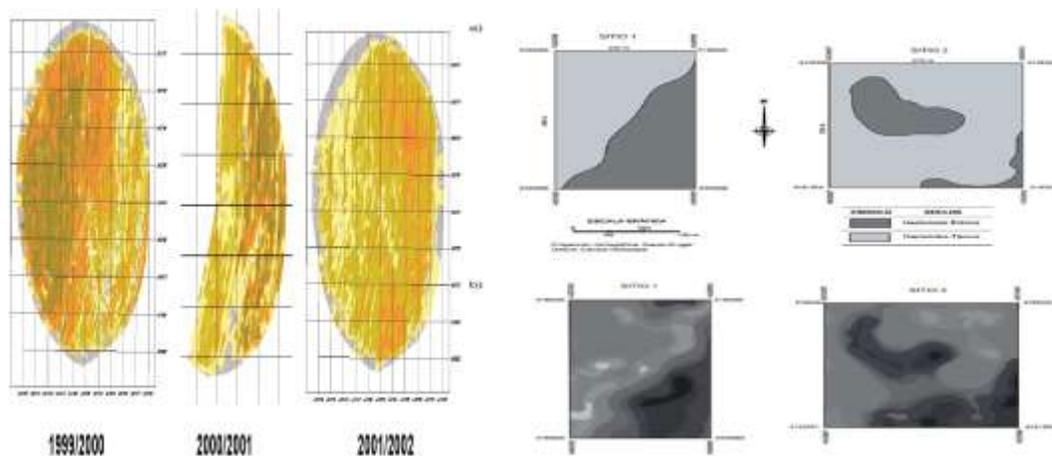


FIGURA 2.12. Mapas de rendimientos de diferentes años.

La variabilidad en la estimación: esta variabilidad se obtiene midiendo la diferencia entre los valores para el cultivo, y los valores conseguidos. Los valores que más se utilizan son los de área de producción, el rendimiento y calidad. La calidad es difícil de predecir, hasta los estudios tardíos de la producción, mediante la medida de la clorofila, y la realización de un mapa de clorofila. (Figura 2.13). La mayoría de los trabajos publicados relacionados a sistemas de determinación de producción de productos agrícolas para la elaboración de mapas de rendimiento

están en el área de granos, donde empresas como JOHN DEERE (1998), CASE (1999) y AGCO (1999), desarrollaron sensores de flujo de masa específicos, para determinar la producción y la humedad de granos y software para manejar estos datos y generar los mapas de rendimiento.

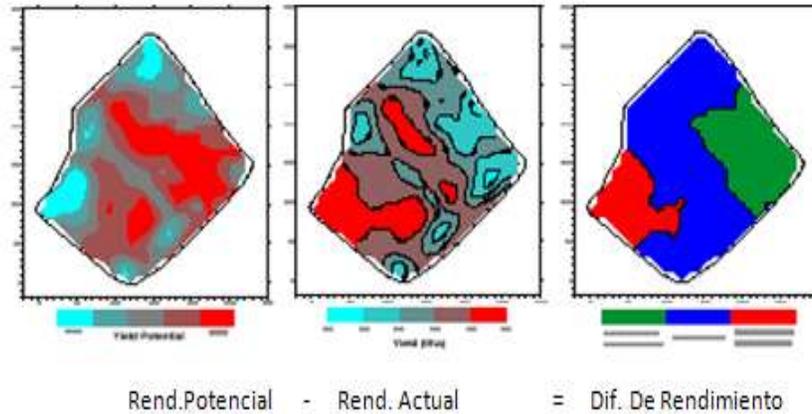


FIGURA 2.13 Variabilidad de la estimación del rendimiento.

2.8.2 Mapa de Rendimiento

La practica más importante, quizá, son los mapas de rendimientos. Para ella son necesarias una serie de tecnologías, tenemos como ejemplo una cosechadora de cereal.

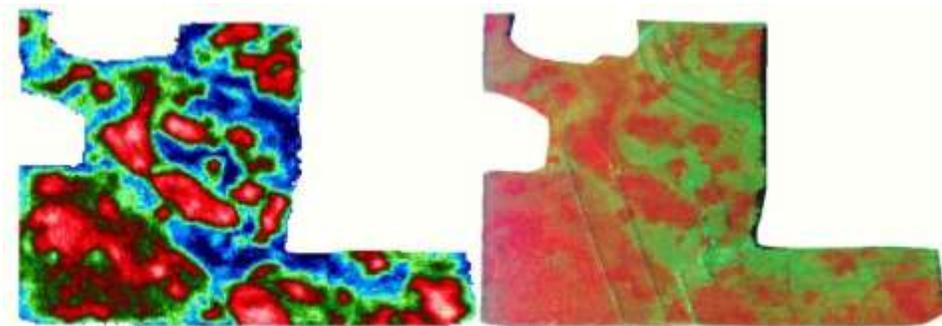


FIGURA 2.14. A la izquierda, representación de los datos de posición y rendimiento, sin tratamiento con SIG. A la derecha, la misma parcela tras tratar los datos con un SIG.

Será necesario un receptor GPS montado sobre la cosechadora, el cual obtendrá segundo a segundo la información de la posición en el campo, a medida de que la cosechadora avanza por el campo. Además, esta cosechadora debe tener dos sensores, uno para medir el flujo de grano, y otro para medir la humedad del grano cosechado. A medida que la maquina avanza, un ordenador recoge la información que le llega del GPS, con un intervalo de 1.2 segundos registrando la latitud y la longitud y de los dos sensores.

Normalmente la información se almacena en memoria PCMCIA la cual puede extraerse de este ordenador, y pasar su información posteriormente al ordenador de la oficina.

Si se realizase una representación de esta información, se obtendría la parte izquierda de la figura 2.14, la cual como se ve es difícil de interpretar. Por lo tanto es necesario un software que permita una mejor lectura o interpretación de los datos, estos programas informáticos son los SIG (Sistemas de Información Geográfica). Así la figura antes mencionada, aparecerá suavizada, como en la parte derecha de la figura 2.14.

Norton y Swinton, (2001), describe una metodología de manejo integral utilizando herramientas de obtención de datos geo-referenciados de rendimiento como se muestra en la (figura 2.15) (mapas anteriores de trigo y maíz del lote), muestreos de suelo dirigidos, análisis y siembra de maíz con densidad y fertilización variable de acuerdo a prescripciones geo-referenciadas. Que incluye la Identificación de zonas de rendimientos diferentes dentro del lote a través de mapas anteriores, maíz y trigo; Realización de un muestreo representativo de cada una de las zonas, con muestras compuestas geo-referenciadas con sub muestras de cada uno de los lugares seleccionados; Análisis de la correlación rendimiento/característica química-físicas de suelo; Priorización de los datos de rendimiento de los mapas anteriores, como dato de peso en la estimación de rendimiento sitio específico del maíz del presente año; Definición de 4 ambientes de rendimiento en maíz (- de 90 qq/ha), (90 a 105), (105 – 120) y (+ de 120), como dato para el cálculo de fertilización.

Teniendo como criterio que donde más rindió en los mapas anteriores se estima que se expresará con un mayor potencial de rendimiento y por ende serán necesario mayor necesidad de nutrientes; Análisis de respuestas variables de cada dosis de fertilizante en cada ambiente para luego realizar un análisis económico para determinar la conveniencia o no del uso de este tipo de tecnología de siembra variable con sembradora inteligente donde los ambientes lo justifiquen.

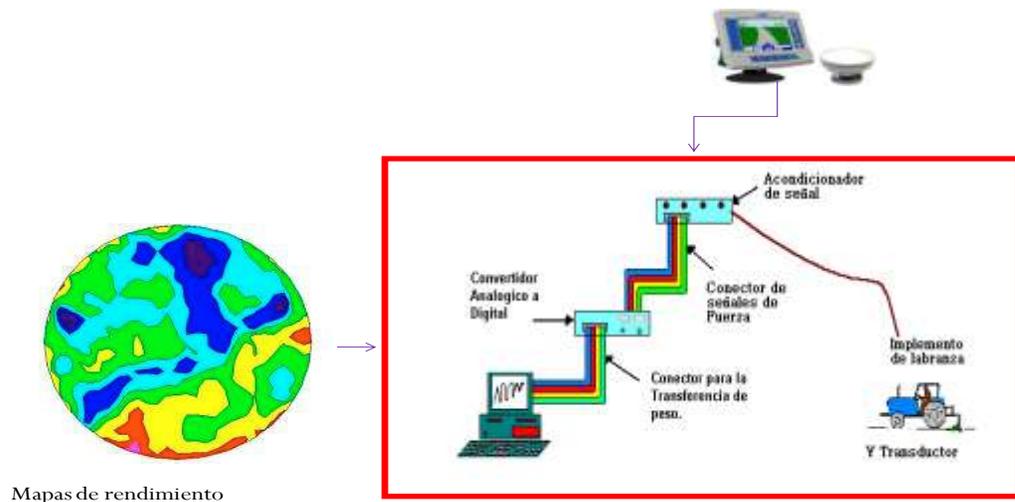


FIGURA 2.15. Sistema de adquisición de datos para obtención de mapas de rendimiento

Andrade (2005) construyó un bastidor porta-sensores para medir el estado físico-mecánico del suelo, en el presentan los detalles en el diseño y construcción de un bastidor que provee soporte a un sistema de componentes electrónicos y mecánicos capaz de realizar mediciones del estado físico mecánico en suelos agrícolas. El sistema de medición consta de equipo electrónico para la captura de información, sistema de posicionamiento global (DGPS), y equipo sensorial para detectar cambios en el estado físico-mecánico del suelo. Este bastidor fue diseñado para funcionar bajo dos modalidades: a) mediciones continuas de la resistencia del suelo al corte, y b) mediciones puntuales de la resistencia del suelo a la penetración.

En relación al diseño de sensores de fuerzas Marín (2003), Diseñó y construyó dos dinamómetros de tipo axial, con capacidad de 45 y 70 KN, los cuales permiten registrar las fuerzas de reacción del suelo en la interacción del tractor, implemento

y suelo. Gallegos (2004) Menciona que la resistencia de un suelo a la penetración de una determinada herramienta de sondeo, constituye una variable que aglutina otras propias del suelo tales como compactación, cohesión y rozamiento interno.

Hinojosa. (2003), Determino la magnitud de las fuerzas de reacción del suelo que actúan sobre los diferentes implementos integrales; así como, su dirección y posición en una línea de acción. Graham et al. (1990) Desarrolló como parte de un sistema de monitoreo de variables, un transductor de tipo hidráulico empleado para medir fuerzas de tiro en la evaluación de implementos remolcados. Godwin y Spoor citado por Campos (2000) indican que uno de los aspectos más importante en la evaluación de nuevos diseños de herramientas de labranza es el proceso de medición de las magnitudes de las fuerzas que actúan en dichos implementos. Vásquez J, Johnny; Rivera, Arturo (2004).

Andrade *et al.*, (2001, 2002) citado por Gallegos (2004) han reportado resultados de diversos análisis donde se relacionan las condiciones físicas del suelo con la reacción mecánica del suelo durante operaciones de labranza. Godwin *et al.* (1987) encontraron que la fuerza de tracción es mínima donde el ángulo de inclinación vertical está entre 0,380 y 0,524 rad, siendo esta la resistencia. Gill *et al.*, (1982), quienes también encontraron que la penetración de los discos es mayor si se aumenta el peso de éstos, y que la velocidad de operación no afecta la profundidad de trabajo en suelos. Mello y Magalhães (1995) en un trabajo realizado sobre un suelo arcilloso, encontraron que la velocidad de operación no afectó la fuerza de tracción, y que dicha fuerza crece al aumentar el ángulo horizontal y el área de suelo removido, sin incidir significativamente en la resistencia específica.

Spoor y Godwin (1978), afirmaron que la movilización del suelo depende de la profundidad de trabajo, del tamaño del cincel (largo y ancho), además de la humedad y densidad del suelo. Magalhães y Souza (1990) Para el análisis de las fuerzas horizontal (F_h) y vertical (F_v) utilizó un anillo octogonal extendido, el cual permite la medición de estas fuerzas y la localización de la fuerza resultante.

2.9 Dosis Variable

Una de las herramientas que interesa a asesores y productores, en particular, es la dosis variable que actualmente apuntan a mejorar el manejo de los insumos, lo que dependerá del cultivo y del fertilizante que se utilice. Ejemplo de esto son los ensayos que buscan curvas de respuesta a la fertilización, que se realizan con nitrógeno y en gramíneas (maíz y trigo básicamente). Por ello, variar las dosis en estos cultivos y con éxito va a depender de los conocimientos que tengamos sobre rendimientos en los diferentes ambientes, el porcentaje de variabilidad del lote y del objetivo que persiga el asesor o productor. Algunos buscan obtener respuestas agronómicas en vez de una respuesta meramente económica. En la figura 2.16 se muestra una de las herramientas que se utilizan para el manejo de sitio específico.



FIGURA 2.16. Manejo de sitio específico

Cuando se busca solamente rentabilidad, esta no siempre es la mejor para el suelo. Habría que tener en cuenta que la dosis variable se debería hacer con datos precisos de rendimiento, recomendaciones y sabiendo si se quiere lograr un resultado agronómico o económico. Hacer dosis variable sin tener en claro un objetivo podría llevar a fracaso de la tecnología.

En el caso de que haya variabilidad de rendimientos en el campo, es posible conocer la superficie que ocupa el sitio con mayor o menor potencialidad de rendimiento y se puede caracterizar por medio de análisis físicos o químicos de

suelo. Luego comienza el proceso de dosis de fertilización recomendada, por ejemplo, y existen varias maneras de realizar recomendaciones. Una de ellas, es el método de balance (que es simple pero más preciso si varían mucho las condiciones de los ambientes), o haciendo correr modelos de simulación para cada sitio (que le da más posición al dato). Luego, se aplica la cantidad de fertilizante que los modelos indiquen con la maquinaria de dosis variable y en cada sitio específico. El objetivo es apuntar a un manejo más eficiente de los insumos, dejando de lado la dosis uniforme. Por ejemplo, donde hay recomendaciones zonales de aplicar 100 kg de nitrógeno/ha para el cultivo de maíz, ahora se puede determinar en qué parte de lote se fertiliza con 30 o 150 kg de N/ha y, de esta manera, se maneja la variabilidad de campo, “muchas personas hacen dosis variable aplicando menos fertilizantes en algún lugar y más en otros sin tener datos precisos sobre el potencial del rendimiento del cultivo o lo que puede aportar el suelo al cultivo. Es decir que realizan dosis variables de manera imprecisa”.

Los pasos a seguir para llegar a buenos resultados en dosis variable de semillas y fertilizantes. Contar con información geo referenciada es un paso importante en la aplicación variable de insumos, nos permite determinar la variabilidad presente en el lote. Para ello, existen diferentes herramientas que nos puedan llevar a una mejor definición de los ambientes homogéneos presentes en el lote como son: carta de suelos, fotografía de reas, imágenes satelitales, entre otras. Una de las herramientas más destacadas, es el mapa de rendimiento, debido a que el mismo, nos permite saber, no solo la variabilidad presente en el lote, sino también su cuantificación. En forma metafórica es como una radiografía del lote. Esta información tan valiosa se puede conseguir mediante un monitor de rendimientos montado en una cosechadora y el mismo conectado a un GPS.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales y equipo

Los materiales y equipo que se utilizaron en la realización de este trabajo fueron distintos tanto para la resistencia a la penetración, sensor de energía y resistencia a la falla, los cuales se describen a continuación: (figura 3.17)

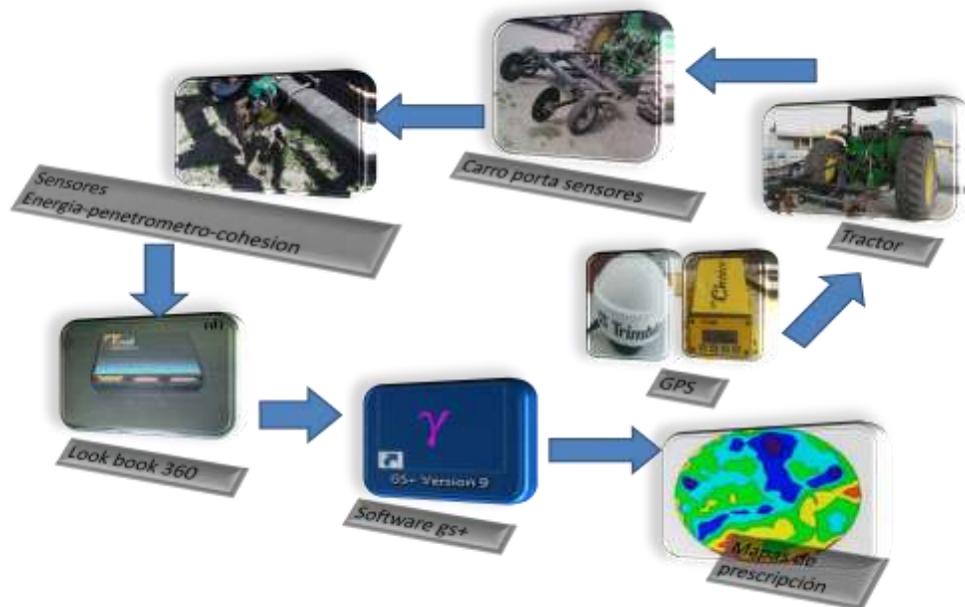


FIGURA 3.17 Materiales y equipo

- ✓ **Penetrómetro digital.** Con sensor de anillo de una capacidad de 10,000 N y un cono con área perimetral de 0.002777849 m^2 y otra de 0.000993461 m^2 .
- ✓ **Resistencia a la falla.** Sensor de cohesión del suelo con capacidad de 1.62 N.m a una altura máxima de la barra de acoplamiento del carro porta sensores de 0.70m. Este sensor se integro un transductor de fuerzas por un motor hidráulico con una capacidad de 2000 rpm. Tubo de acero de longitud de 75cm, diámetro interior de 20.5mm y diámetro exterior de 26.8mm.

