

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**Generación de mapas de variabilidad en la impedancia
eléctrica del suelo para agricultura de precisión**

POR:

Gustavo Moreno Reyes

TESIS

**Presentada como requisito parcial para
obtener el título de:**

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

Generación de mapas de variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo para agricultura de precisión.

POR:

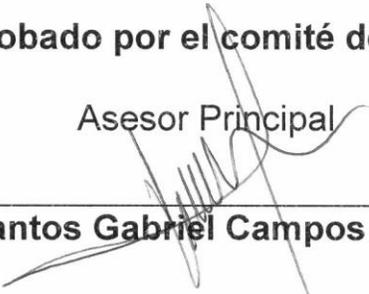
Gustavo Moreno Reyes
TESIS

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



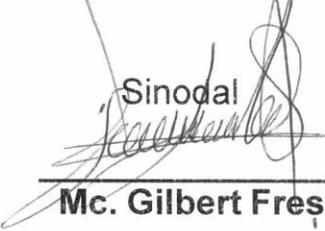
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal



Dr. Hugo Gutiérrez Flórez

Sinodal



Mc. Gilbert Fresh López López



Coordinador de la división de ingeniería



Dr. Luis Samaniego Moreno

Saltillo, Coahuila México, Mayo 2018

AGRADECIMIENTOS

A MI PADRE DIOS

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A MI ALMA TERRA MATER

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por brindarme la oportunidad de descubrir todo un mundo dentro de ella, compartiendo historias d vida, conociendo nuestras fuerzas y debilidades, por permitirnos conocer a muchas personas, por darnos cobijo, una formación y los conocimientos para afrontar esta vida y vivirla a plenitud.

A MI FAMILIA

No ha sido nada sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo e logrado concluir una metas mas. Les agradezco y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi hermosa familia.

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Por brindarme la confianza, apoyo, conocimientos y tiempo empleado de su parte para realizar este trabajo.

A MIS MAESTROS

Agradezco de todo corazón las enseñanzas brindadas por todos y cada uno de mis maestros a lo largo de estos años que estuve en la ingeniería. De todos me llevo algo muy especias y se que lo aprendido jamás lo olvidare.

A MIS AMIGOS

Gracias a todas aquellas personas que aparecieron para iluminar mi camino. Por los buenos o malos consejos, por tantos momentos inolvidables tanto felices como tristes, por compartir parte de su vida, molestias, logros y que me enseñaron el verdadero concepto de “amistad”.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Mis padres, quienes han sido la guía y el camino para poder llegar asta este punto de mi carrera. Que con su ejemplo dedicación y palabras de aliento nunca bajaron los brazos para que yo tampoco lo haga aún cuando todo se complicaba.

Los amo.

A MIS HERMANOS

A mis hermanos, que con su amor me han enseñado a salir adelante. Gracias por su paciencia, gracias por su preocupación de su hermano el mas pequeño. Gracias por compartir sus vidas, pero sobre todo, gracias por estar en otro momento tan importante en mi vida.

Lucia Ramírez Cuamatzi

A ti, gracias por permitirme formar parte de tu vida, gracias por tu amor, gracias por ser como eres, gracias por ser la mujer con los mejores sentimientos que he conocido, gracias por todo tu apoyo, por aguantarme, pero sobre todo gracias por enseñarme a creer en mi y motivarme hacer las cosas de la mejor manera.

Gracias por todo... te amo.

A la familia Moreno y Reyes que han formado parte de mi vida. Gracias por su constante apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	X
RESUMEN	XI
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general:.....	3
1.2 Objetivos específicos:	3
1.3 Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Agricultura de precisión.....	4
2.2 GPS Y SIG en la Agricultura de precisión.....	7
2.2.1 Sistemas de información geográfica.....	7
2.2.2 Sistemas de posicionamiento global.....	9
2.3 Parámetros físicos del suelo	10
2.3.1 Humedad del suelo.....	13
2.4 Calidad del suelo	13
2.5 Impedancia eléctrica	16
2.5.1 Cálculo dela impedancia eléctrica	16
2.6 Conductividad Eléctrica.....	17
2.7 Conductividad eléctrica de un suelo	19
2.8 Definición de resistividad eléctrica	20
2.9 Medida de la resistividad eléctrica del suelo.....	21
2.9.1 Método de Frank Wenner	21
2.9.2 Método de Schlumberger	22
2.10 Metodología para casos especiales de resistividad	23
2.10.1 Medida de resistividad sobre pavimentos o concreto	23

2.10.2	Medición de resistividad mediante muestras del suelo.....	24
2.11	Capacitancia y Capacitor	24
2.12	Sistemas de Adquisición de datos.	26
2.13	LogBook 360.....	26
2.14	Mapas de diagnostico	27
2.14.1	Mapas de conductividad eléctrica.....	27
2.14.2	Mapas de diagnóstico de suelo	28
2.15	Sensores en Agricultura de Precisión	30
2.15.1	Sensores eléctricos y electromagnéticos.....	31
2.15.2	Sensores de tratamientos en tiempo real	33
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1	Acondicionamiento del carro porta-sensores	35
3.2	Determinación de la conductividad eléctrica.....	36
3.3	Inversor.....	37
3.4	LogBook 360.....	38
3.5	Evaluación de tarjeta electrónica para determinar la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.	38
3.6	Acondicionamiento de tractor.....	39
3.7	Evaluación en campo.....	40
3.8	Generación de mapas.....	43
IV.	RESULTADOS	44
4.1	Resultados de pruebas realizadas en laboratorio para medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo	45
4.2	Resultados del acondicionamiento del equipo y carro porta sensores	47
4.3	Resultados de evaluación de niveles de profundidad	48
4.4	Resultados de evaluación del circuito electrónico bajo condiciones de campo	52

4.5	Resultado de pruebas realizadas en el campo para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.	53
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
5.1	Conclusiones	61
5.2	Recomendaciones	62
VI.	LITERATURA CITADA	63
VII.	ANEXO	71
7.1	Elaboración de mapas en el programa GS+	72
7.2	Secuencia del registro de datos en el sistema de adquisición de datos Log Book 360.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Agricultura de Precisión.....	5
Figura 2.2 Ciclo completo de la agricultura de precisión (Evadro. <i>et al.</i> 2014).....	6
Figura 2.3 Mapa vectorial vs raster	7
Figura 2.4 Sistema de información geográfica	8
Figura 2.5 Principales componentes de la calidad de suelo (Doran y Parkin, 1994)	15
Figura 2.6 Modelo eléctrico del suelo	16
Figura 2.7 Diagrama para la determinación de la resistividad eléctrica.....	20
Figura 2.8 Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo.....	21
Cancha Q.R.W, (2005).....	21
Figura 2.9 Método Schlumberger para medir la conductividad eléctrica del suelo (Cancha. Q.R.W. 2005).....	22
Figura 2.10 Primera prueba del desarrollo del circuito de un Conductivímetro,	23
Calderón Sáenz F, (2002)	23
Figura 2.11 Medida de resistividad del terreno mediante placas de cobre	23
Figura 2.12 Medición de resistividad mediante muestras de suelo	24
Figura 2.13 Capacitor de placas.....	25
Figura 2.14 Sistema de adquisición de datos Logbook	27
Figura 2.15 Mapa ArcView 3.2 interpolación (Salas, 2013).....	30
Figura 2.16 Disposición de los electrodos en equipos de muestra del suelo (a) ERDC3100 VERIS con configuración Wenner y (b) ARP GOECARTE	32
Figura 2.17 Mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) obtenido con un equipo EM38.....	33
Figura 2.18 Sensores	34
Figura 3.1 Carro con dos discos para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.....	35
Figura 3.2 Ajuste mecánico de los discos del carro porta sensores	36
Figura 3.3 Diagrama esquemático para medir variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.....	36
Figura 3.4 Inversor	37
Figura 3.5 Sistema de adquisición de datos LogBook 360.....	38
Figura 3.6 Probeta de tubo de PVC.....	39