- ✓ **Geoposicionador.** El sistema de medición constara de equipo electrónico para la captura de información, sistema de posicionamiento global (AgDGPS) Trimble (132), y equipo sensorial para detectar el estado físico-mecánico del suelo geo referenciado por medio específico.

- ✓ **Carro porta sensores.** Este sistema será empleado como parte del diagnostico de productividad de suelos asociado con otros indicadores tanto físicos como químicos y orgánicos. Se adecuo el marco del equipo MCC 3/5/7 de la empresa TECNOMECA AGRÍCOLA S.A de C.V como carro porta sensores incorporándole un sistema con gato hidráulico para controlar la profundidad de 30 a 60cm.

- ✓ **Software gis (gs+).** Información obtenida en campo será posteriormente procesada mediante software (GS+), Para fácilmente elaborar los mapas específicos.

- ✓ **Convertidor analógico – digital (DAC).** Se utilizó la unidad de DaqBook 200 de IOtech, Inc. el cual es un módulo que se conecta al puerto paralelo de una computadora y que convierte los valores de voltaje en valores digitales para que puedan ser procesados por la computadora. Este módulo se compone de dos partes, la parte que procesa la información y un banco de baterías que alimenta a la anterior. Este convertidor analógico tiene la capacidad para instrumentar 16 canales analógicos con una frecuencia de muestreo hasta de 100 KHz.

- ✓ **Computadora.** Se utilizó una computadora de escritorio del departamento de maquinaria agrícola (marca Dell con un procesador genuine Intel, con una memoria RAM de 512 MB, y una capacidad en el disco duro de 34.1 GB).

- ✓ **Software (programa).** Se utilizó el programa Daq View 7, 11,08 de IOtech, Inc. Programa para MS Windows, para la adquisición de datos a través del

DaqBook 200 y donde posteriormente se guarden en un archivo por medio de la computadora para después ser analizados.

- ✓ **Galgas extensiométricas.** Las galgas extensiométricas empleadas KFG-5-120-D17-11N3062 de la marca Kyowa, teniendo una resistencia de 120 y 350 Ω . Con un factor de galga de 2.11, en ambas partes fueron colocadas tanto en el interior y exterior del anillo, y en el caso del sensor de cohesión fueron puestas en el exterior del tubo, empleando el procedimiento para su montaje el descrito por Sakurai (1996). Para el monitoreo de los momentos y las fuerzas se empleará el diseño de anillo octagonal extendido descrito por Campos *et al.*, (2000).
- ✓ **Marco de calibración de sensores** .Se utilizo el marco metálico y un gato hidráulico con capacidad de 2 toneladas, para la calibración del equipo se realizo bajo condiciones controladas de laboratorio usando el sensor de penetración. Para el sensor de falla del suelo (Torque), se hizo la calibración bajo condiciones de laboratorio para el cual se empleó una barra de torsión con tres pesas de 910.7 gr, 493.5 gr y 244 gr. Estas a tres distancias diferentes 38, 28 y 18cm.
- ✓ **Arreglos de puente de Wheatstone** Completo para realizar las mediciones en el cambio de resistencia en las galgas, permitiendo medir galgas estáticas y dinámicas.
- ✓ **Tractor.** Para este trabajo se utilizó un tractor John Deere modelo 6403 de 101 hp con sistema hidráulico de centro abierto con bombas de engranes a 66.62 litros por minuto y una Velocidad nominal del motor de 2100 rpm. Se adecuó el tractor, para que recibiera el sistema de adquisición de datos, computadoras; así como, la alimentación de energía (110v) para las mismas.

- ✓ **Pistón hidráulico.** Para la fuerza del penetrómetro: se diseñó un cilindro hidráulico y un pistón para este trabajo con una capacidad de 10 KN.

3.2 Metodología

3.2.1 Desarrollo y Pruebas del Sensor de Resistencia a la Penetración

Se diseñó un sensor de resistencia a la penetración con una capacidad de trabajo de 10 kN a una altura máxima de la barra de acoplamiento del carro porta-sensores de 0.80 m, este sensor se integró por un transductor de fuerzas tipo anillo y una herramienta de penetración tipo cono con una área superficial de 0.002777849 m² y otra de 0.000993461 m². El tamaño de las puntas y la velocidad con que se introducen en el suelo han sido normalizadas por la ASAE, (1992).

La evaluación de esta herramienta se hizo, previa calibración, bajo condiciones de campo en un terreno de 100x100 m. esta parcela se dividió en 5 sub parcelas de 5x20 m; para cada parcela se realizó la prueba de resistencia a la penetración en el centro de la misma a 4 diferentes profundidades: 10, 20, 30 y 40 cm. en esta evaluación se registraron 4,500 datos para las profundidades.

3.2.2. Consideraciones del Diseño del Sensor y Herramienta del Penetrómetro.

Para el diseño del sensor de Anillo para medir la resistencia a la penetración se empleó el programa y el método desarrollado por Campos (1993) el cual considera las siguientes variables:

- ✓ F = Fuerza (N)
- ✓ r = Radio (m)
- ✓ b = Ancho (m)
- ✓ t = Espesor (m)

- ✓ $K =$ Constante
- ✓ Último esfuerzo del acero a ser empleado (Nm^{-2}).

Para el diseño del ring se empleó la siguiente ecuación de esfuerzo flexionante.

$$\sigma = \frac{6 Fr}{b t^2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.1}$$

La ecuación empleada para determinar la deformación del ring de acuerdo a las dimensiones anteriores; así como, su factor de seguridad es la siguiente:

$$L_{90^\circ} = 1.09 \frac{Fr}{Ebt^2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.2}$$

$$\sigma_l = 1.09 \frac{Fr}{bt^2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.3}$$

$$F_s = \frac{\sigma_\rho}{\sigma_l} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.4}$$

Ecuación empleada para determinar el área del cono de la punta del vástago del penetrómetro.

$$A = \pi * r * g \quad g = \sqrt{h^2 + r^2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

- ✓ $F =$ Fuerza (N)
- ✓ $r =$ Radio del ring (m)
- ✓ $L =$ Modulo de elasticidad del acero (Pa)
- ✓ $b =$ Ancho del ring (m)
- ✓ $t =$ Espesor (m)
- ✓ $\sigma_l =$ Esfuerzo calculado
- ✓ $\sigma_\rho =$ Último esfuerzo normalizado (1045)
- ✓ $F_s =$ Factor de seguridad
- ✓ $A =$ área
- ✓ $G =$ generatriz del cono

3.2.3. Montaje de Galgas Extensiométricas

El tipo de galgas extensiométricas montadas en el anillo del ring fueron de 120 y 350 Ω , de la empresa KYOWA, empleando el procedimiento para su montaje el descrito por Sakurai (1996). Para el monitoreo de fuerzas se empleó el diseño del ring descrito por Cook y Ravinovich (1963), con una capacidad de 10 KN de fuerza.

Se empleó un arreglo del puente de Wheatstone completo para realizar la medición en el cambio de resistencia en las galgas, permitiendo medir cargas estáticas y dinámicas. Las configuraciones de las galgas se muestran a continuación en el puente de wheatstone (figura 3.18).

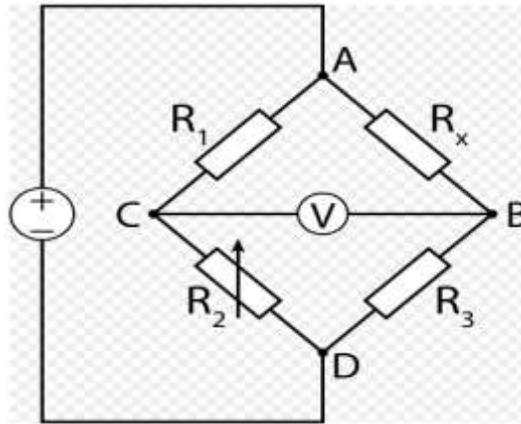


FIGURA 3.18. Configuración de las galgas en el puente de wheatstone.

3.2.4 Calibración del Sensor (RING)

Antes de realizar las pruebas por primera vez se requirió calibrar el equipo, esto es determinar la relación voltaje – fuerza para el sensor que a continuación se describe:

Se instaló el equipo de adquisición de datos en laboratorio activando el programa Daq View.

Se colocaron el sensor de fuerzas en un marco metálico, un gato hidráulico con capacidad de 2 Toneladas y el ring con capacidad de 10 KN. Para la calibración del sensor de fuerzas Se aplicó un voltaje de excitación de 5.5 Volts, 4.5 Volts en la ganancia en la escala del acondicionador de señales DBK-43A en el sistema.

CUADRO 3.2 Datos que se utilizaron en la calibración del sensor en la escala del acondicionador de señales DBK-43.

Excitación	5.5 volts
Input Gain	4.5 volts
Scaling Gain	4.5 volts

Para la calibración del sensor se realizaron 5 corridas, a una frecuencia de muestreo de 20 Hz para un total de 4,500 datos. Las cargas aplicadas para su calibración fueron en escalas de 1000 N cada una. Las curvas generadas fueron obtenidas con la aplicación de cargas con el gato hidráulico de 2 toneladas y con el sensor octagonal extendido con capacidad de 10,000 N. Se graficaron los datos obtenidos en términos de (N) versus (mv) para posteriormente generar las ecuaciones de calibración. Para esto se utilizó el programa MINITAB realizando el análisis de regresión correspondiente.

3.3 Desarrollo y Pruebas del Sensor a la Falla de Suelo

Para el esfuerzo de falla del suelo se diseñó un sensor de torsión con una capacidad de 1.62 N-m a una altura máxima de la barra de acoplamiento del carro porta –sensores de 0.70 m, (figura 3.19). Este sensor se integró por un transductor de fuerzas, por un motor hidráulico con una capacidad de 1.0 rpm, una válvula reguladora de flujo y una herramienta de falla de suelo como se muestra en la figura (3.20).

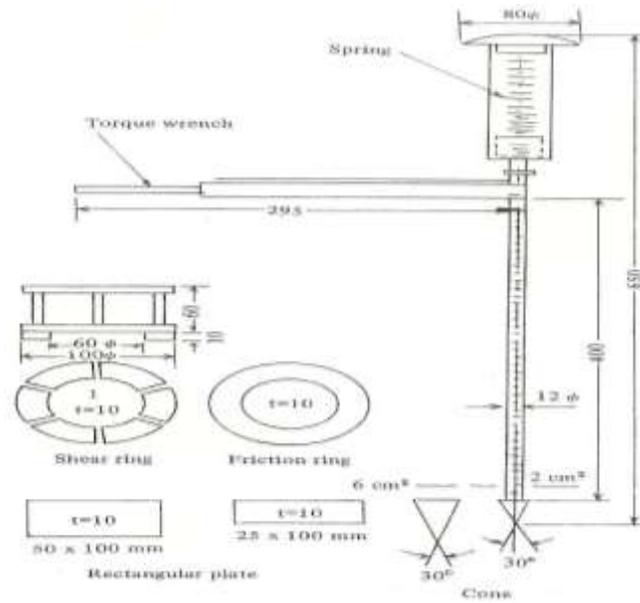


FIGURA 3.19. Herramienta del sensor de falla del suelo (torque).

La calibración de esta herramienta se hizo en una primera etapa bajo condiciones de laboratorio. Para lo cual se empleó una barra de torsión como se muestra en la figura (3.20).

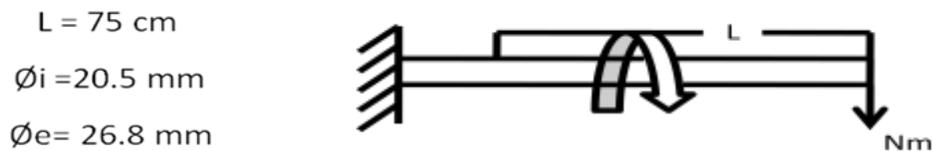


FIGURA 3.20. Barra de torsión para el sensor de cohesión y sus radios.

3.3.1 Calibración del Sensor de Torque

Para la calibración bajo condiciones de laboratorio Se realizaron corridas con los siguientes pesos: 910.7 gr, 493.5 gr y 244 gr con tres distancias diferentes 38, 28 y 18cm partiendo del centro de la barra del sensor (figura 3.21). En esta evaluación se registraron 6,000 datos para cada arreglo, siguiendo la secuencia siguiente:

Al llegar a los 500 datos de registro en el Daq-Book se aplicaba las pesas, a los 1,500 datos se retira las pesas a los 2,500 se le vuelve a aplicar a los 3,500 se las quitamos a los 4,500 se la aplicamos y a los 5,500 se la retiramos hasta llegar a los 6,000 datos considerando el cambio de posiciones.



FIGURA 3.21. Proceso de pruebas en laboratorio del sensor de cohesión y contrapesos empleados en la calibración.

3.3.2 Consideraciones del Diseño del Sensor y Herramienta del Torque

Para el diseño del sensor de torsión se consideró las ecuaciones de una barra hueca sometida a una torsión pura (Timoshenko, 1979), como se muestra en la figura (3.22).

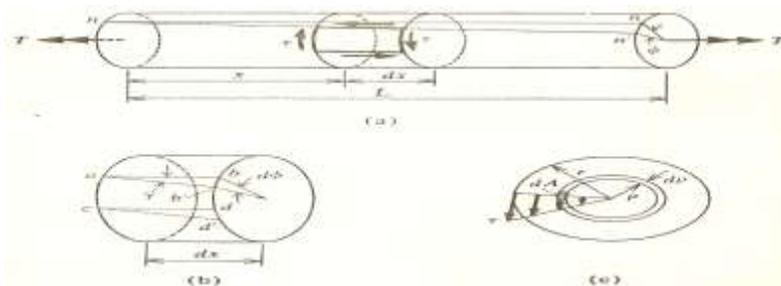


FIGURA 3.22. Barra circular en torsión pura.

Donde se utilizaron las ecuaciones siguientes:

$$\phi = \frac{T L}{G J} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.6}$$

$$J = \frac{\pi}{2} (r_2^4 - r_1^4) = \frac{\pi}{32} (d_2^4 - d_1^4) \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.7}$$

$$\gamma = r \theta = \frac{r \theta}{2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

- ✓ ϕ = Angulo de torsión
- ✓ T = Momento torsionante
- ✓ L = Longitud
- ✓ G = Modulo de elasticidad de cortadura
- ✓ J = Momento polar de inercia, constante de torsión
- ✓ θ = Angulo de torsión por unidad de longitud
- ✓ γ = Deformación de cortadura
- ✓ r_i = Radio interior
- ✓ r_e = Radio exterior

La ecuación empleada para determinar la resistencia a la falla de suelo (C) de acuerdo a las dimensiones anteriores; así como, su factor de seguridad es la siguiente:

$$C = \frac{3T}{2\pi (r_1^3 - r_2^3)} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

- ✓ C = Cohesión (kpa)
- ✓ T = Torque (N.m)
- ✓ r_1 = Diámetro del anillo exterior (m)
- ✓ r_2 = Diámetro del anillo interior (m)

En la figura (3.23), se muestra el cableado y los arreglos de las galgas en puente de wheatstone para medir el esfuerzo a la falla del suelo producido por la localización de la fuerza.

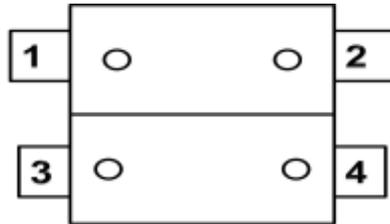


Figura (3.23) a

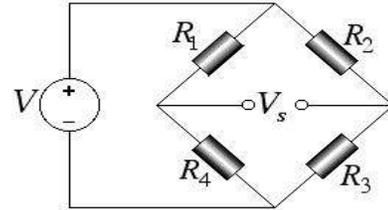


Figura (3.23) b

FIGURA 3.23. Sensor del esfuerzo a la falla del suelo. a) cableado del sensor del tubo circular cableado en los dos lados opuestos del mismo. b) representación de las fuerzas actuando en la herramienta del de falla del suelo y el arreglo de circuitos con galgas extensiométricas en puentes de wheatstone.

En la figura (3.24), se muestran las características de las galgas extensiométricas montadas en el elemento sensor. Es importante mencionar, que se requiere seguir el procedimiento descrito por Sakurai (1996) para el montaje de las galgas, así como su verificación de aislamiento, debiendo este ser superior a los 50 MΩ.

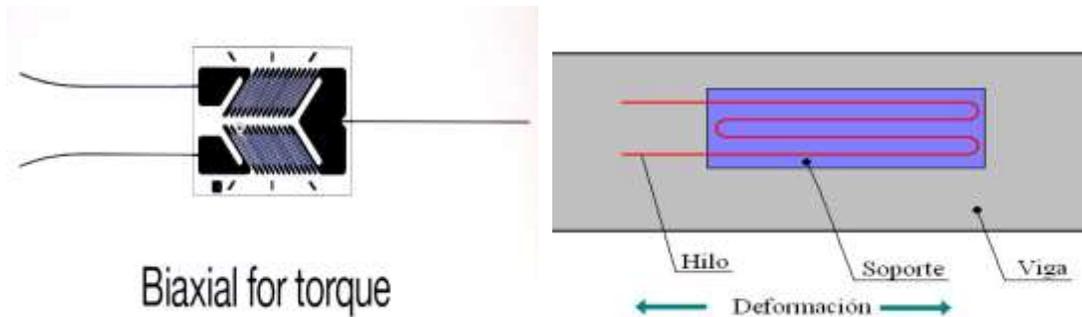


FIGURA 3.24. Especificaciones de galgas extensiométricas empleadas en el elemento sensor, en arreglos de puente de wheatstone.

3.4 Pruebas de Campo del sensor de Resistencia a la Penetración y sensor de falla del suelo

Una vez lograda la calibración se procedió a realizar las pruebas en condiciones de campo en el campo experimental Navidad, colonia san Rafael, municipio de Galeana, Nuevo León empleando el carro porta sensores y el tractor acondicionado para este propósito (figura 3.26).

Campo Agrícola Experimental Ing. Humberto Treviño Siller, Navidad, Nuevo León, México. Este campo fue adquirido por la Universidad a principios de 1950 sin embargo fue hasta 1970 cuando se empezó a utilizar con fines de investigación. Cuenta con 100 ha de tierras agrícolas de riego.

Esta unidad experimental se encuentra en la Colonia Agrícola Navidad, perteneciente al municipio de Galeana, N.L., a 84 km de la ciudad de Saltillo, Coahuila., por la carretera saltillo-matehuala y se localiza entre las coordenadas geográficas 25° 04" de latitud norte y 100° 37" de longitud oeste; y a una altitud de 1895 msnm.

El clima es semiseco con precipitación media anual es de 492 mm, la temperatura media anual es de 14.6 °C, las heladas empiezan en octubre pero pueden presentarse desde septiembre, terminan en marzo o abril; la temperatura extrema es de -15 °C. Las características del suelo es textura de migajón areno-limoso, con un pH alcalino (7.8 - 8.0) con alto contenido de materia orgánica, pobres en nitrógeno total, muy bajos en fósforo, con suficiente potasio intercambiable, pero muy bajos en hierro aprovechable y magnesio intercambiable; con una C.I.C. mediana. Cuenta con dos pozos profundos con un gasto total de 70 lts/seg; el agua está clasificada como de calidad condicionada (C3S1) la cual contiene alta salinidad y bajo contenido de sodio.



FIGURA 3.25 predio, Tractor y carro porta sensores empleados en campo para medir la resistencia a la penetración en el campo experimental rancho navidad.

La evaluación en campo consistió en determinar las magnitudes de las fuerzas de penetración del suelo a 4 profundidades diferentes 10, 20, 30, y 40 cm. En una parcela con las siguientes dimensiones 100m x 100m. La parcela fue dividida en 5 filas (de la fila 0 hasta la fila 4) con las dimensiones entre cada punto de 20m x 20m.

3.5 Realización del mapeo

Para la realización del mapeo utilizaremos el software Gs+ (geoStatistics) en el cual después de obtener los datos de campo nosotros mapearemos respecto a los datos obtenidos. Conforme a los siguientes puntos que se encuentran en la siguiente cuadrícula del terreno.

IV. RESULTADOS

4.1 Características y Calibración del sensor Ring Para Resistencia a la Penetración

En la figura (4.26), se muestra el carro porta sensores y herramienta del sensor de resistencia a la penetración con capacidad de 10, 000 N.

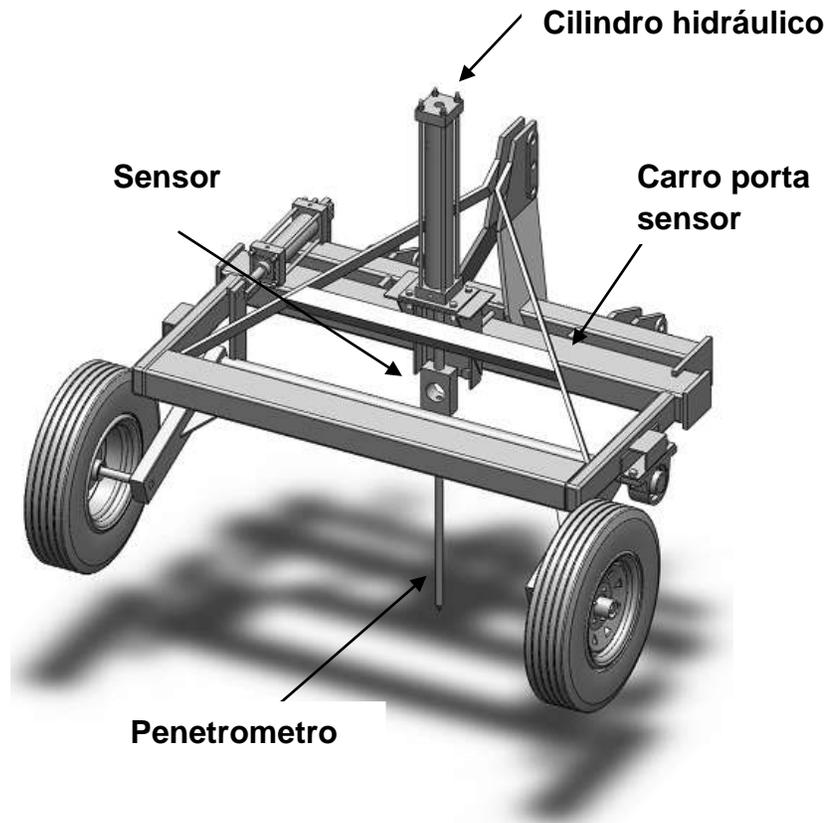


FIGURA 4.26. Diseño del carro porta sensores con dimensiones en 3D con la herramienta del sensor (ring) y penetrómetro. En SolidWorks Premium 2010.

En la figura (4.27), se muestran las características del diseño del ring. Con una capacidad de 10 KN. Para medir los requerimientos de energía en forma dinámica en labranza primaria y para posteriormente georeferenciarlos, empleando el sistema de información geográfica (SIG), para luego obtener los mapas de diagnósticos.

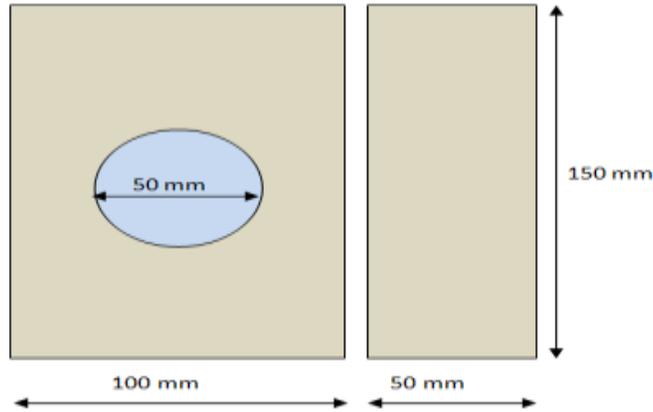


FIGURA 4.27. Dimensiones del transductor del ring con un acero 1045 para una resistencia a la penetración de 10 KN.

En la figura (4.28), se muestra el cableado y los arreglos de las galgas en puente de wheatstone para medir la fuerza de resistencia a la penetración producida por la localización de la fuerza.

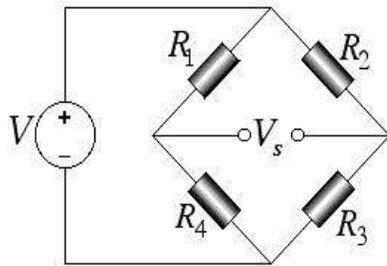


Figura 4.28 (a)

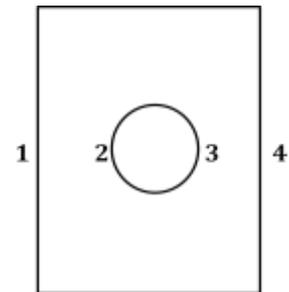


Figura 4.28 (b)

FIGURA 4.28. Sensor de resistencia a la penetración. (a) cableado del sensor del ring. (b) representación de la fuerza actuando en la herramienta para la penetración y el arreglo de circuitos con galgas extensiométricas que están representadas con los números en puentes de wheatstone.

En la figura (4.29), se muestran las características de las galgas extensiométricas montadas en el elemento sensor. Es importante mencionar, que se requiere seguir el procedimiento descrito por Sakurai (1996) para el montaje de las galgas, Así como su verificación de aislamiento, debiendo este ser superior a los 50MΩ.



FIGURA 4.29. Especificaciones de galgas extensiométricas empleadas en el elemento sensor, en arreglos de puente de wheatstone.

En la figura (4.30), se muestra el ejemplo de la grafica de los datos obtenidos en la calibración bajo condiciones de laboratorio del sensor ring, para las fuerzas aplicadas en Newton en el plano horizontal de acuerdo con los arreglos del puente de wheatstone mostrados en la figura (4.30).

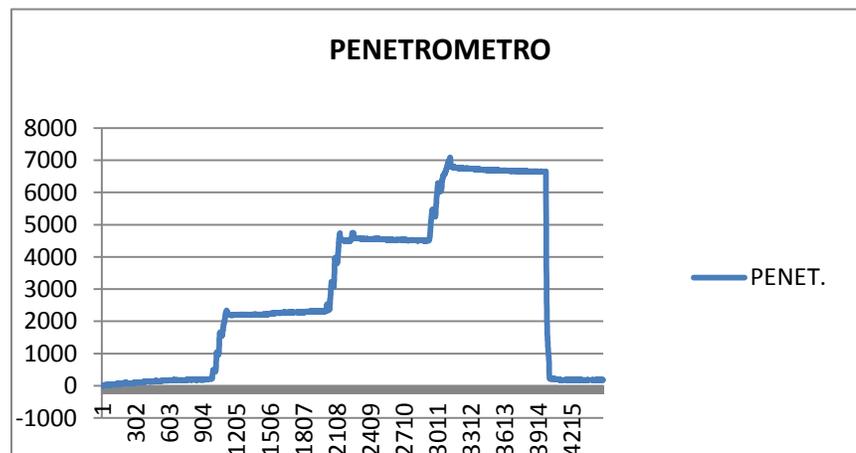


FIGURA 4.30. Calibración de fuerzas del sensor ring con una capacidad de 10 N. a diferentes fuerzas.

En el ANEXO 7.1 en el cuadro 7.1-1, se muestran Los resultados de las fuerzas para determinar la ecuación de calibración del sensor de ring empleado en el penetrómetro hidráulico.

En la figura (4.31), se muestra la curva de regresión obtenida mediante los datos de calibración, bajo condiciones controladas empleando el paquete del programa estadístico de Minitab. En él se aprecia un alto coeficiente de correlación (R-.Sq) de más del 99.7% entre las cargas aplicadas (N) y los valores obtenidos en (mv). Esta linealidad de respuesta del sensor, nos da una alta confiabilidad de los datos a obtener bajo condiciones de campo.

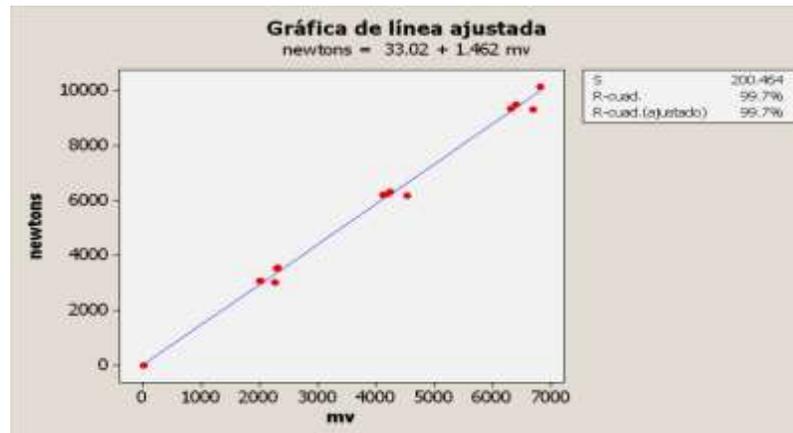


FIGURA 4.31. Ecuación de respuesta de la fuerza, aplicada del sensor del ring con una capacidad de 10 KN.

En la gráfica se muestra que el coeficiente de relación que es el 99.7% de los puntos se ajustan a la línea esto nos quiere decir que se encuentra arriba del rango requerido mínimo del 99.5%, con el ajuste que obtuvo tenemos una constante de calibración de 1.462 mv.

4.1.1 Evaluación del Sensor Ring Para Determinar la Resistencia a la Penetración y Localización de Áreas Compactadas del Suelo bajo condiciones de campo

En la figura (4.32), se muestran las fotografías de la evaluación de resistencia a la penetración bajo condiciones en campo abierto. En la figura (4.33), se puede apreciar la variación de la demanda de fuerza para la resistencia a la penetración del suelo cuando se trabaja con la herramienta a las diferentes profundidades 10, 20, 30, y 40 cm.

En estas profundidades se logra apreciar fácilmente que a partir de los 25 cm el suelo empieza a ser más compacto, haciendo de manifiesto esto, que cuando la herramienta se encuentra trabajando a las 30 y 40 cm de profundidad las capas del suelo se encuentran más compactadas, esto quiere decir que a estas profundidades no se ha trabajado y dándonos cuenta en los mapas obtenidos donde se muestran la demanda de fuerzas, se pone de manifiesto la importancia y la determinación por zonas de la demanda de energía y la localización de áreas compactadas que se aprecian en los mapas de rendimiento.



FIGURA 4.32. Evaluación encampo para determinar la resistencia a la penetración a diferentes profundidades y generación de mapas con sistema de información geográfica.