Figura 3.7 Computadora para almacén de datos	39
Figura 3.8 Cable adaptado	40
Figura 3.9 AgGPS Trimble 132.....	40
Figura 3.10 Bajío campo experimental.	42
Figura 3.11 Software para mapas.	43
Figura 4.1 Circuitos electrónicos desarrollados para medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.	44
Figura 4.2 Equipo utilizado para la determinación de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.....	45
Figura 4.3 Probeta sin gramos de sal.....	46
Figura 4.6 Acondicionamiento de los discos en el carro porta sensores.	47
Figura 4.7 Aplicación de voltaje en discos.....	47
Figura 4.8 Ajuste general de discos.	48
Figura 4.9 Comportamiento de los discos con un nivel de 10 cm (A y B).....	50
Figura 4.10 Comportamiento de los discos con un nivel de 15 cm (C y D)	51
Figura 4.11 Equipo y carro porta sensores.....	53
Figura 4.12 Equipo utilizado para el almacenamiento de datos	53
Figura 4.13 Comportamiento a una distancia de 20 cm y 10 cm de profundidad.....	54
Figura 4.14 Mapa con una separación de 20 cm y 10 cm de profundidad.	54
Figura 4.15 Comportamiento a una distancia de 20 cm y profundidad de 10 cm.....	55
Figura 4.16 Mapa con una separación de 20 cm y una profundidad de 10 cm.	55
Figura 4.17 Comportamiento a una distancia de 25 cm y 10 cm de profundidad.....	56
Figura 4.18 Mapa con una separación 25 cm y 10 cm de profundidad.	56
Figura 4.19 Comportamiento a una distancia de 25 cm y una profundidad de 15 cm.	57
Figura 4.20 Mapa con un separación se 25 cm y una profundidad de 15 cm.	57
Figura 4.21 Comportamiento a una distancia de 30 cm y un profundidad de 10 cm.	58
Figura 4.22 Mapa con una separación de 30 cm y un profundidad de 10 cm.	58
Figura 4.23 Comportamiento a una distancia de 30 cm y una profundidad de 15 cm.	59
Figura 4.24 Mapa con una separación de 30 cm y una profundidad de 15 cm.	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 Indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para monitorear los cambios que ocurre en el suelo (Larson y Pierce. 1991; Doran y Parkin, 1994)	12
Cuadro 2.4 Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos, (Adamchuk, et. al. 2004).	31
Cuadro 3.1 Arreglo de recorridos	42
Cuadro 4.1 Resultados en volts con diferentes niveles de sal en laboratorio.....	45
Cuadro 4.2 Promedio de pruebas de laboratorio.....	46
Cuadro 4.3 Análisis de profundidad a 10 cm	49
Cuadro 4.4 Análisis de profundidad a 15 cm	50
Cuadro 4.5 Niveles de voltaje bajo condiciones de campo de 10 cm.....	52
Cuadro 4.6 Niveles de voltaje bajo condiciones de campo de 15 cm.....	52

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en “El Departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)”. Dentro de su objetivo se destaca el desarrollo de un circuito electrónico para la determinación de los mapas de diagnóstico del suelo para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo que existe mediante una medida de voltaje. Se llevó a cabo inicialmente bajo condiciones de laboratorio empleando probetas con un contenido de sal (NaCl) en una variación de peso en 0, 40 y 60 gramos y suelo. Los niveles de sal a ser evaluados se combinaron con un solo nivel de humedad que fue medido con un suelo en condiciones de campo. Una vez mejorado el circuito en condiciones de laboratorio, se evaluó en campo con la finalidad de verificar la continuidad en la conexión de los discos para que el registro de información pueda estar completa y detalladamente correcto, posteriormente poder realizar el registro de datos en una parcelas de 20 m de ancho por 50 m de largo. Empleando para esto un carro porta-sensores con dos electrodos y la adaptación del mismo en un sistema de amortiguamiento para poder tener un mejor control y un mayor rango de niveles de profundidad. En las pruebas que se realizaron en campo se observó que el mejor arreglo consiste en una separación de 30 cm y una profundidad de 10 cm entre los discos cuando son enterrados, ya que se tuvo una mayor estabilidad en la profundidad y una mayor variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo. En cambio cuando se tienen los discos a una distancia de 25 cm y 15 cm de profundidad, mostró una mayor variación en la profundidad y se registraron valores de cero de voltaje. Lo cual significo que produjo una discontinuidad entre el disco y el brazo que lo sujeta.

El registro de los datos se realizó con el sistema de adquisición Log Book 360. Para la georreferenciación se empleó el GPS Trimble 132. Finalmente se elaboraron los mapas de diagnóstico empleando inicialmente el programa QGIS 2.14.3 y después el GS+.

Palabras clave: *Mapas de variabilidad, conductividad eléctrica, agricultura de precisión*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de insumos y rendimientos en las producciones agrícolas está dada en una tendencia global de la agricultura de precisión. El manejo de algún sitio específico es para delimitar las áreas dentro de algún lote.

Un manejo de zona es la parte específica de un campo que expresa la combinación homogénea de los factores que limitan el rendimiento, en los cuales un porcentaje de algún insumo para un cultivo específico es apropiado. De modo que en las zonas que se manejan dentro de un campo pueden ser diferentes tanto los insumos como la delimitación en la aplicación para cada sitio. La forma de manejo de estas zonas por medio de un campo dependerá de una función de variabilidad natural dentro del campo, su tamaño y ciertos factores de manejo que puedan existir. Existen ciertas partes dentro de un campo que siempre producen por debajo de la línea de equilibrio, pueden ser aisladas para el desarrollo de un plan de manejo de sitio específico (Goddard, 1997).

La agricultura de precisión está basada en información de posicionamiento satelital; esto consiste en obtener datos georreferenciados de las áreas seleccionadas en los lotes o campos para un mejor conocimiento en la variabilidad del rendimiento de los cultivos en los diferentes sitios de muestreo. Estos sitios de muestreo pueden presentar diferentes tipos de variabilidad: topográficos, génesis del suelo, distintos tipos de manejo, etc. Mientras más se observen diferencias de potenciales de rendimiento que tengan esos sitios, va a existir una mayor posibilidad que la aplicación en las variables de los insumos (fertilizantes, semillas, agroquímicos, etc.) se pueda obtener un éxito mayor en los resultados de búsqueda. La aplicación variable de insumos constituye una de las herramientas de la Agricultura de Precisión. (Bongiovanni *et al.*, 2006).

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de los rendimientos de los cultivos ha sido reconocida desde los inicios de la agricultura. Una nueva tecnología, llamada Agricultura de Precisión (AP), permite medir y manejar la variabilidad espacial para aumentar la rentabilidad. (Ortega *et. al.*, 2007).

Mapear la conductividad eléctrica del suelo de cultivo es una herramienta de bajo costo y sumamente versátil. Sólo se hace una vez en la vida de la finca. Indica numerosos parámetros del suelo (entre otras cosas, espesor, contenido de materia orgánica y agua, capacidad de intercambio catiónico, niveles de salinidad, textura, y compactación). Existe una relación directa entre la conductividad eléctrica y los parámetros citados. El mapa de conductividad eléctrica sirve para zonificar los lotes de cultivo, dosificar semilla y nutrientes, y determinar cuáles porciones del lote demandan mayor irrigación. Los datos se pueden obtener con sencillos aparatos que recorren el campo tomando medidas. El trabajo puede hacerse a pie o desde un vehículo, dependiendo de la topografía y precisión requerida. Un receptor de GPS 3 permite ubicar los datos para producir mapas digitales. Más adelante, parámetros como tamaño del fruto o peso de cada racimo, también se pueden plasmar sobre un mapa. Las medidas de conductividad generalmente guardan relación directa con la productividad del suelo (Logemin S.A, 2008).

Actualmente en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro se encuentra en proceso la integración de maquinaria, equipos e instrumentos automatizados para docencia e investigación en mecanización para la agricultura de precisión (López, 2012). Por tal motivo; durante la convocatoria interna 2012, para proyectos de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, fue presentado y autorizado un proyecto de investigación denominado:

“DESARROLLO DE EQUIPOS, SENSORES E INSTRUMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y LABRANZA DE CONSERVACIÓN”.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la modificación mecánica del carro porta sensores y generación de mapas de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.

1.1 Objetivo general:

Desarrollar y evaluar un sistema de medición de variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo bajo condiciones de campo para agricultura de precisión

1.2 Objetivos específicos:

1. Construir y evaluar el circuito que permita medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo bajo condiciones de laboratorio y campo.
2. Acondicionar el carro porta sensores con 2 electrodos para la medición de humedad y conductividad eléctrica.
3. Generar mapas de variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo representados con un valor de voltaje en condiciones de campo.

1.3 Hipótesis

Mediante el desarrollo de un circuito electrónico y discos cortadores de residuos, actuando como electrodos, se puede determinar la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo representada con un valor de voltaje en condiciones de campo para agricultura de precisión.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agricultura de precisión

Bongiovanni *et al.*, (2006), mencionan que la agricultura de precisión está basada en la existencia de la variabilidad en campos, la cual ha requerido de tecnología tal como un sistema de posición global (GPS), sensores, satélites, e imágenes satelitales y sistema de información geográfica(SIG) para estimar y evaluar dichas variaciones. Menciona que los equipos geo-posicionadores están integrados de un sistema de navegación y orientación cuyo funcionamiento es la de procesar y recibir información, la cual proviene de los satélites ubicados a diferentes alturas sobre la superficie terrestre, cada satélite de GPS emite continuamente dos códigos.

La AP se define como un conjunto de técnicas que permite la gerencia localizada de cultivos, con el fin de reducir las ineficiencias en la producción agrícola y aumentando el retorno económico para el agricultor. Su principal característica está en la integración de varias tecnologías, tales como sistemas de posicionamiento, programas de bancos de datos geográficos y sensores. (Bullock., 2000)

Bolstad, (2005) Menciona que el sistema de información geográfica (GIS) está integrado por un hardware y un software los cuales capturan y almacenan manipulan, analizan y despliega información geográficamente referenciada.

Geremía y Cesari (2000) Se describe un sistema de monitoreo de la conductividad eléctrica denominado “soil doctor” que al principio fue utilizado para dirigir el manejo de nitrógeno solo en maíz elaborando los datos así obtenidos en combinación con una serie de parámetros prefijados en la configuración introducida al sistema por el operador, según la estrategia de aplicación o siembra que decida los datos pueden ser guardados en una tarjeta y ya después pueden ser relacionados con un GPS para

posteriormente mapear y así estudiar los lotes. El equipo está integrado por un sistema de Adquisición y procesamiento de datos y determinación de dosis.

Haynes, (2012), menciona que en general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones. Según la forma de llevar a cabo este transporte, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos. La conductividad eléctrica (CE) de una disolución puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio.

La aplicación de la AP Figura (2.1) busca reorganizar completamente el sistema agrario, dirigiéndolo hacia una agricultura de bajos insumos, alta eficiencia y sostenibilidad (Emiliano y Flego, 2014). Este cambio es posible gracias a la aparición de nuevas tecnologías, las cuales cuando se aplican conjuntamente, de forma coordinada, logran unos beneficios indudables. Estas técnicas incluyen el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), los Sistemas de Información Geográficos (SIG), la miniaturización de los componentes electrónicos de los ordenadores, el control automático y por control remoto de maquinaria.



Figura 2.1 Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión se concibió desde EE.UU., como un círculo que retroalimenta año a año y donde el único objetivo culminaba con la realización de dosis variable de insumo. O sea, que se incorporó la idea de utilizar la tecnología de información para adecuar el manejo de suelo y cultivos a la variabilidad natural y/o inducida presente dentro del lote. Dentro de esta tecnología se cuenta con herramientas claves dentro del sistema, como lo son GPS y la electrónica, medios para recopilar datos en tiempo real sobre lo sucede o sucedió en un cultivo.

Existen dos definiciones que hay que tener en cuenta para comprender el informe:

Gestión sitio-especifico de cultivos- Consiste en realizar la gestión correcta, en el lugar indicado y en el momento oportuno.

Agricultura de precisión- Consiste en automatizar la gestión sitio-especifico de cultivos usando las TICs (Tecnologías de la información y la comunicación) (Evadro. *et al*, 2017).

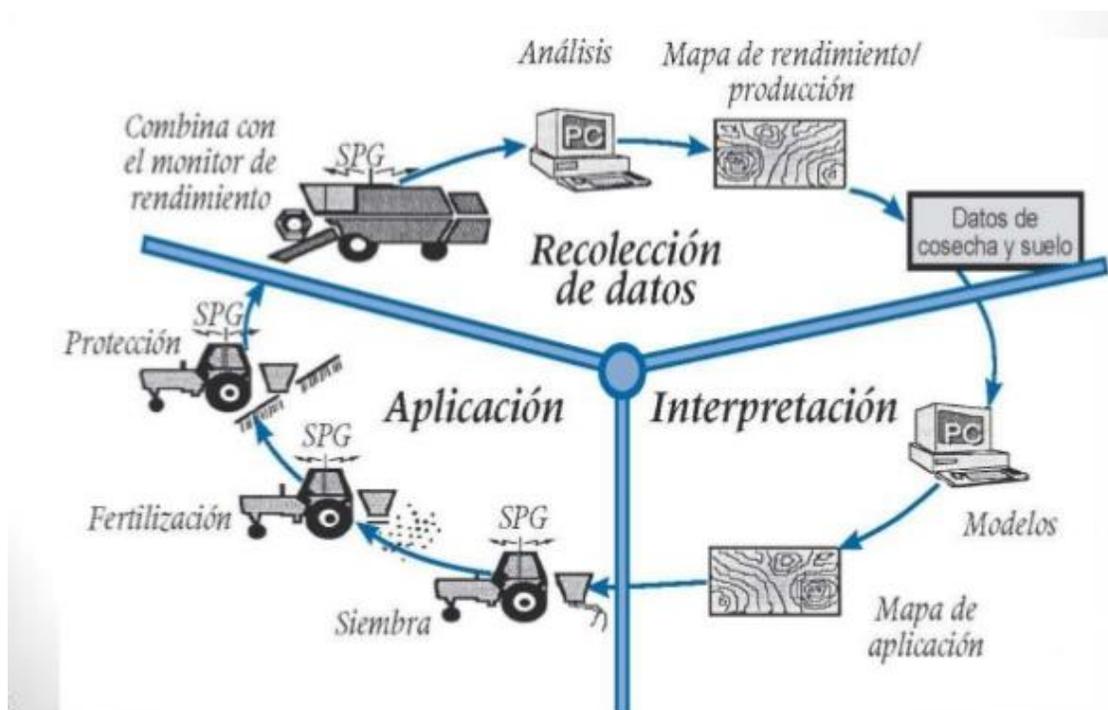


Figura 2.2 Ciclo completo de la agricultura de precisión (Evadro. *et al*. 2014)

2.2 GPS Y SIG en la Agricultura de precisión

2.2.1 Sistemas de información geográfica

Luzanía, (2005) describe que un sistema de información geográfica es una herramienta basada en computadora y utilizada para mapear y analizar eventos que ocurren en un área geográfica. La tecnología de estos sistemas integra operaciones de bases de datos, tales como consultas y análisis estadístico, con la visualización y el análisis geográfico que ofrecen los mapas; estas habilidades los distinguen de otros sistemas de información ya que se pueden explicar eventos y planear estrategias.