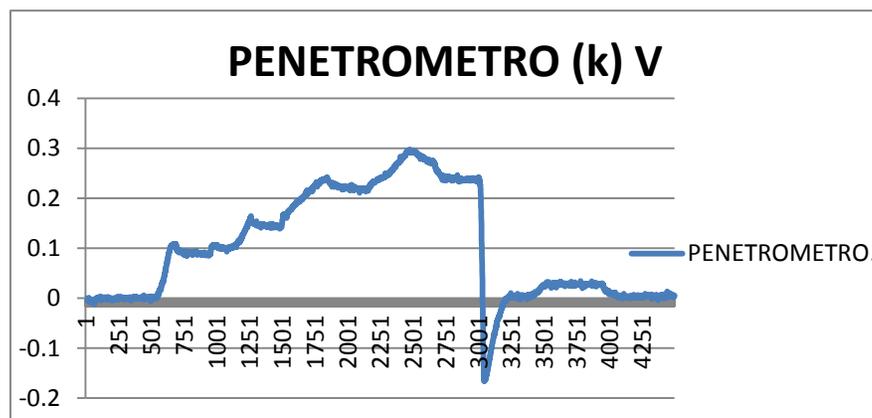


FIGURA 4.33. Datos de fuerza del penetrómetro en campo a 10, 20, 30 y 40 cm de profundidad.

En el anexo 7.2. Cuadro 7.3 Se muestra la tabla de datos obtenidos en un predio de 100x100 m. de largo a las profundidades hasta de 10, 20, 30 y 40 cm. En las figuras (4.34 A, 4.34 B; 4.35 A, 4.35 B; 4.36 A, 4.36 B; 4.37 A, 4.37 B), se muestran los gráficos a cuatro diferentes profundidades de las resistencias a la penetración generados con el programa GS+ a 10 niveles, empleando interpolaciones de 1 metro con el método de inverso de la distancia.

En la figura (4.34), se aprecia que el mínimo y el máximo valor de resistencia a la penetración obtenido en el predio a una profundidad de 10 cm fue de: 419 y de 1403 kPa respectivamente.

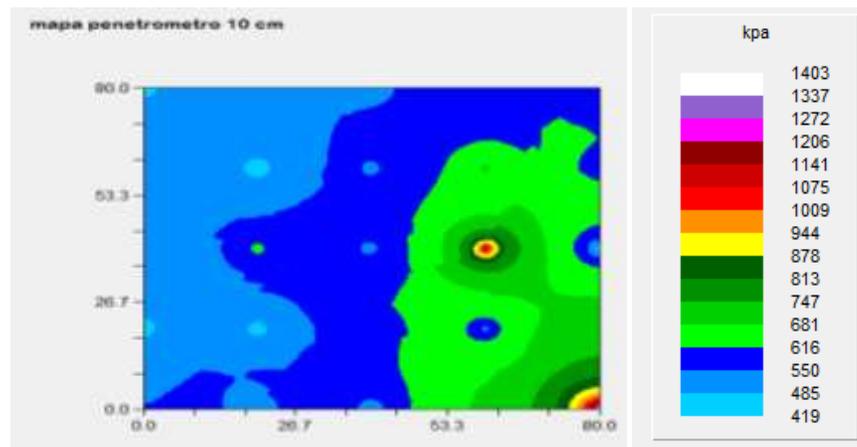


FIGURA 4.34 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 10 cm.

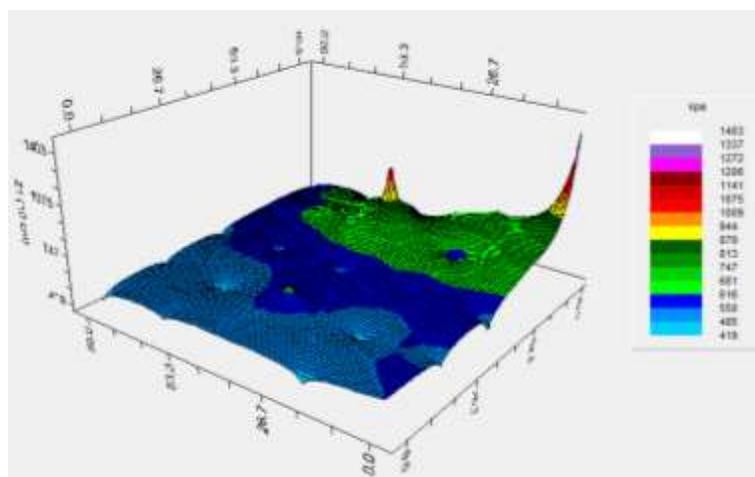


FIGURA 4.34 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 10 cm.

En la figura (4.35), se aprecia que el mínimo y el máximo valor de resistencia a la penetración obtenido en el predio a una profundidad de 20 cm fue de: 975 y de 1971 kPa respectivamente.

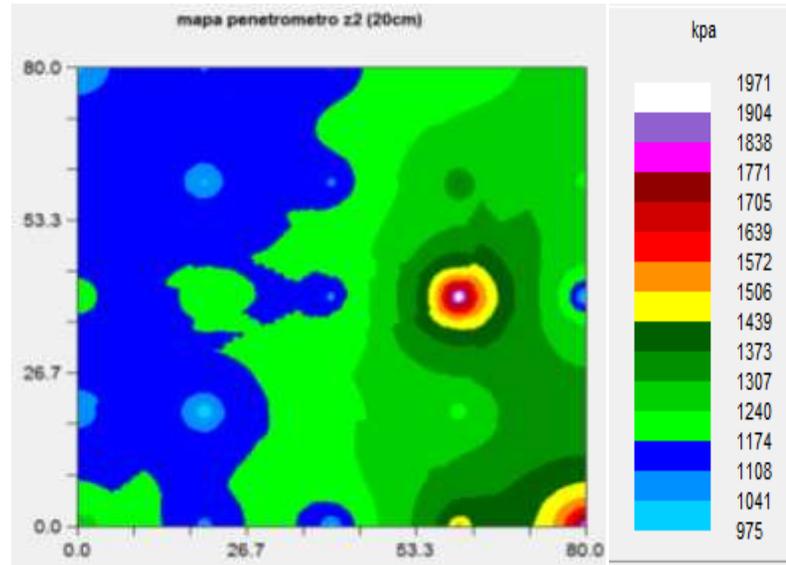


FIGURA 4.35 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 20 cm.

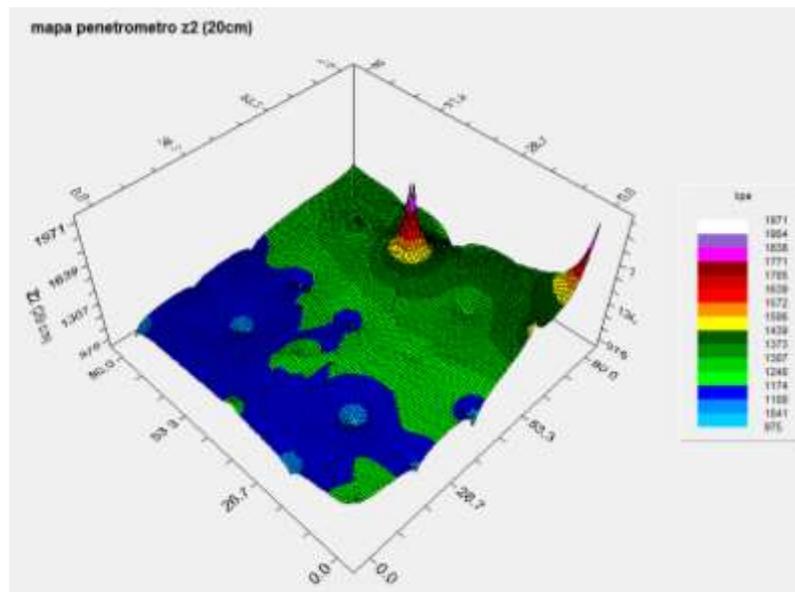


FIGURA 4.35 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 20 cm.

En la figura (4.36), se aprecia que el mínimo y el máximo valor de resistencia a la penetración obtenido en el predio a una profundidad de 30 cm fue de: 1571 y de 2670 kPa respectivamente.

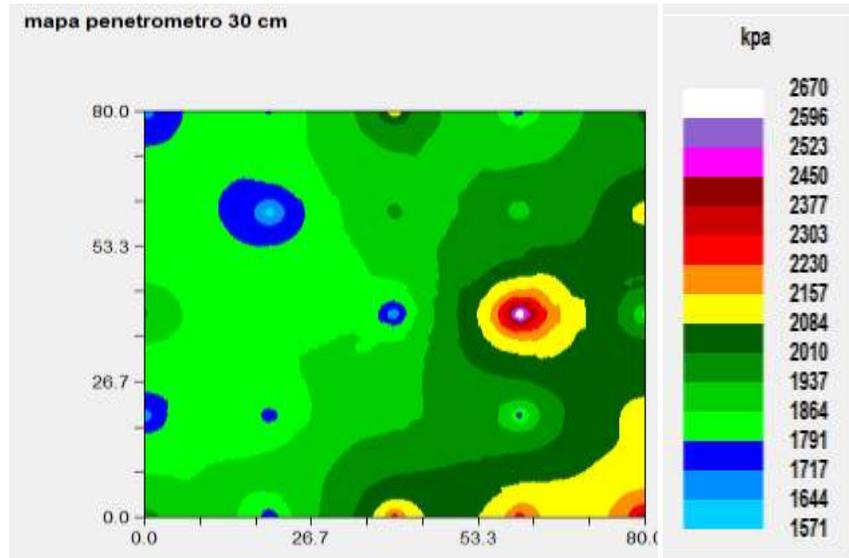


FIGURA 4.36 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 30 cm.

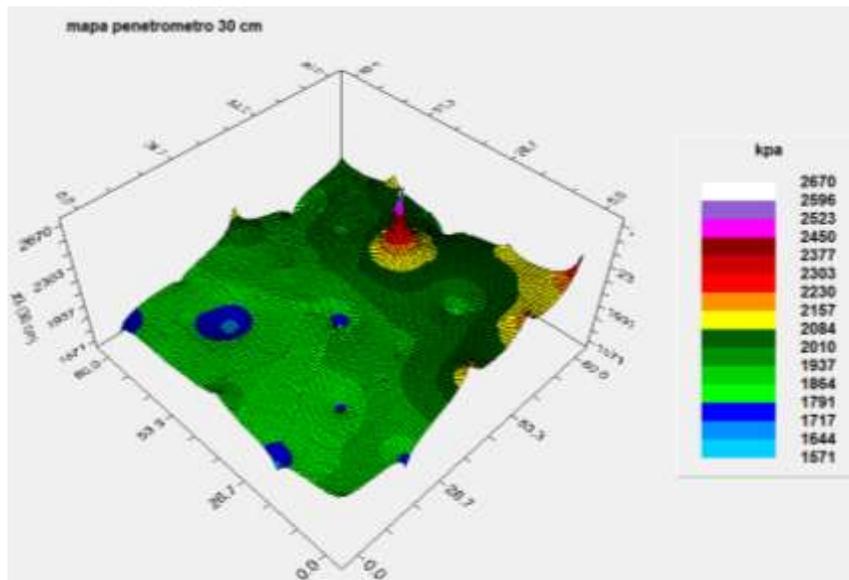


FIGURA 4.36 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 30 cm.

En la figura (4.37), se aprecia que el mínimo y el máximo valor de resistencia a la penetración obtenido en el predio a una profundidad de 40 cm fue de: 2226 y de 3525 kPa respectivamente.

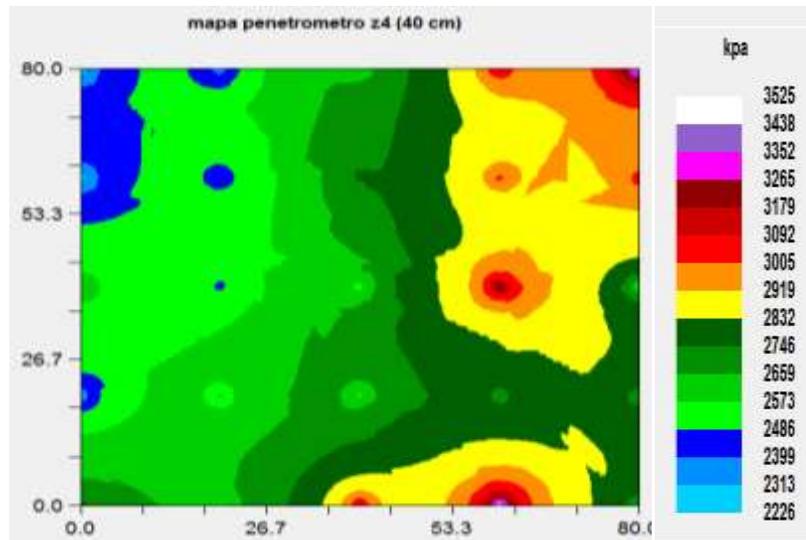


FIGURA 4.37 A. Mapa de fuerza a la resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 40 cm.

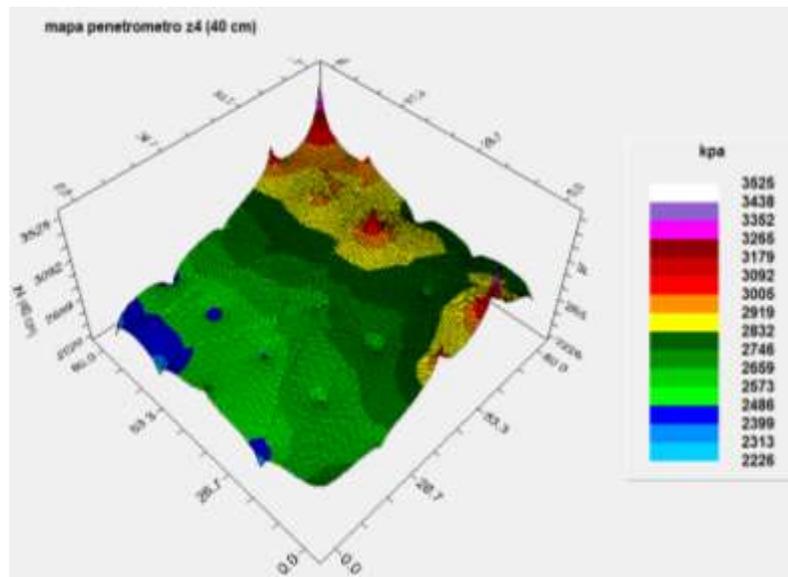


FIGURA 4.37 B. Imagen en 3d de resistencia a la penetración en campo a una profundidad de 40 cm

En los mapas se muestra que se encuentra una mayor parte del suelo compactado con una fuerza mínima de compactación de 2226 (kPa) de una color celeste y una máxima fuerza de 3626 kPa de color Blanco lo cual significa que aquí se necesita más labores de labranza para disminuir la compactación mientras que en los puntos restantes disminuye la fuerza a la resistencia de penetración la cual disminuyen los requerimientos de laboreo del suelo.

4.2 Características y Calibración del sensor de esfuerzo a la falla del suelo

En la figura (4.38), se muestran las características del carro porta-sensores y herramienta del sensor a la falla del suelo (torque).

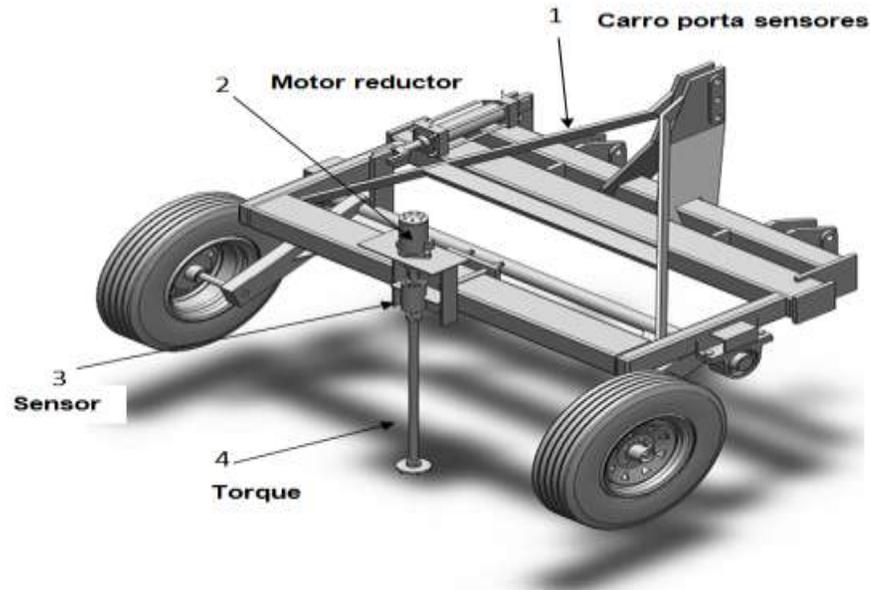


FIGURA 4.38. Características del carro porta sensores y herramienta del sensor (torque). En SolidWorks Premium 2010.