Geographic Information System (GIS) por sus siglas en ingles es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión.

Un Sistema de Información Geográfica (GIS) es en realidad un programa de ordenador pensado para almacenar, recuperar, analizar y mostrar datos cartográficos. En GIS, los datos acerca de la superficie de la Tierra no se representan como un dibujo, como sucede con los mapas convencionales, sino como información o datos. Estos datos de GIS contienen toda la información espacial de un mapa convencional, pero con la ventaja de ser mucho más flexibles a la hora de representarlos, permitiendo además la obtención de nuevos mapas a partir de datos ya existentes (García y Flego, 2014).

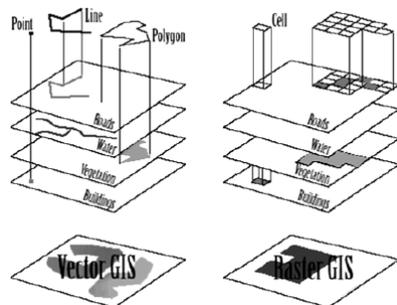


Figura 2.3 Mapa vectorial vs raster

El mayor logro de GIS es que todos los datos espaciales se almacenan de forma “restructured”, en una base de datos espacial. La propia estructura de esta base de datos determinará la sencillez en el manejo del programa.

GIS utiliza dos modos de representación de los datos: **modo vector** y **modo rastreo**. En el modo vector se considera que todas las características de la superficie de la tierra se pueden interpretar como un punto, línea o polígono. Cada característica almacenada en la base de datos de GIS debe estar especificada por su localización en la superficie de la tierra, y mantener relación espacial con el resto de características que le rodean. Este modo se prefiere en aplicaciones urbanas. El modo rastreo es el preferido a la hora de trabajar con imágenes digitalizadas, datos remotos y análisis estadístico. En este modo se almacenan los datos en celdas (o píxeles), determinados según una rejilla, generalizando así la localización de características a una matriz regular de celdas (Dávila, 2010).

Por otro lado, los datos en GIS suelen almacenarse en diferentes capas, cada una de las cuales tiene una característica topográfica particular. Es decir, habrá una capa para los ríos, otra para vegetación, para asentamientos humanos, facilitando el acceso a datos concretos. Aparte de los modos de almacenamiento de los datos, en GIS también puede incluirse información no espacial, relacionada con cada punto o zona del mapa.

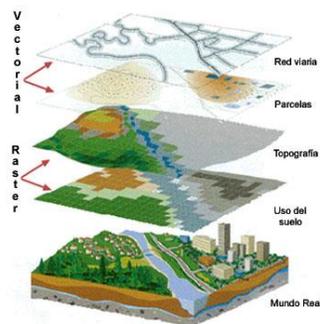


Figura 2.4 Sistema de información geográfica

Hasta ahora se ha mencionado el uso de GPS en la Agricultura, pero por sí solo no constituye a la agricultura de precisión. Se requiere de un sistema que permita el acceso a toda esa información recopilada de un modo organizado, el manejo de los datos y análisis de los mismos, facilitando su interpretación y la toma de decisiones. Aquí es donde cobra importancia el papel de GIS, debido a todas sus características previamente mencionadas. Así, a medida que la agricultura de precisión se expande, GIS se expande con ella, como se observa en las figuras 2.3 y 2.4 (Lobo-guerrero, y Geólogo 2001).

2.2.2 Sistemas de posicionamiento global

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un servicio propiedad de los EE.UU. que proporciona a los usuarios información sobre posicionamiento, navegación y cronometría. Este sistema está constituido por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario. La Fuerza Aérea de los Estados Unidos desarrolla, mantiene y opera los segmentos espacial y de control (López 2015).

Segmento espacial GPS consta de una constelación de satélites que transmiten señales de radio a los usuarios. Los Estados Unidos se compromete a mantener la disponibilidad de al menos 24 satélites GPS operativos, el 95 % del tiempo. Para garantizar este compromiso, la Fuerza Aérea ha estado volando 31 satélites GPS operativos durante los últimos años

Segmento de control del GPS consiste en una red global de instalaciones en tierra que realizan un seguimiento de los satélites GPS, monitorear sus transmisiones, realizar análisis, y enviar comandos y datos a la constelación.

El segmento actual de control operacional incluye una estación de control principal, una estación de control maestro suplente, 12 de mando y control de antenas, y 16 sitios de monitoreo (García y Flego, 2014).

2.3 Parámetros físicos del suelo

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

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar fácilmente (Singer y Ewing, 2000). Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo Cuadro (2.1) son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros.

La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad.

Los indicadores químicos mostrados en el Cuadro (2.1) se refieren a condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y microorganismos.

Algunos indicadores son la disponibilidad de nutrimentos, carbono orgánico total, carbono orgánico lábil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de absorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno mineralizable.

En virtud de que existen muchas propiedades alternativas para evaluar la calidad del suelo, Larson y Pierce (1991); Doran y Parkin (1994) plantearon un conjunto mínimo de propiedades del suelo para ser usadas como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo Cuadro (2.1).

Cuadro 2.1 Indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo (Larson y Pierce. 1991; Doran y Parkin, 1994)

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparación para evaluación
Físicas		
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo	%de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión	Cm o m
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad	Minutos/2.5 cm de agua y g/cm ³
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica	% (cm ³ /cm ³), de humedad aprovechable/30 cm; intensidad de precipitación
Químicas		
Materia orgánica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión	Kg de C o N ha ⁻¹
pH	Define la actividad química y biológica	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana	dSm ⁻¹ ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
P, N y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida de potencia de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental	Kg ha ⁻¹ ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
Biológicos		
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	Kg de N o C ha ⁻¹ relativo al C y N total o CO ₂ producidos
Respiración, contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa	Kg de C ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C contra entrada al reservorio total de C
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N	Kg de N ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo al contenido de C y N total

2.3.1 Humedad del suelo

Por definición, el calor específico del agua es de una caloría por gramo, o por centímetro cúbico; es sensiblemente 5 veces más elevado que la media del calor específico de los constituyentes del suelo. Así, el agua se calienta mucho más lentamente que el suelo, y éste se calienta mucho más lentamente cuanto más húmedo es. Por otra parte en las capas superficiales, una parte del calor recibida por el suelo se utiliza en evaporar el agua. Pero por otra parte, la conductividad para el calor, es mayor que la del aire y el calor tiende a transmitir mejor si, en los poros del suelo, la proporción de agua es mayor que la de aire. Se notará en fin, que todo cambio de estado del agua del suelo —condensación, vaporización, solidificación, fusión— repercute sobre la temperatura del suelo y amortigua la amplitud de sus oscilaciones. De este modo, en el calentamiento del suelo, la humedad juega un papel más determinante que la textura. (Álvarez y Velozo 1974).