En la figura (4.39), se muestra los ejemplos de la gráfica de los datos obtenidos en la calibración del sensor de esfuerzo a la falla del suelo modificado bajo condiciones de laboratorio.

Los resultados obtenidos de la sensibilidad del sensor evaluado y empleando pesos de 910, 493.5 y 244 gramos cada uno a tres diferentes distancias 18, 28, y 38 cm partiendo del centro de la barra del sensor, fijados los instrumentos utilizados se muestran en la figura (4.39).

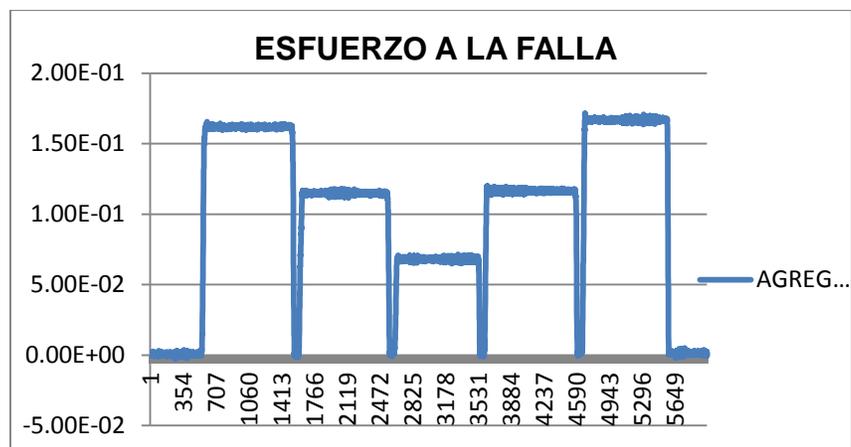


FIGURA 4.39. Calibración del de fuerzas del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento en los pesos de izquierda-derecha

Considerando las cargas y descargas en una posición de derecha-izquierda como se muestra en la siguiente figura.



FIGURA 4.40. Cargas y descargas considerando pesos y distancias para la calibración del sensor de esfuerzo a la falla del suelo. A una posición de la fuerza de 18, 28, y 38 cm con respecto del centro del sensor.

En el cuadro (4.3), se muestran las medidas de las fuerzas (F_x), en carga y descarga, obtenidos con tres diferentes posiciones de las cargas con respecto al centro del tubo del sensor de cohesión. En esta se muestra la alta sensibilidad del sensor a los cambios de posición de la fuerza.

CUADRO 4.3. Datos de calibración bajo condiciones de laboratorio de fuerzas (N) en mili volts (mv) del sensor de esfuerzo a la falla del suelo, en tres posiciones diferentes respecto al centro del sensor; izquierda derecha a 38, 28 y 18 cm. Tres diferentes pesos A=910.7 gr, B=493.5 gr y C=244 gr

REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) A				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
89	0.38	0.9107	8.93	3.39
64	0.28	0.9107	8.93	2.50
36	0.18	0.9107	8.93	1.61
62	0.28	0.9107	8.93	2.50
89	0.38	0.9107	8.93	3.39
106	0.38	0.9107	8.93	3.39
79	0.28	0.9107	8.93	2.50
53	0.18	0.9107	8.93	1.61
80	0.28	0.9107	8.93	2.50
110	0.38	0.9107	8.93	3.39
83	0.38	0.9107	8.93	3.39
60	0.28	0.9107	8.93	2.50
31	0.18	0.9107	8.93	1.61
57	0.28	0.9107	8.93	2.50
85	0.38	0.9107	8.93	3.39
REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) AB				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
100	0.28	1.4042	13.78	3.86
57	0.18	1.4042	13.78	2.48
96	0.28	1.4042	13.78	3.86
139	0.38	1.4042	13.78	5.23
135	0.38	1.4042	13.78	5.23
96	0.28	1.4042	13.78	3.86
58	0.18	1.4042	13.78	2.48
96	0.28	1.4042	13.78	3.86
138	0.38	1.4042	13.78	5.23
140	0.38	1.4042	13.78	5.23
92	0.28	1.4042	13.78	3.86
54	0.18	1.4042	13.78	2.48
96	0.28	1.4042	13.78	3.86
134	0.38	1.4042	13.78	5.23
REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) ABC				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
170	0.38	1.6482	16.17	6.14
123	0.28	1.6482	16.17	4.53

68	0.18	1.6482	16.17	2.91
120	0.28	1.6482	16.17	4.53
166	0.38	1.6482	16.17	6.14
160	0.38	1.6482	16.17	6.14
115	0.28	1.6482	16.17	4.53
68	0.18	1.6482	16.17	2.91
116	0.28	1.6482	16.17	4.53
168	0.38	1.6482	16.17	6.14
160	0.38	1.6482	16.17	6.14
114	0.28	1.6482	16.17	4.53
66	0.18	1.6482	16.17	2.91
114	0.28	1.6482	16.17	4.53
163	0.38	1.6482	16.17	6.14
REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) AC				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
112	0.38	1.1547	11.33	4.30
79	0.28	1.1547	11.33	3.17
46	0.18	1.1547	11.33	2.04
80	0.28	1.1547	11.33	3.17
112	0.38	1.1547	11.33	4.30
118	0.38	1.1547	11.33	4.30
78	0.28	1.1547	11.33	3.17
43	0.18	1.1547	11.33	2.04
75	0.28	1.1547	11.33	3.17
112	0.38	1.1547	11.33	4.30
63	0.38	1.1547	11.33	4.30
41	0.28	1.1547	11.33	3.17
22	0.18	1.1547	11.33	2.04
42	0.28	1.1547	11.33	3.17
65	0.38	1.1547	11.33	4.30
REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) B				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
40	0.38	0.4935	4.84	1.84
27	0.28	0.4935	4.84	1.36
13	0.18	0.4935	4.84	0.87
28	0.28	0.4935	4.84	1.36
42	0.38	0.4935	4.84	1.84
40	0.38	0.4935	4.84	1.84
25	0.28	0.4935	4.84	1.36
14	0.18	0.4935	4.84	0.87
26	0.28	0.4935	4.84	1.36

41	0.38	0.4935	4.84	1.84
39	0.38	0.4935	4.84	1.84
25	0.28	0.4935	4.84	1.36
13	0.18	0.4935	4.84	0.87
25	0.28	0.4935	4.84	1.36
40	0.38	0.4935	4.84	1.84
REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) BC				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
71	0.38	0.7375	7.23	2.75
44	0.28	0.7375	7.23	2.03
23	0.18	0.7375	7.23	1.30
50	0.28	0.7375	7.23	2.03
68	0.38	0.7375	7.23	2.75
64	0.38	0.7375	7.23	2.75
44	0.28	0.7375	7.23	2.03
23	0.18	0.7375	7.23	1.30
45	0.28	0.7375	7.23	2.03
69	0.38	0.7375	7.23	2.75
65	0.38	0.7375	7.23	2.75
42	0.28	0.7375	7.23	2.03
23	0.18	0.7375	7.23	1.30
43	0.28	0.7375	7.23	2.03
66	0.38	0.7375	7.23	2.75
REPETICIÓN (ARREGLO-PESO) C				
mv	Distancia (m)	Peso (gr)	Newton	Par (N.m)
19	0.38	0.244	2.39	0.91
12	0.28	0.244	2.39	0.67
7	0.18	0.244	2.39	0.43
10	0.28	0.244	2.39	0.67
14	0.38	0.244	2.39	0.91
15	0.38	0.244	2.39	0.91
11	0.28	0.244	2.39	0.67
6	0.18	0.244	2.39	0.43
10	0.28	0.244	2.39	0.67
19	0.38	0.244	2.39	0.91
13	0.38	0.244	2.39	0.91
9	0.28	0.244	2.39	0.67
6	0.18	0.244	2.39	0.43
11	0.28	0.244	2.39	0.67
16	0.38	0.244	2.39	0.91

En la figura (4.41), se muestra la curva de respuesta de los (mv) obtenidos en las cargas y descargas del sensor en programa estadístico Minitab. En esta se puede apreciar un alto coeficiente de correlación (R-Sq) de más del 99% lo cual nos da una alta confiabilidad de los datos a obtener bajo condiciones de campo.

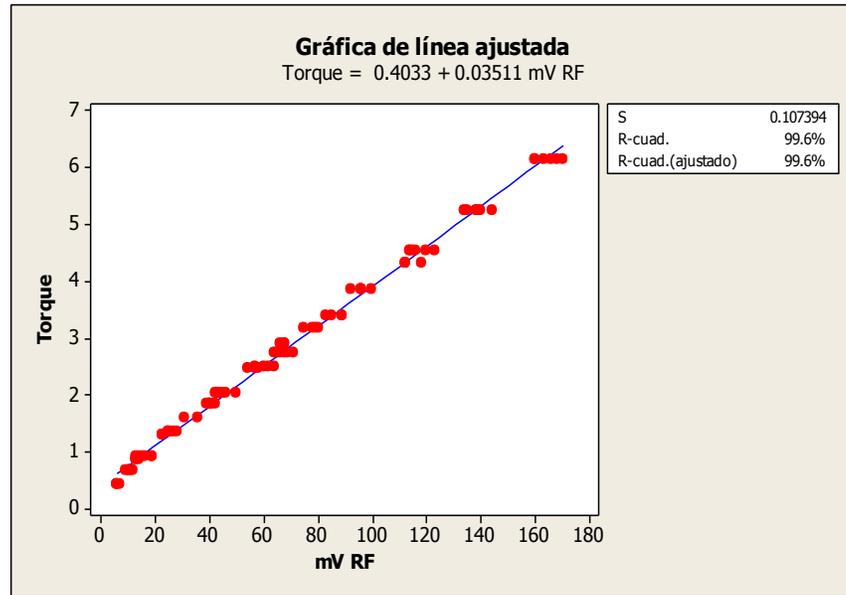


FIGURA 4.41. Ecuación de respuesta, fuerza, del sensor con una capacidad de 1.62 N-m.

4.2.1 Evaluación del Sensor de fuerza a la falla de suelo y herramienta

En la figura (4.42), se muestran las fotografías de la evaluación del sensor de esfuerzo a la falla del suelo bajo condiciones de campo abierto.

Se logra apreciar fácilmente que el suelo está muy compacto, cuando la herramienta se encuentra trabajando, esto quiere decir que a estas no se ha trabajado y dándonos cuenta en los mapas obtenidos donde se muestran la demanda de fuerzas, se pone de manifiesto la importancia y la determinación por zonas de la demanda fuerza y la localización de áreas compactadas que se aprecian en los mapas de rendimiento.



FIGURA 4.42. Evaluación encampo para determinar la demanda de fuerza para la falla del suelo.

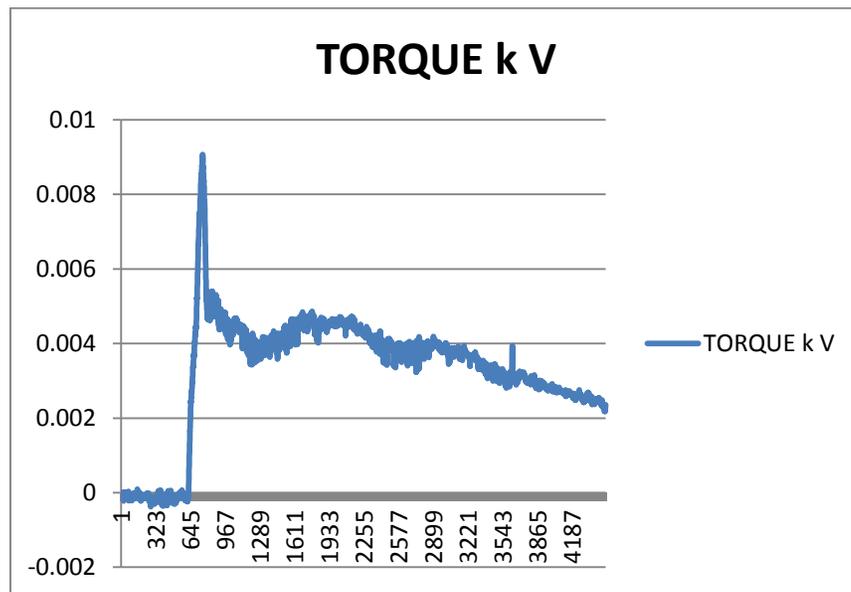


Ilustración 1 FIGURA 4.43. Datos de demanda de fuerza para la falla del suelo de en campo

CUADRO 4.4 Datos de las pruebas del sensor esfuerzo a la falla del suelo bajo condiciones de campo

PUNTOS DE MUESTREOS	mv	TORQUE N.m	COHESIÓN kPa
T00	1453	10	267.07
T01	758	9	240.36
T02	683	5	133.53
T03	564	9	240.36
T04	660	5	133.53
T14	578	3	80.12
T13	637	3	80.12
T12	574	3	80.12
T11	784	6	160.24
T10	811	3	80.12
T20	656	3	80.12
T21	622	8	213.65
T22	788	3	80.12
T23	3460	4	106.82
T24	1661	2	53.41
T34	562	10	267.07
T33	482	6	160.24
T32	1152	3	80.12
T31	1106	10	267.07
T30	553	7	186.95
T40	829	4	106.82
T41	776	15	400.60
T42	1892	11	293.77
T43	862	20	534.14
T44	654	8	213.65

En el anexo 7.4 cuadro 7-4. Se muestra la tabla de datos obtenidos en las pruebas de campo en el predio rancho navidad en la cual se utilizó una superficie de 100x100 m para evaluar el sensor de esfuerzo a la falla del suelo. En el cuadro se muestran los datos para los gráficos del sensor de esfuerzo a la falla del suelo generados con el programa GS+ empleando interpolaciones de 1 metro con el método de inverso de la distancia.

En la figura (4.44), se aprecia que el mínimo y el máximo valor de la fuerza que se necesita para romper un suelo en el predio de: 2 y 20 de $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ respectivamente.

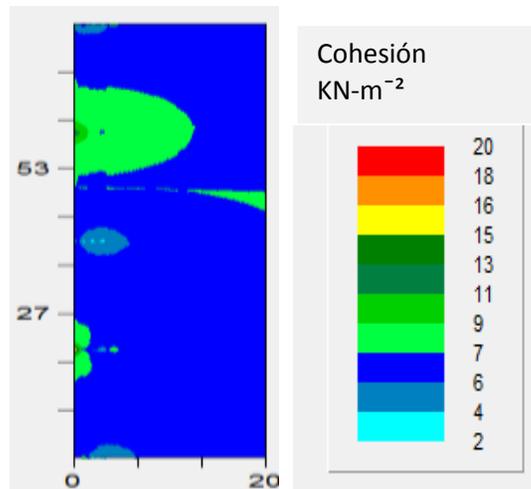


FIGURA 4.44 A. Mapa de fuerza a la falla del suelo.

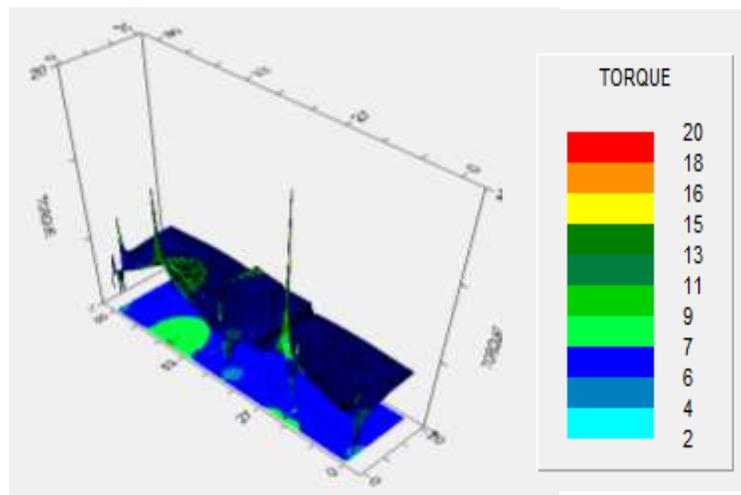


FIGURA 4.44 B. Imagen en 3d de fuerza a la falla del suelo.

En los mapas se muestra que se requiere una menor fuerza de 6 $\text{N}\cdot\text{m}$ que se muestra de color azul para la falla del suelo y una mayor fuerza de 18 $\text{N}\cdot\text{m}$ ya que se encuentra una mayor parte del suelo compactado de color rojo lo cual significa que aquí se necesita más labores de labranza para disminuir la compactación del suelo mientras que en los puntos restantes disminuye la fuerza a la falla del suelo lo cual disminuyen los requerimientos de laboreo del suelo.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- ✓ Se desarrolló un sensor integrado por un ring y una herramienta de penetración tipo cono con una capacidad de 10,000 N con una alta linealidad en su respuesta de penetración (fuerza). Mostrando una alta sensibilidad de 1.462 mv-N y confiabilidad, con coeficientes de correlación de más del 99%.
- ✓ Los resultados obtenidos y mapeados en la evaluación en campo con penetrómetro muestran la profundidad y los puntos donde se localizan las áreas compactadas del suelo evaluado.
- ✓ Se desarrollo un sensor de fuerza a la falla de suelo y herramienta de torque, con una capacidad de 1.62 N.m, los resultados obtenidos en evaluación muestran un alto nivel de sensibilidad de 0.03511 mv-N.m con un coeficiente de correlación de más del 99.6% de los puntos que se ajustan a la línea de respuesta. Los niveles de cohesión del suelo encontrados fluctúan de 2 a 20 kN.m⁻²
- ✓ Los resultados obtenidos y mapeados en la evaluación en campo, muestran en tiempo real tanto la demanda de fuerza para la penetración del suelo como la profundidad donde se localizan las áreas compactadas.
- ✓ La calidad de Los datos obtenidos puede permitir hacer una correlación entre mapas de prescripción de resistencia a la penetración la y esfuerzo a la falla del suelo.

5.2 Recomendaciones

- ✓ Incorporar el sensor de profundidad de trabajo del Penetrometro.
- ✓ Incorporar el filtro al sensor de profundidad del Penetrometro para eliminar ruidos magnéticos.
- ✓ Realizar la interconexión entre la fuerza del Penetrometro, la profundidad del mismo y el almacenamiento dinámico de datos en DaqBook-200

VI. LITERATURA CITADA

- ✓ Bragachini M; Andrés Méndez y Fernando Scaramuzza. 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. INTA Manfredi.
- ✓ Bragachini M; Axel von Martini, Andrés Méndez. 2000. Alcances y Precisión Monitores Rendimiento. INTA Manfredi
- ✓ Bongiovanni R, Ph.D. 2003. Revista IDIA del INTA
- ✓ Bullock, D. S., Swinton, S., and J. Lowenberg-DeBoer. 2002. "Can Precision Agricultural Technology Pay For Itself? The Complementarity of Precision Agriculture Technology and Information." Forthcoming in Agricultural Economics, published by the International Association of Ag Econ.
- ✓ kms.progapinia.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=433 - 24k - Doerge T.A. (1999). Agricultura de Precisión y Manejo Sitio Específico.
- ✓ De León González, F.1, Payán Zelaya, F. y S. Sánchez R. Localización de las capas compactadas en el perfil del suelo mediante la penetrometría. Identification of soil Compacted Layers Using a Cone Digital Penetrometer <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/16/4/art303-307.pdf>
- ✓ Gill, W.R., A.C Bailey, and C.A. Reaves. 1982. Harrow disk curvature. Influence on soil penetration. Trans. ASAE 25:1180-1180.
- ✓ Flamand Rodríguez C. L. 1995. Introducción a la Mecánica de Suelos, Universidad Autónoma de Chapingo, Dirección General de Difusión Cultural, Dpto. de Publicaciones.

- ✓ Campos Magaña, S. G.; Brian Wills; Cadena, Z, M. 1992. Consideraciones para el Diseño de Transductores Octagonales y su aplicación en la Evaluación de Implementos de Labranza. Memoria del II Congreso Nacional. Asociación Mexicana de Ingeniería Agrícola. Irapuato, Gto. México.
- ✓ Godwin, R.J.; Reynolds, A. J.; O'Dogherty; Al-Ghazal, A. A. 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. J. Agric. Engng. Res. 55:189-205.
- ✓ Campos Magaña, S.G.1993. Development of minimum maize plante for Mexican agriculture. Unpublished phd thesis, Newcastle University, England. 167p.
- ✓ Convertidor analógico digital DAQ BOOK 200/2000. <http://www.iotech.com.mx>.
- ✓ Norton G. W and S.M Swinton. 2001. Precision agriculture: Global prospects and environmental implications. Forthcoming in G.H Peters and P. Pingali, eds. Tomorro's Agriculture: Incentives, institutions, infrastructure and innovations: proceeding of the 24th international conference of agricultural Economits, 200. Lond: Ashgate
- ✓ Andrade Sánchez Pedro. (2005) Construcción de un bastidor porta-sensores para medir el estado físico-mecánico del suelo. XV Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz Ver. México.
- ✓ Marín Omaña Leticia. (2003) Desarrollo de un Transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales a tractores categoría II. "Basado en el diseño de vigas sometidas a esfuerzos flexionantes y Torsionantes".

Tesis de licenciatura sin publicar. Departamento de maquinaria agrícola. UAAAN Buena vista, Saltillo; Coahuila, México.

- ✓ JAMES, W.H. An economical penetrometer for high strength soil. Joint Conf. Land Reclamation Association and the Soil and Water Conservation Society. Alberta. Canadá.1989. 30 p.

- ✓ Gallegos Ramírez José Manuel (2004) Diseño y Evaluación de un Software Para Micro controladores PIC, para la digitalización de la señal de un Penetrómetro.

- ✓ Hinojosa García Manuel (2003) Desarrollo de un transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales en tractores categoría II Basado en el diseño Octagonal extendido. Tesis de licenciatura sin publicar. Departamento de maquinaria agrícola. UAAAN. Buenavista, Saltillo; Coahuila, México.

- ✓ Campos, M. S.; Aragón, R. A.; Cadena, Z. 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 2000.
- ✓ Mello y Magalhães P.S.G (1995) Evaluación de Implementos de Labranza a Diferentes Velocidades de Operación y Contenidos de Agua del Suelo. www.scielo.cl/scielo.php?pid=S036528072007000100007&script=sci_arttext - 46k

- ✓ Magalhães, P.S.G., e W.R. Souza. 1990. Subsólador: Influencia de parámetros geométricos no mecanismo de forças. 2:1033. XIX Congresos Brasileiro de Engenharia Agrícola, Piracicaba, São Paulo, Brasil, Julio de 1990. Sociedad Brasileira de Ingeniería Agrícola, Jaboticabal, Sao Paulo, Brasil

- ✓ Velázquez Roblero, Nelson. 2010, Equipo para la generación de mapas de índice de cono y resistencia al corte del suelo. Tesis; Ingeniero Mecánico Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). División de Ingeniería; Departamento de Maquinaria Agrícola. Saltillo, Coahuila, México.

- ✓ Jiménez Montejo, Maynor Federico. 2011, equipo para la generación de mapas de resistencia a la penetración y esfuerzo a la falla. Tesis; Ingeniero Mecánico Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). División de Ingeniería; Departamento de Maquinaria Agrícola. Saltillo, Coahuila, México.

VII. ANEXOS

Anexo 7.1 Detalles de calibración bajo condiciones de laboratorio del sensor Ring del Penetrometro.

CUADRO 7-1 Datos de calibración de fuerzas (N) en mili volts (mV) del sensor ring sometido a 3 diferentes fuerzas.

	DATOS	FUERZAS (N)		
1	500	30307	61918	93291
2	1100	30732	62188	101517
3	1900	30800	62696	93370
4	3000	35530	63279	95019
5	4500	35293	63247	95036
	DATOS	Fuerza 1 (mV)	Fuerza 2 (mV)	Fuerza 3 (mV)
1	500	2261	4529	6686
2	1100	2000	4118	6817
3	1900	2017	4212	6304
4	3000	2312	4232	6403
5	4500	2288	4233	6391

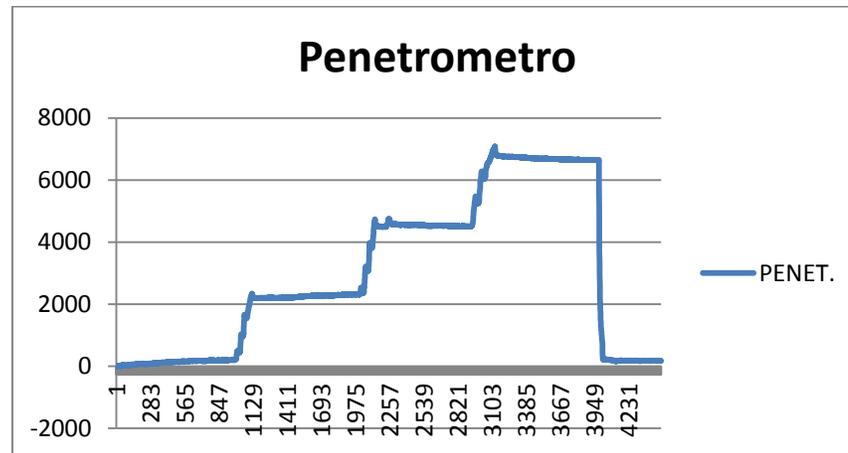


FIGURA 7-1. Calibración de fuerza del sensor ring con capacidad de 10 KN.

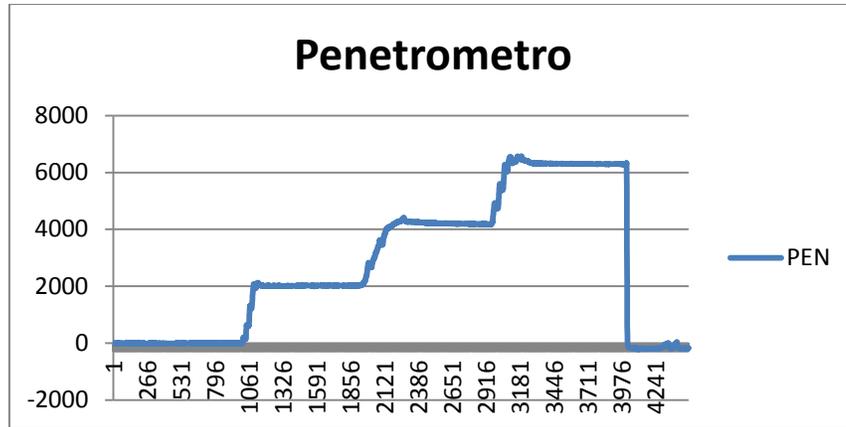


FIGURA 7-2. Calibración de fuerza del sensor ring con capacidad de 10 KN.

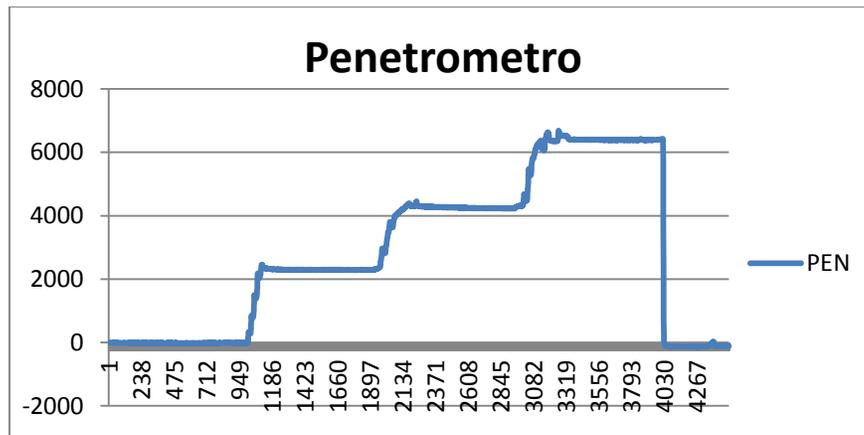


FIGURA 7-3. Calibración de fuerza del sensor ring con capacidad de 10 KN.

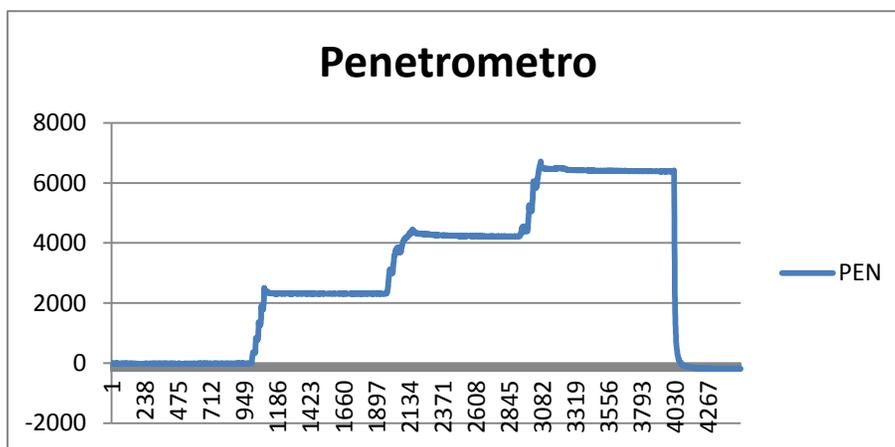


FIGURA 7-4. Calibración de fuerza del sensor ring con capacidad de 10 KN.

Anexo 7.2 Datos Obtenidos del Penetrómetro con el Sensor Ring en Pruebas de Campo.

CUADRO 7-2. Datos obtenidos de las pruebas en campo con el penetrómetro a cuatro diferentes profundidades 10, 20, 30 y 40 cm en mV en 25 puntos de referencia, del predio de una hectárea.

Punto de muestreo P00		
Profundidades cm	kPa	mV
10	1404	84
20	1958	210
30	2412	295
40	2655	282
Punto de muestreo P01		
Profundidades cm	kPa	mV
10	753	42
20	1303	157
30	2154	165
40	2664	377
Punto de muestreo P02		
Profundidades cm	kPa	mV
10	391	134
20	923	157
30	1779	132
40	2530	183
Punto de muestreo P03		
Profundidades cm	kPa	mV
10	565	42
20	1205	140
30	2175	165
40	3069	220
Punto de muestreo P04		
Profundidades cm	kPa	mV
10	545	89
20	1303	232
30	2038	229
40	3526	454
Punto de muestreo P10		
Profundidades cm	kPa	mV
10	709	105
20	1553	342
30	2315	171
40	3525	616

Punto de muestreo P11		
Profundidades cm	kPa	mV
10	506	89
20	1183	222
30	1712	246
40	2692	450
Punto de muestreo P12		
Profundidades cm	kPa	mV
10	1196	150
20	2131	273
30	2829	420
40	3312	260
Punto de muestreo P13		
Profundidades cm	kPa	mV
10	721	20
20	1394	190
30	1904	197
40	3056	233
Punto de muestreo P14		
Profundidades cm	kPa	mV
10	578	11
20	1231	144
30	1717	141
40	3164	164
Punto de muestreo P20		
Profundidades cm	kPa	mV
10	471	49
20	987	129
30	2302	415
40	3162	387
Punto de muestreo P21		
Profundidades cm	kPa	mV
10	561	42
20	1193	426
30	1865	525
40	2537	338
Punto de muestreo P22		
Profundidades cm	kPa	mV
10	518	39
20	1066	342
30	1589	455

40	2526	404
Punto de muestreo P23		
Profundidades cm	kPa	mV
10	527	33
20	1069	100
30	1966	514
40	2778	467
Punto de muestreo P24		
Profundidades cm	kPa	mV
10	511	114
20	1094	348
30	2178	512
40	2580	466
Punto de muestreo P30		
Profundidades cm	kPa	mV
10	485	25
20	1050	125
30	1694	123
40	2551	294
Punto de muestreo P31		
Profundidades cm	kPa	mV
10	422	80
20	950	163
30	1727	277
40	2458	384
Punto de muestreo P32		
Profundidades cm	kPa	mV
10	667	106
20	1252	156
30	1840	241
40	2457	295
Punto de muestreo P33		
Profundidades cm	kPa	mV
10	404	68
20	1004	118
30	1539	296
40	2398	370
Punto de muestreo P34		
Profundidades cm	kPa	mV
10	489	97
20	1092	121

30	1773	197
40	2296	228
Punto de muestreo P40		
Profundidades cm	kPa	mV
10	561	82
20	1316	151
30	1983	272
40	2792	219
Punto de muestreo P41		
Profundidades cm	kPa	mV
10	437	44
20	1020	176
30	1645	272
40	2296	272
Punto de muestreo P42		
Profundidades cm	kPa	mV
10	520	68
20	1230	357
30	1964	449
40	2657	439
Punto de muestreo P43		
Profundidades cm	kPa	mV
10	480	41
20	1141	227
30	1795	322
40	2238	298
Punto de muestreo P44		
Profundidades cm	kPa	mV
10	440	23
20	995	155
30	1646	233
40	2226	321

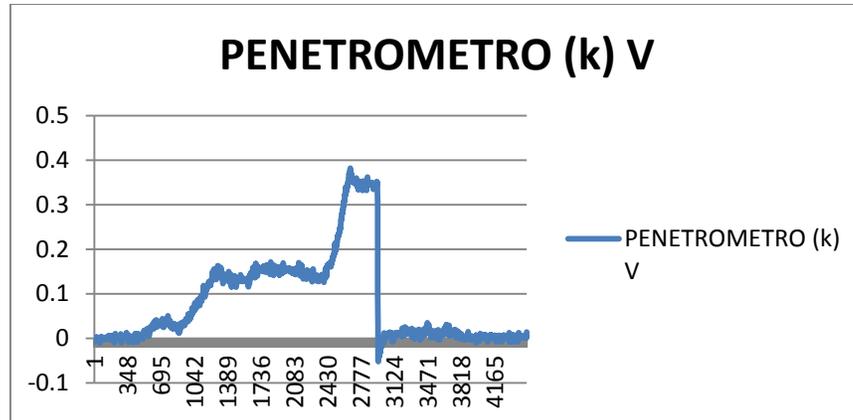


FIGURA 7-5. Graficas que muestran los resultados de las pruebas bajo condiciones de campo en cuatro diferentes profundidades 10, 20, 30 y 40 cm para determinar la resistencia a la penetración.