De todos modos, los efectos de los dos factores se suman en los suelos arenosos, que como se sabe; tienen la capacidad de retención más baja. También se comprenderá cómo al reducir la humedad de las tierras, el drenaje les permite calentarse más rápidamente en primavera y asegura así un mejor despertar de la vegetación.

2.4 Calidad del suelo

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 (Romig et al., 1995).

La preocupación por la calidad del suelo no es nueva (Lowdermilk, 1953; Doran et al., 1996; Karlen et al., 1997; Singer y Ewing, 2000). En el pasado, este concepto fue

equiparado con el de productividad agrícola por la poca diferenciación que se hacía entre tierras y suelo. Tierras de buena calidad eran aquéllas que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión. Para clasificarlas se generaron sistemas basados en esas ideas (Doran y Parkin, 1994). Esos incluían términos como tierras agrícolas de primera calidad. El concepto de calidad del suelo ha estado asociado con el de sostenibilidad, pero éste último tiene varias acepciones. Para Buol (1995), el uso del suelo se debe basar en la capacidad de éste para proporcionar elementos esenciales, pues éstos son finitos y limitan, por ende, la productividad. La calidad del suelo, ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en la década anterior (Bautista et al., 2004). Este concepto ha sido relacionado con la capacidad del suelo para funcionar. Incluye atributos como fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental. Simultáneamente, calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso. A pesar de su importancia, la ciencia del suelo no ha avanzado lo suficiente para definir claramente lo que se entiende por calidad.

El término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo: (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997) (Figura. 2.5). Al desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el substrato básico para las plantas; capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo (Buol, 1995). En consecuencia, este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa (Astier et al., 2002).

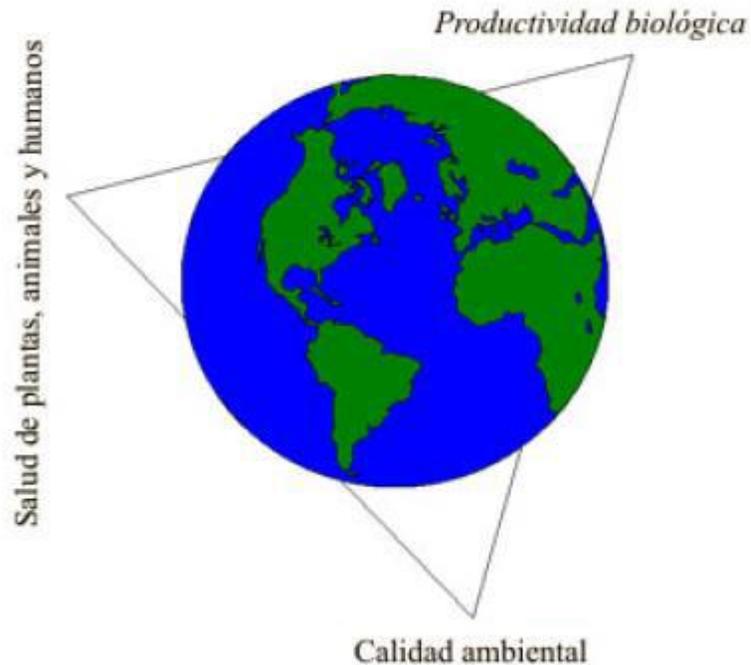


Figura 2.5 Principales componentes de la calidad de suelo (Doran y Parkin, 1994)

Para Gregorich *et al.* (1994) la calidad de suelo es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico. Arshad y Coen (1992) le dieron a este concepto una connotación más ecológica; la definieron como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano.

Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico, pero este concepto continúa evolucionando (Singer y Ewing, 2000). Estas definiciones fueron sintetizadas por el comité para la salud del suelo de la Soil Science Society of America (Navarrete *et al.*, 2011) como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

2.5 Impedancia eléctrica

Cuando se cuenta con un circuito compuesto de resistencias, condensadores y bobinas, por el cual circula una corriente alterna, surge una oposición al paso de dicha corriente denominada impedancia. Figura (2.6)

2.5.1 Cálculo de la impedancia eléctrica

La impedancia tiene unidades de Ohmios (Ohms). Y es la suma de una componente resistiva (debido a las resistencias) y una componente reactiva (debido a las bobinas y los condensadores)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

donde:

Z es la impedancia en Ω

R es la resistencia en Ω

X es la reactancia en Ω

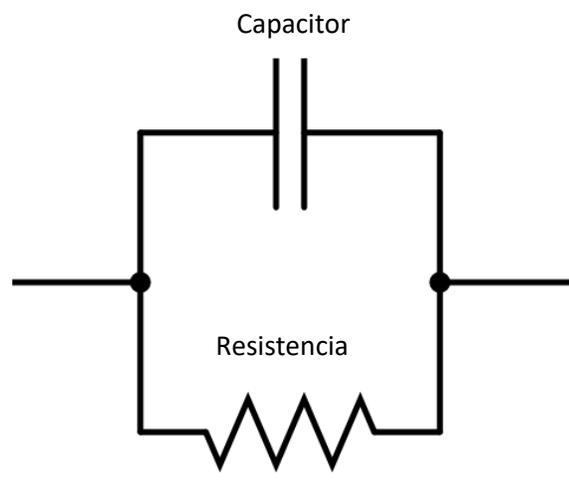


Figura 2.6 Modelo eléctrico del suelo

La impedancia También puede representarse como la suma de una parte real y una parte imaginaria:

$$Z=R+jX$$

R es la parte resistiva o real de la impedancia y X es la parte reactiva o imaginaria de la impedancia. Básicamente hay dos clases o tipos de reactancias: Reactancia inductiva XL: Debida a la existencia de inductores. Reactancia capacitiva XC: Debida a la existencia de capacitores.(EcuRed 2018)

2.6 Conductividad Eléctrica

Es una medida de la capacidad de toda la materia para transmitir una corriente eléctrica y es igual al recíproco de la resistividad de la materia. Dicha capacidad depende de la presencia de iones; de su concentración, movilidad y valencia, y de la temperatura ambiental. Las soluciones de la mayoría de los compuestos inorgánicos (ej. aniones de cloruro, nitrato, sulfato y fosfato) son relativamente buenos conductores. Por el contrario, moléculas de compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas (ej. aceites, fenoles, alcoholes y azúcares) son pobres conductores de una corriente eléctrica. (Wetzel y Likens, 1997.)

La conductividad es la medida total de sales, humedad y temperatura en una solución, que es el factor que influencia la habilidad de la planta para absorber agua. En aplicaciones agrícolas, el monitoreo de salinidad ayuda a manejar el efecto de sales solubles en el crecimiento de las plantas. La capacidad para transportar la electricidad es un indicador importante de calidad de agua, salinidad de suelo y concentración de fertilizante.

También puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio en el que éstos han de moverse. (Molina, 2012)

La CE del suelo es un valor que correlaciona con algunas propiedades del suelo que afectan la productividad de las cosechas, incluyendo textura, capacidad de intercambio catiónico, condiciones de drenaje, contenido de materia orgánica, salinidad, y características del subsuelo. La CE del suelo, con verificación de campo, puede asociarse con propiedades específicas del suelo que afectan el rendimiento de la cosecha, tales como espesor de capa de suelo, pH, concentración de sales, y capacidad para almacenar agua (Duran y Moratíel 2013)

En relación al desarrollo y perfeccionamiento de métodos para el sensoramiento de la conductividad eléctrica (CE) indican que por el método no invasivos de la CE del suelo constituye un tema de gran importancia en los esfuerzos que se realizan para la implementación de métodos de agricultura de precisión, la aplicación de un campo magnético al suelo ha sido empleado en el desarrollo de métodos y medios para el sensoramiento de la CE del suelo parámetros que correlaciona con la salinidad y otras propiedades del suelo. (Corwin y Rhoades, 1981).