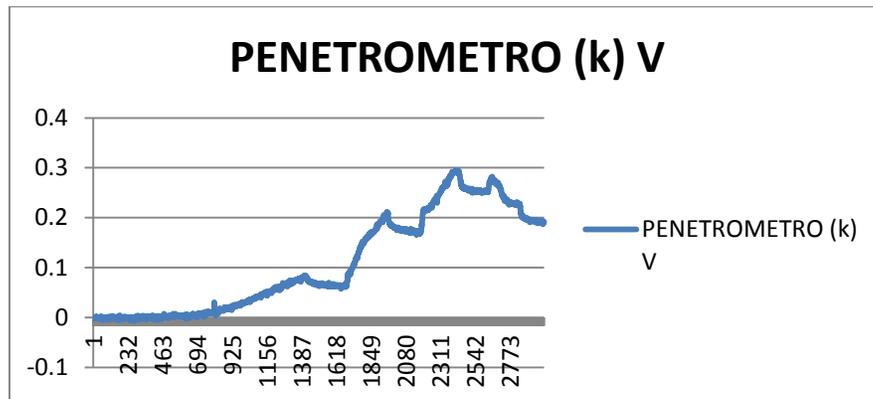


FIGURA 7-6. Graficas que muestran los resultados de las pruebas bajo condiciones de campo en cuatro diferentes profundidades 10, 20, 30 y 40 cm para determinar la resistencia a la penetración.

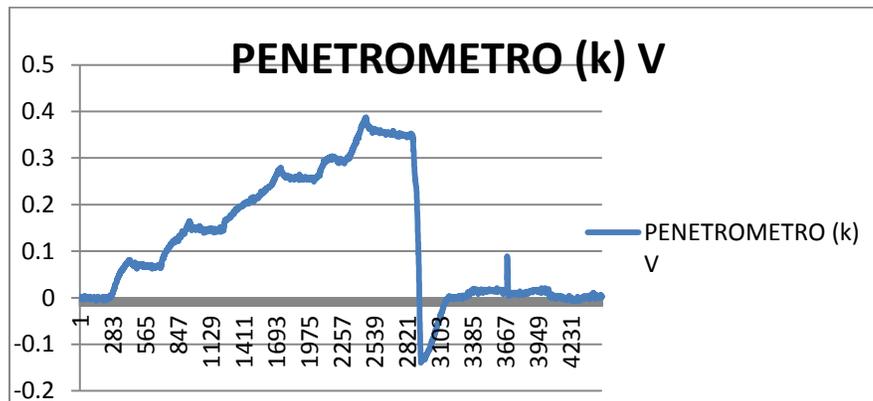


FIGURA 7-7. Graficas que muestran los resultados de las pruebas bajo condiciones de campo en cuatro diferentes profundidades 10, 20, 30 y 40 cm para determinar la resistencia a la penetración.

CUADRO 7-3 Se muestra la tabla de datos obtenidos en un predio de 100x100 m. de largo a las profundidades hasta de 10, 20, 30 y 40 cm. Estos son para determinar los gráficos a cuatro diferentes profundidades de las resistencias a la penetración generados con el programa GS+ a 10 niveles, empleando interpolaciones de 1 metro con el método de inverso de la distancia.

X	Y	Z1 (10 cm)	Z2 (20 cm)	Z3 (30 cm)	Z4 (40 cm)
80	0	1404	1958	2412	2655
80	20	753	1303	2154	2664
80	40	391	923	1779	2530
80	60	565	1205	2175	3069
80	80	545	1303	2038	3526
60	0	709	1553	2315	3525
60	20	506	1183	1712	2692
60	40	1196	2131	2829	3312
60	60	721	1394	1904	3056
60	80	578	1231	1717	3164
40	0	471	987	2302	3162
40	20	561	1193	1865	2537
40	40	518	1066	1589	2526
40	60	527	1069	1966	2778
40	80	511	1094	2178	2580
20	0	485	1050	1694	2551
20	20	422	950	1727	2458
20	40	667	1252	1840	2457
20	60	404	1004	1539	2398
20	80	489	1092	1773	2296
10	0	561	1316	1983	2792
10	20	437	1020	1645	2296
10	40	520	1230	1964	2657
10	60	480	1141	1795	2238
10	80	440	995	1646	2226

Anexo 7.3. Detalles de Cada Dato de Calibración bajo condiciones de laboratorio del Sensor de esfuerzo a la falla del suelo Con Diferentes Cargas a Diferentes Posiciones. Los datos de las graficas aparecen en la parte de resultados en el cuadro (4.3)

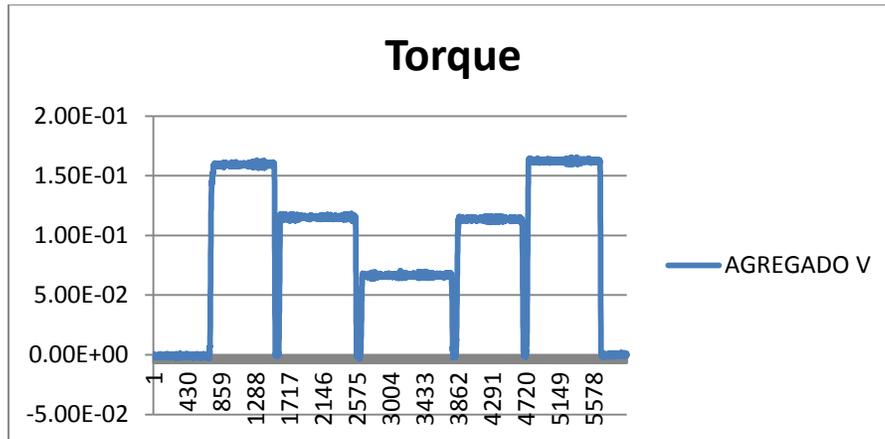


FIGURA 7-8. Calibración del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento de tres pesas de pesos diferentes de derecha-izquierda.

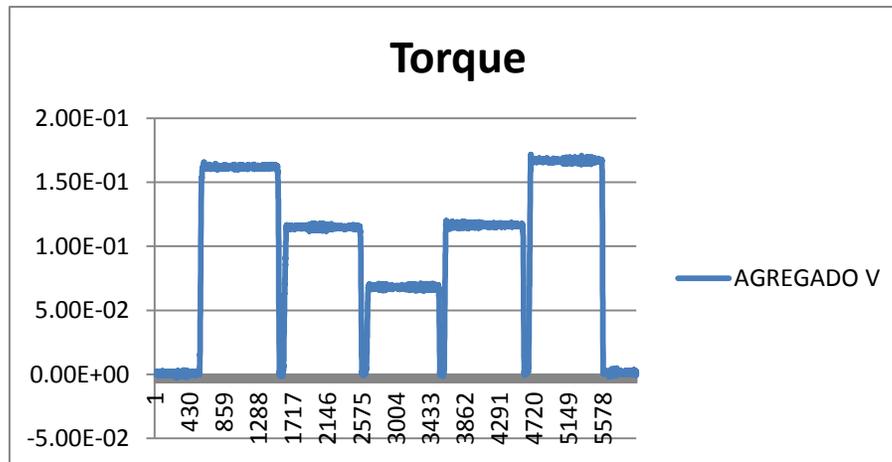


FIGURA 7-9. Calibración del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento de tres pesas de pesos diferentes de derecha-izquierda.

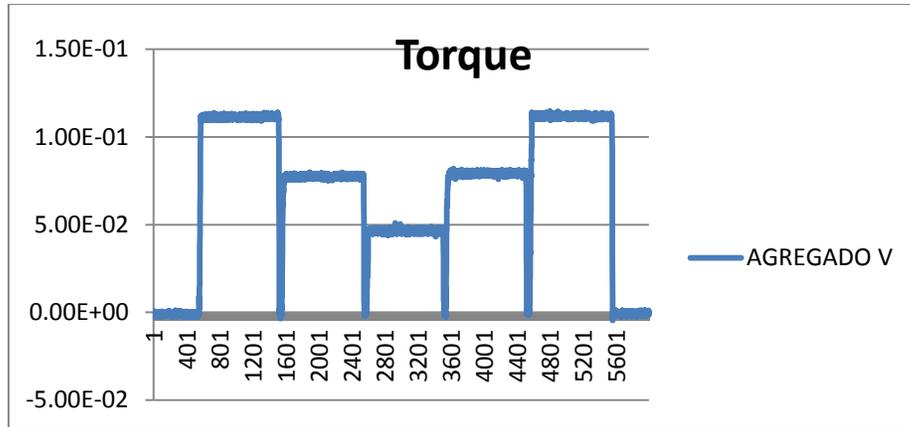


FIGURA 7-10. Calibración del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento de tres pesas de pesos diferentes de derecha-izquierda.

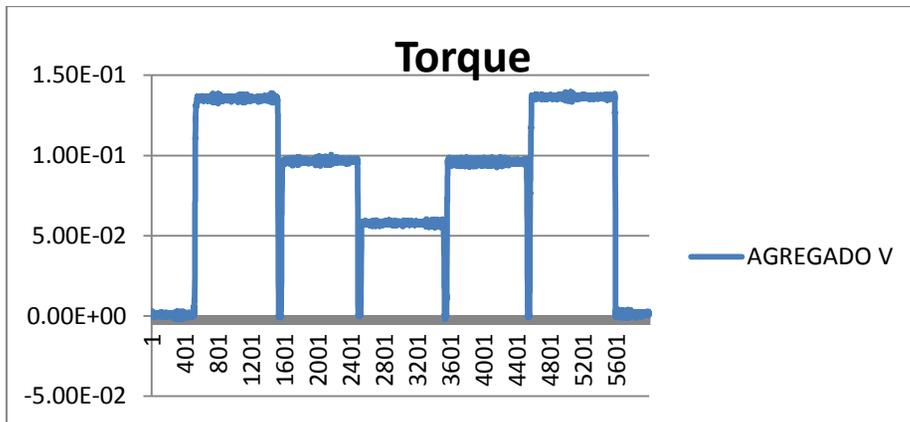


FIGURA 7-11. Calibración del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento de tres pesas de pesos diferentes de derecha-izquierda.

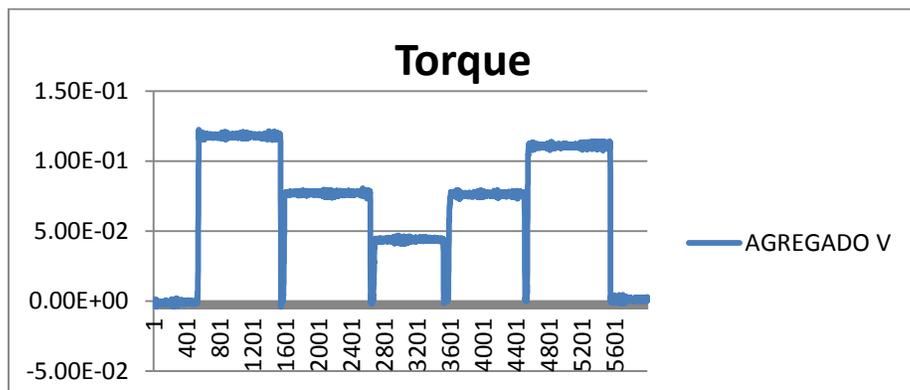


FIGURA 7-12. Calibración del sensor de cohesión con capacidad de 1.62 N-m a un desplazamiento de tres pesas de pesos diferentes de derecha-izquierda.

Anexo 7.4. Detalles de Cada Dato de pruebas bajo condiciones de campo del Sensor de esfuerzo a la falla del suelo.

CUADRO. 7-4 Datos de las pruebas del sensor esfuerzo a la falla del suelo bajo condiciones de campo

PUNTOS DE MUESTREOS	mv	TORQUE N.m	COHESIÓN kPa
T00	1453	10	267.07
T01	758	9	240.36
T02	683	5	133.53
T03	564	9	240.36
T04	660	5	133.53
T14	578	3	80.12
T13	637	3	80.12
T12	574	3	80.12
T11	784	6	160.24
T10	811	3	80.12
T20	656	3	80.12
T21	622	8	213.65
T22	788	3	80.12
T23	3460	4	106.82
T24	1661	2	53.41
T34	562	10	267.07
T33	482	6	160.24
T32	1152	3	80.12
T31	1106	10	267.07
T30	553	7	186.95
T40	829	4	106.82
T41	776	15	400.60
T42	1892	11	293.77
T43	862	20	534.14
T44	654	8	213.65

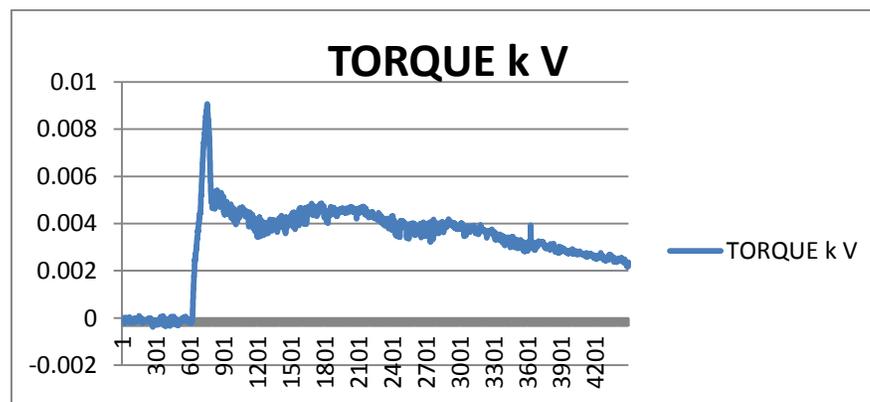


FIGURA 7-13. Grafica de los datos del resultado del sensor de torque con una capacidad de 1.62 N-m.

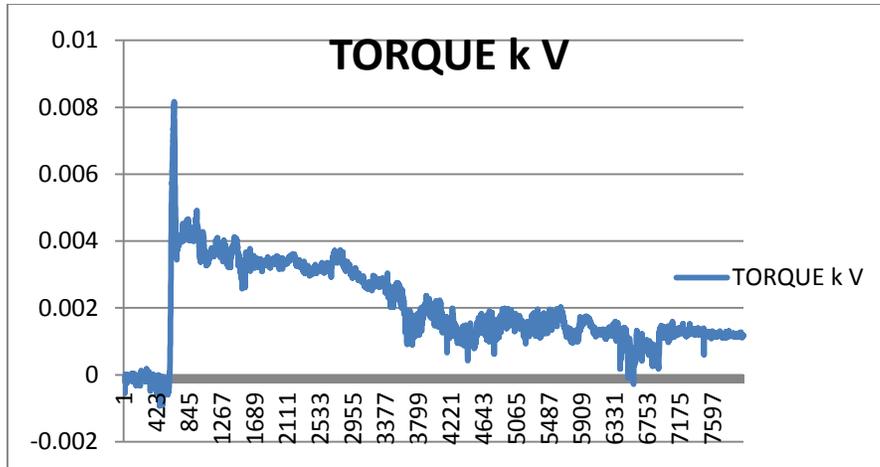


FIGURA 7-14. Grafica de los datos del resultado del sensor de torque con una capacidad de 1.62 N-m.

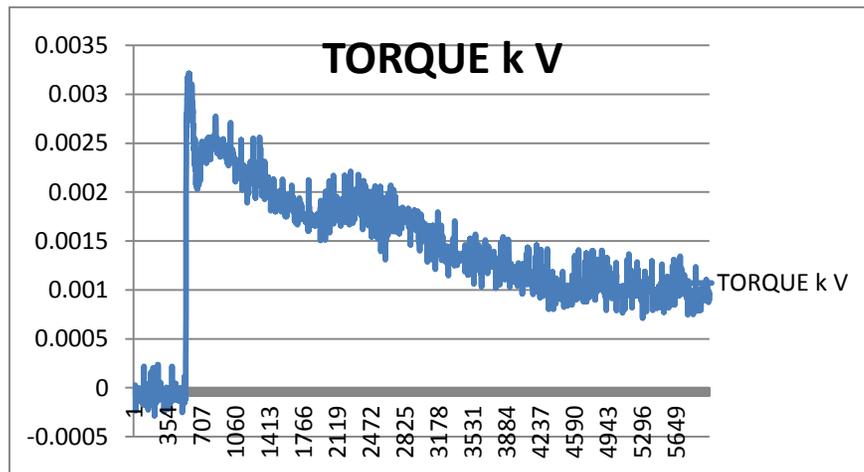


FIGURA 7-15. Grafica de los datos del resultado del sensor de torque con una capacidad de 1.62 N-m.

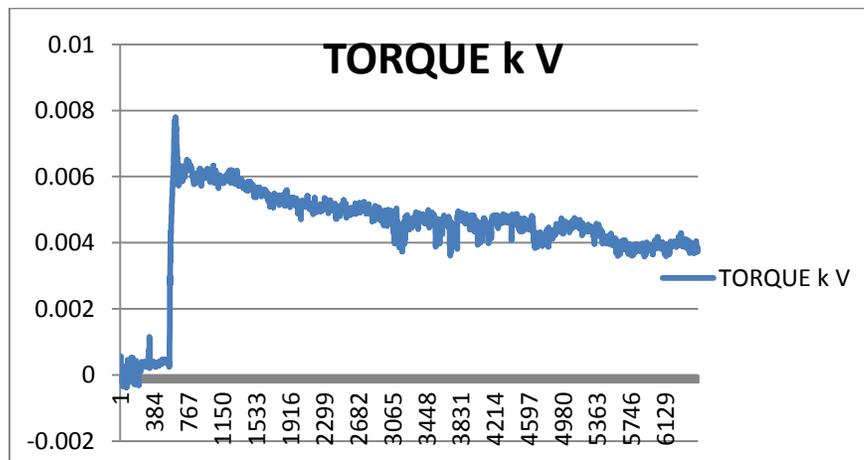


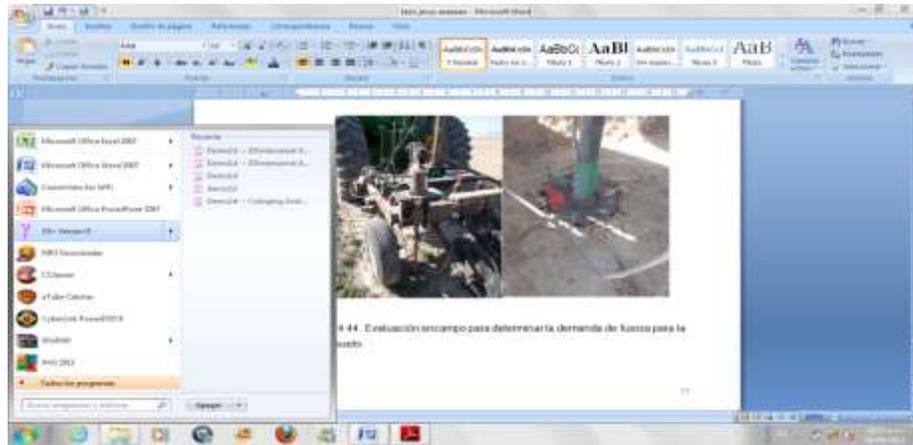
FIGURA 7-16. Grafica de los datos del resultado del sensor de torque con una capacidad de 1.62 N-m.

CUADRO. 7-4 Datos de las pruebas del sensor esfuerzo a la falla del suelo bajo condiciones de campo que se utilizaron para generar los mapas de prescripción.

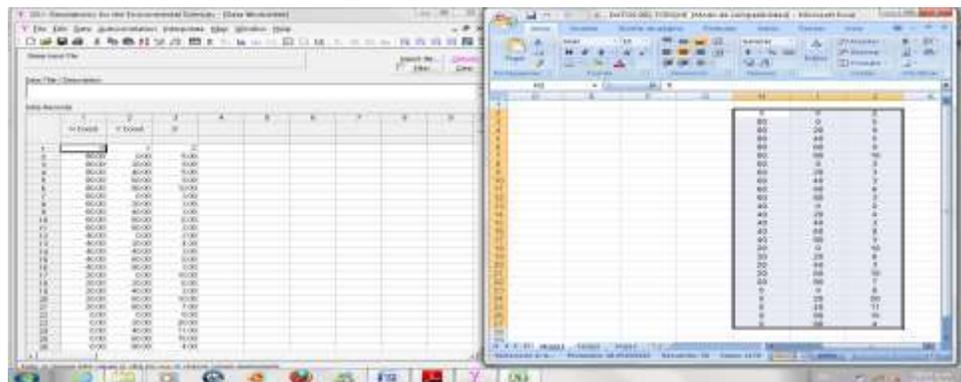
X(filas)	Y(distancia entre puntos)	Z (torque)
4	0	5
4	20	9
4	40	5
4	60	9
4	80	10
3	0	3
3	20	3
3	40	3
3	60	6
3	80	3
2	0	2
2	20	4
2	40	3
2	60	8
2	80	3
1	0	10
1	20	6
1	40	3
1	60	10
1	80	7
0	0	8
0	20	20
0	40	11
0	60	15
0	80	4

Anexo 7.5 Procedimiento para generar los mapas

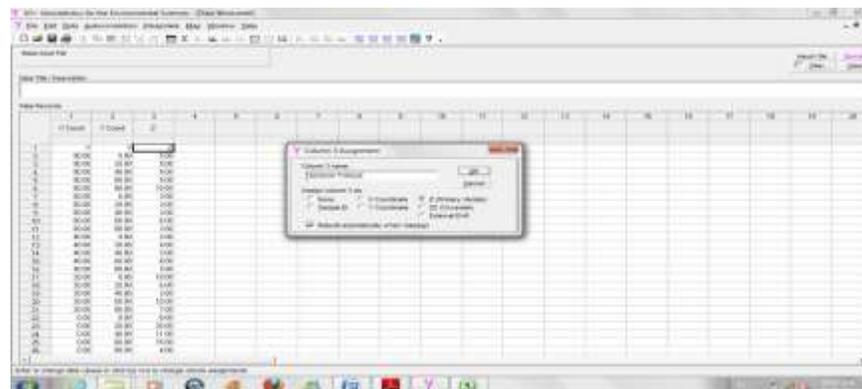
1. Abrir el programa GS+



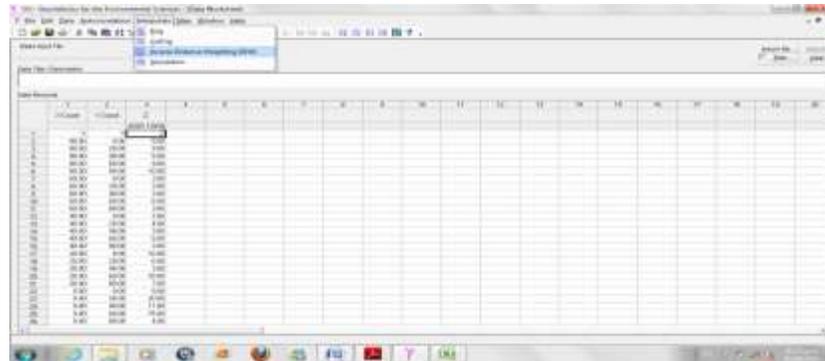
2. Copiar los datos de Excel a el programa GS+



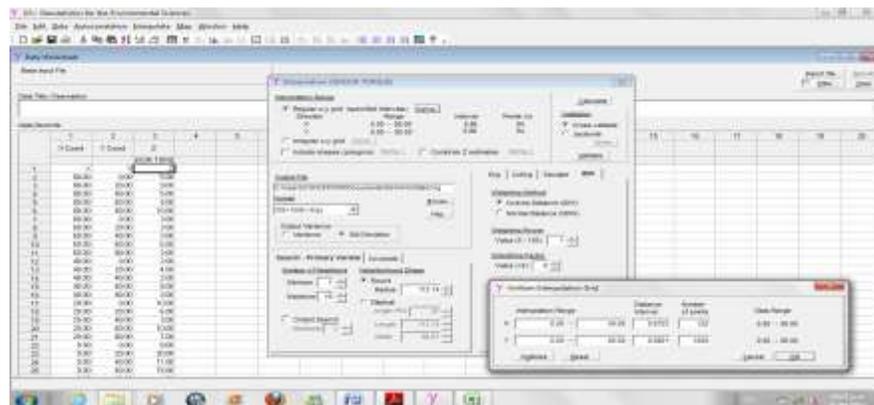
3. Una vez en "GS+" dar doble clic en la celda Z, cambiar a modo "z (primary variate)" y cambiar el nombre del archivo y dar clic en ok.



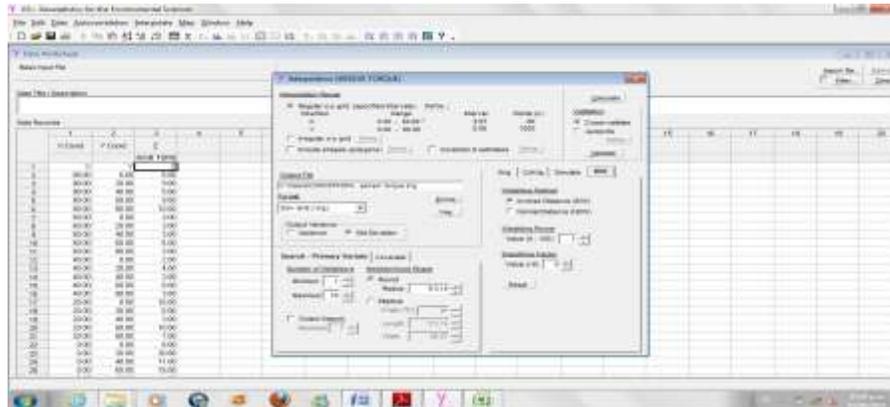
4. Dar clic en “INTERPOLATE” , seleccionar en “INVERSE DISTANCE WEIGHTING (IDW)”



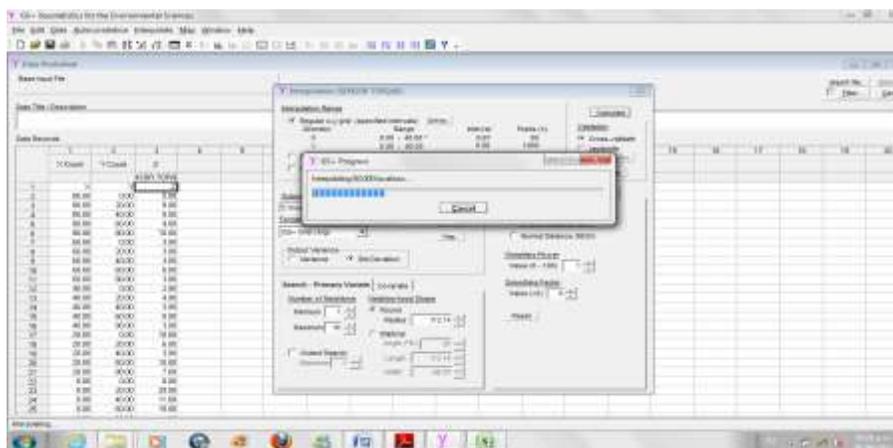
5. Se desplaza la ventana de interpolación z, dar clic en “DEFINE” desplazando otra ventana “UNIFORM INTERPOLATION GRID” y cambiar los numero de datos , para X=120, para y=1000 y dar “OK” el numero de datos puedes cambiar no es constante



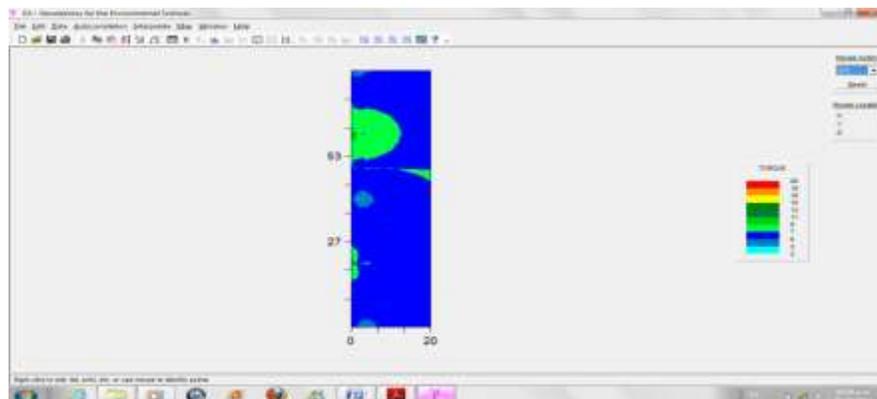
6.- El programa regresa al menú anterior de “INTERPOLATE” se le define nombre del archivo en “OUTPUT FILE”, dar clic en “IDW”, clic “CALCULATE”.



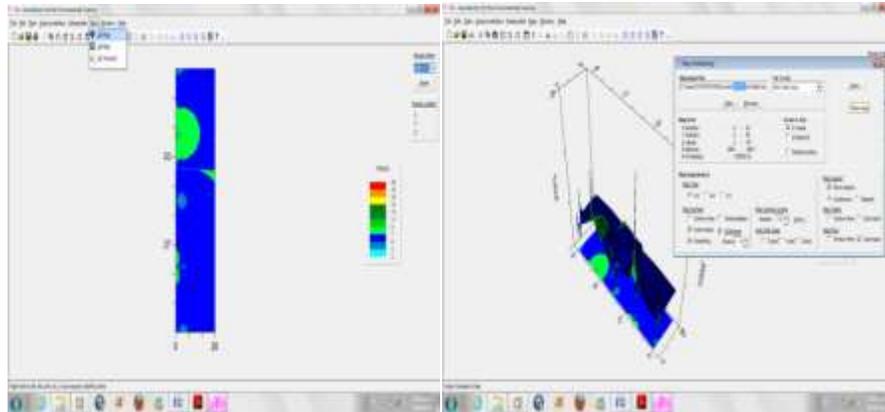
7.-Se cargan los cambios



8. Se despliega la ventana del mapa y se le da “MAXIMIZAR”



9. si se desea cambiar el mapa a 2D a 3D, se da clic en “MAP”, clic en “3D” y se desplaza otra ventana y dar en “DRAW”.



10.- se muestra el mapa, en 3d y con eso concluimos para la generación de mapas después de este paso se sierran las ventanas abiertas por este programa.