La conductividad eléctrica de un perfil del suelo indica la profundidad de las capas que lo componen, su textura, el contenido de materia orgánica, contenido de agua, capacidad de intercambio iónico, y niveles de salinidad. Los datos se pueden obtener mientras un aparato medidor cruza el campo, en líneas espaciadas entre 20 y 30 metros, dependiendo de la variabilidad espacial y de la precisión requerida. Un medidor equipado con un receptor de GPS diferencial permite que los datos obtenidos sean referenciados espacialmente para producir mapas. Los mapas digitales son insumo para definir zonas de manejo y para guiar la futura aplicación eficiente de insumos agrícolas. (Luciana, 2011)

A través de la medición de ciertas características del suelo, como es el caso de la conductividad eléctrica (CE) y su posterior mapeo, se permite establecer la factibilidad, la viabilidad y el buen desarrollo de un producto en un suelo específico, ya que se considera un método rápido y económico de indicar su productividad. Además, la CE

se ve influenciada por el contenido de agua, el de arcilla y la presencia de iones intercambiables en el suelo (Corwin y Rhoades 1999), capaces de conducir la corriente eléctrica y que inciden en las características nutritivas del suelo. Estas propiedades están claramente asociadas con la salinidad del suelo y su estimación y predicción espacial representan un especial interés científico, para nuevas aplicaciones agrícolas o ambientales (Corwin, y Lesch, 2005.).

2.7 Conductividad eléctrica de un suelo

Cuando se habla de Conductividad Eléctrica de un suelo, usualmente se hace referencia a la conductividad eléctrica de su extracto de saturación. Y la conductividad eléctrica, como tal, es determinada en un medio líquido. Se supone, aunque esto aún no ha sido demostrado, que dicha conductividad corresponde a la Conductividad Eléctrica del líquido intersticial del suelo. Esta última aseveración adolece de una falla. Para determinar la Conductividad Eléctrica de un Suelo es necesario agregarle más agua y esta última contribuye a diluir el contenido de sales de la solución intersticial, rebajando su conductividad original (Maria, 2013).

El valor de la Conductividad Eléctrica en el extracto de equilibrio a capacidad de campo puede ser mayor o menor que el del extracto de saturación, dependiendo de qué tan saturado de sales está el interior de los terrones del suelo. Este tipo de extracto al igual que el obtenido mediante el uso de sondas de succión tiende a reflejar más el contenido de sales externo a los terrones del suelo mientras que el extracto de saturación incorpora, promedia y homogeniza la totalidad del suelo. Cuando un suelo es “nuevo” y se empieza a fertilizar, el interior de los terrones, siempre es más pobre en nutrientes y por ende más baja su conductividad que la de la solución nutritiva que se está aplicando. Con el paso del tiempo, el suelo se va saturando de nutrientes y el interior de los terrones empieza a ser más rico que el exterior. Estas diferencias hacen que la interpretación de un extracto de Saturación a Capacidad de campo deba ser realizada cuidadosamente teniendo en cuenta estos factores (Calderón, 2001).

2.8 Definición de resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad (σ) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo está determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección "s" y longitud "l", la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

A partir de la ecuación se puede despejar la resistividad, quedando la ecuación como:

$$\rho = \frac{R * s}{l}$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega\cdot m$) u ohm por centímetro ($\Omega\cdot cm$).

La Figura (2.6) ilustra un esquema para la determinación de la resistividad eléctrica de una muestra de material cuyas dimensiones son 1 m de lado por 1 m de profundidad.

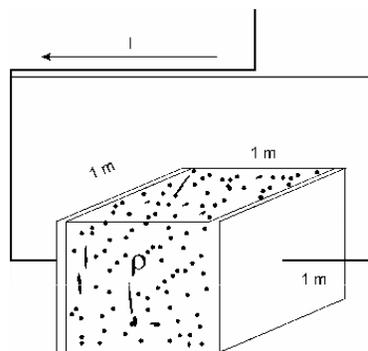


Figura 2.7 Diagrama para la determinación de la resistividad eléctrica

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor variación para diversos materiales y por supuesto para los suelos. Su valor depende de diversos factores como: temperatura, humedad o presión, relación de vacíos, peso volumétrico, etc.(Pérez et al. 2010)

2.9 Medida de la resistividad eléctrica del suelo

2.9.1 Método de Frank Wenner

Este método, se basa en la aplicación del principio de caída potencial, donde se toman cuatro electrodos (A, P1, P2, B), ubicados en una línea recta, separados a una distancia “a” entre ellos Figura. (2.6)

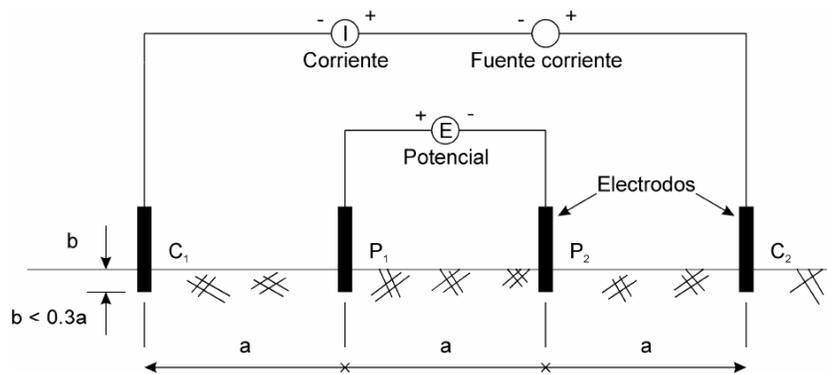


Figura 2.8 Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo.

Cancha Q.R.W, (2005)

Siendo su resistividad:

Ecuación
$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi \left\{ \frac{Va}{I} \right\}$$

2.9.2 Método de Schlumberger

En este método los cuatro electrodos se ubican en una línea recta y la distancia de los electrodos detectores de potencia P1 y P2 que permanecen fijos, es mucho menor que los electrodos inyectores de corriente A y B, que son los que se trasladan Figura. 2.7.

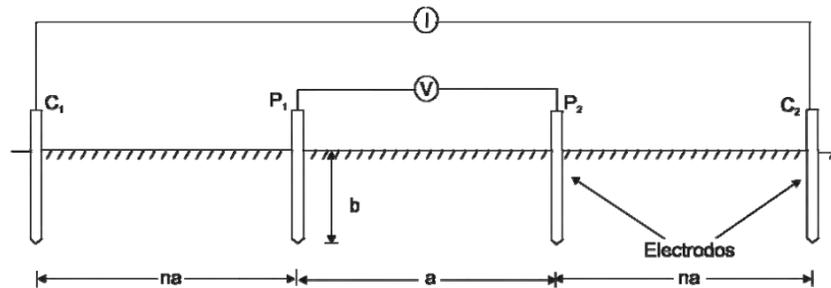


Figura 2.9 Método Schlumberger para medir la conductividad eléctrica del suelo (Cancha. Q.R.W. 2005)

Siendo su resistividad:

Ecuación
$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{b+a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 4\pi Rb \left\{ \frac{b+a}{a} \right\}$$

Calderón (2002) describe el proceso de la construcción de un Conductímetro para lo cual fue necesario una investigación previa con el fin de determinar la naturaleza de la variable a medir, con que se va a medir, donde se va a visualizar la medida, en que rango va a trabajar nuestro aparato y todas aquellas variables que van a afectar nuestro entorno de medición. Se debe luego establecer la idea de un circuito de medición y realizar las primeras verificaciones como se muestra en la figura. 2.8, Con el fin de comprobar la idea inicial.

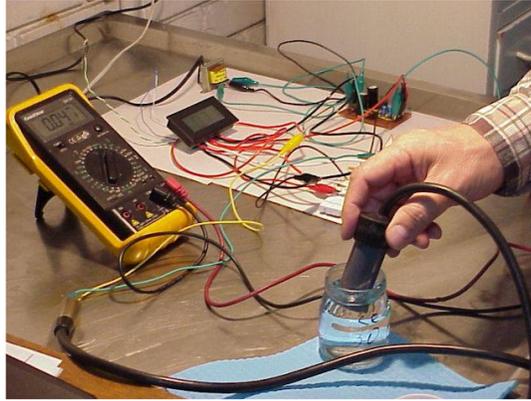


Figura 2.10 Primera prueba del desarrollo del circuito de un Conductivímetro,
Calderón Sáenz F, (2002)

2.10 Metodología para casos especiales de resistividad

2.10.1 Medida de resistividad sobre pavimentos o concreto

Algunas veces las mediciones de resistividad del suelo deben realizarse en suelos cubiertos por pavimentos, concreto o cemento y en los cuales se hace imposible hincar los electrodos tipo varilla (se debe tener cuidado con la presencia de elementos metálicos enterrados). En tales casos pueden usarse placas de cobre para reemplazar los electrodos auxiliares y agua para remojar el punto donde serán ubicadas, como se ilustra en la Figura (2.13), (ASTM D 363398)

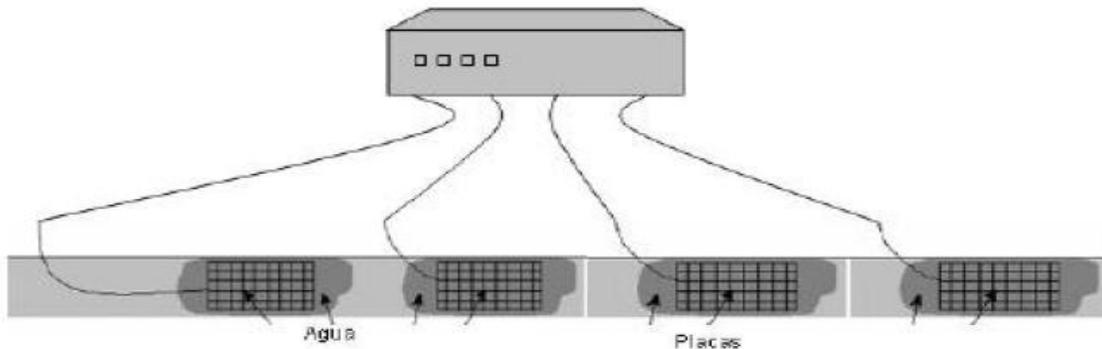


Figura 2.11 Medida de resistividad del terreno mediante placas de cobre

2.10.2 Medición de resistividad mediante muestras del suelo

Este método deberá utilizarse solo en casos donde las condiciones del sitio ya sea por espacio o difícil acceso, no permitan aplicar el método Wenner para caracterizar con más precisión la resistividad del terreno. El método consiste en recolectar una muestra representativa del área de interés o en su defecto, de un terreno aledaño con características similares al sitio cuya resistividad se desea conocer. Esta porción de suelo debe ser recogida a una cierta profundidad en donde el terreno quede más inmune a las variaciones de las condiciones ambientales procurando no alterar las condiciones ambientales, condiciones de compactación y sobre todo la humedad de la muestra. El proceso se basa en la medición de la resistencia de la muestra del suelo que llena un recipiente de dimensiones conocidas como lo ilustra la Figura 2.14. (ASTM G5795a) (Magan et al, 2002)

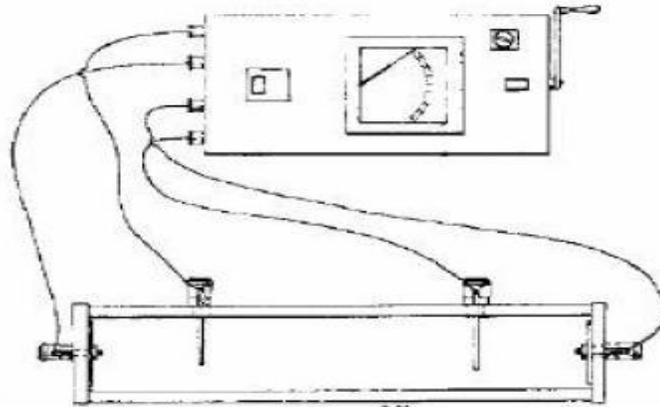


Figura 2.12 Medición de resistividad mediante muestras de suelo

2.11 Capacitancia y Capacitor

Llamamos **capacitancia** (C) a la capacidad que tiene un dispositivo (normalmente un conductor) para almacenar carga eléctrica. Matemáticamente, la capacitancia de un conductor se define como:

$$C = \frac{Q}{V}$$

donde:

C = capacitancia, medida en farad=coulomb/volt . El farad o faradio es la unidad del S.

F para la capacitancia, y su símbolo es: F.

Q = carga eléctrica del conductor, medida en coulomb (C).

V = potencial eléctrico al que se encuentra el conductor, medido en volt (V).

Un capacitor, también llamado condensador, es un dispositivo utilizado para almacenar carga eléctrica, y está formado, básicamente, por dos conductores cercanos entre sí, que tienen cargas iguales, pero de signo contrario. El caso más sencillo es el capacitor de placas planas paralelas idénticas, como se muestra en la siguiente figura (2.13) (Salazar 2010).

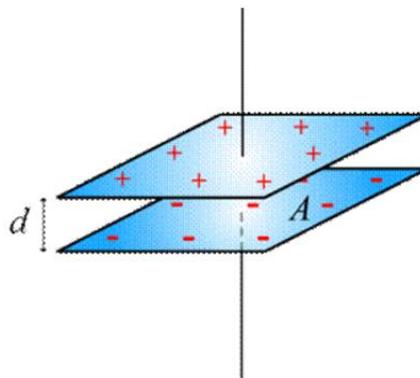


Figura 2.13 Capacitor de placas

A =área de cualquier placa del capacitor, medida en metros cuadrados (m^2).

d =separación entre las placas del capacitor, medida en metros (m).

+ y - = densidades superficiales de carga eléctrica en las superficies de área.

2.12 Sistemas de Adquisición de datos.

Ramírez, (2009). Explica que cuando se habla de un sistema de adquisición de datos, se pueden identificar cuatro partes o elementos principales: hardware, software, PC y sensores. Las características y funciones de cada uno de estos elementos determinan en gran parte el adecuado desempeño del sistema; la PC de contar con un buen procesador o suficiente memoria RAM para poder transferir y procesar continuamente los datos adquiridos, de lo contrario la velocidad máxima de lectura se limitaría. El software de aplicación debe ser poderoso para analizar y presentar la información correctamente al usuario, además debe ser flexible para evolucionar conforme cambien las necesidades de la aplicación, y finalmente la elección correcta de los sensores y del hardware para el acondicionamiento y conversión de señales es clave para obtener una lectura correcta de las señales.

También menciona de manera general algunas de las características y funciones más sobresalientes de sistema de adquisición de datos

- Especificaciones de las entradas analógicas
- Número de canales
- Velocidad máxima de muestreo
- Resolución de los datos
- Mecanismos de muestreo de las entradas analógicas
- El bus de comunicación con la PC
- El aislamiento eléctrico del dispositivo
- Software controlador o driver para comunicarse con el equipo

2.13 LogBook 360

El LogBook 360 Figura (2.15) es un dispositivo de adquisición de datos con diferentes entradas analógicas de medida, entradas de frecuencia, y entradas

digitales. El LogBook 360 está equipado con una función de señal que puede ser ampliada y mejorada con más de 40 canales.



Figura 2.14 Sistema de adquisición de datos Logbook

2.14 Mapas de diagnostico

2.14.1 Mapas de conductividad eléctrica

El mapeo de la conductividad eléctrica (CE) del suelo constituye una herramienta sencilla, económica, rápida y precisa que los agricultores de precisión pueden usar para caracterizar diferencias del suelo en sus campos de producción agrícola. Las medidas de conductividad generalmente se toman en cuadrículas igualmente espaciadas. Dicho espaciamiento debe adecuarse al tipo de cultivo, la topografía y las condiciones logísticas. (Adamchuk, et al.,2004)

Los mapas de CE del suelo por lo general corresponden visualmente con patrones de rendimiento de la cosecha y pueden ayudar a explicar variaciones del rendimiento. Los datos de CE también pueden correlacionarse con rendimiento, altura, población vegetal, hidrología de superficie, o datos obtenidos de sensores remotos con un sistema de información geográfica adecuado. Los mapas de CE de suelo también sirven en orientación de muestreo específico de suelos, asignación de tasas variables para insumos de cosecha, zonificación más detallada de mapas regionales de suelos, mejoramiento en la ubicación e interpretación de ensayos de campo en la finca, diagnóstico de salinidad, y planeación de drenaje de remediación. (Doerge *et. al.*, 2003)

Un mapa de la conductividad eléctrica del campo de cultivo brinda información considerable sobre la manera en que varía el perfil de suelo. Sorprende descubrir que hasta un lote plano posee variaciones. La profundidad de la capa orgánica puede cambiar en corta distancia. Entre las principales causas de variación se encuentran la influencia de erosión o depositación diferencial de materiales constituyentes. El mapeo de conductividad eléctrica y altimetría que realizamos con tecnología Veris y Raven permite identificar áreas con propiedades contrastantes de suelos. En suelos no salinos la conductividad eléctrica es una medición de la textura del suelo, siendo esta una propiedad relacionada íntimamente con la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico, factores clave de la productividad. (Laines, 2009)

2.14.2 Mapas de diagnóstico de suelo

El mapa de rendimiento produce información detallada de la productividad del campo y brinda un parámetro para diagnosticar y corregir las causas de bajos rendimientos en algunas áreas del campo y/o estudiar las causas por las cuales el rendimiento es más alto en algunas zonas. El sistema guarda registros de:

- Campo
- Variedades
- Descargas
- Tiempos

Un monitor de rendimiento es un sistema que recoge la información procedente de distintos sensores y gracias a un software calcula el rendimiento de un cultivo en el tiempo y en el espacio, basándose en la información de localización de cada parcela proporcionada por el sistema de localización por satélite GPS. El resultado se representa en un mapa gráfico (Evadro et al, 2017).

Las cartas de uso del suelo precisas y actualizadas a nivel estatal por una parte son un elemento primordial para la planeación del desarrollo agrícola, pecuario y forestal; por otra parte contribuyen a la toma de decisiones.

Mediante la integración de orto fotos digitales, mapa base, herramientas SIG y recorridos de campo es posible identificar y cuantificar las áreas con uso agrícola; sin embargo, la precisión y confiabilidad de sus resultados forman parte de un proceso gradual que se ve sujeto a la calidad de los insumos, herramientas y metodologías empleadas (Paredes *et al.*, 2011).

En los estudios sobre la cartografía del uso del suelo agrícola es importante tomar en cuenta que existe gran diferencia entre los términos cobertura del suelo y uso del suelo. Cobertura se refiere a los objetos que se encuentran sobre zonas específicas y su distribución, mientras que uso del suelo se refiere a las actividades sociales y económicas que se llevan a cabo dentro del territorio, con presencia de una cobertura específica de suelo (Francois *et al.*, 2008).

El trabajar con imágenes de escalas mayores nos lleva a considerar aspectos que tienen que ver con la resolución vectorial de los datos, estos corresponden a la resolución espacial de las orto fotos, (el tamaño promedio de los vectores, representa los rasgos de tipo línea y área). Es decir, se deben aprovechar por una parte el nivel de acercamiento, que permiten las orto fotos para digitalizar los datos con mayor nivel de detalle, por otra parte representar los datos en escalas mayores para hacer posible colocar información vectorial sobre las orto fotos y garantice su consistencia geométrica (Reyes 2009).

La agricultura de precisión (AP) la cual representa una alternativa de optimización mediante el uso de herramientas que permiten la obtención y análisis de datos georeferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos en tiempo real. Para la aplicación de esta tecnología se requiere de una fase de diagnóstico previo de rendimiento, combinado con muestreo de ambientes

a nivel de sitio 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.

Conforme a los resultados obtenidos en la prueba de campo se generó un mapa de diagnóstico y se hizo una interpolación en ArcView 3.2 donde se muestran los puntos de muestreo y los MPa que se registraron en cada punto de prueba, ver figura (4.18) (Salas, 2013).



Figura 2.15 Mapa ArcView 3.2 interpolación (Salas, 2013)

2.15 Sensores en Agricultura de Precisión

Los sensores son dispositivos utilizados para la medición de un estado, una condición (temperatura, humedad del aire, masa), flujo (de agua, aire, granos). Generan y envían tensión eléctrica al procesador. Están constituidos de:

- Suministro de energía

- Elemento sensor

- Emisor de señal

- (eventualmente) condicionamiento de señal.

Numerosos investigadores y fabricantes han desarrollado sensores “on-the-go” destinados a medir las propiedades del suelo mediante interacciones físicas con él mismo. Estos se pueden agrupar según su modo de interacción en: eléctricos y

electromagnéticos, ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos (Adamchuk *et. al.*, 2004). En la última década del siglo XX han proliferado distintos sensores eléctricos y electromagnéticos, ópticos, mecánicos, electro-químicos, acústicos y neumáticos, que pueden ser incorporados a vehículos móviles para la caracterización del suelo. La mayoría de ellos tiene como característica común su sensibilidad a más de un factor agronómico del suelo como se muestra en el Cuadro (2.4).

Cuadro 2.4 Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos, (Adamchuk, *et. al.* 2004).

	Textura	MO	Humedad	Salinidad	Compactación	LS	pH	N	CIC
Eléctricos y EM	X	X	X	X		X		X	X
Ópticos	X	X	X				X	X	
Mecánicos					X	X			
Electro-químicos				X		X	X		

MO=materia orgánica LS=labor de suelo CIC=Capacidad de intercambio catiónico

2.15.1 Sensores eléctricos y electromagnéticos

El parámetro eléctrico a determinar es la conductividad eléctrica aparente (Eca en inglés, -mSm-1-) que es un promedio de la circulación eléctrica por tres vías distintas: 1) la fase líquida del suelo que tiene nutrientes disueltos, 2) la fase sólido-líquida debida al intercambio de cationes asociado con arcillas y minerales, y 3) la fase sólida derivada del contacto físico entre partículas sólidas; una explicación detalla de la contribución de cada uno de estos factores a la Eca puede encontrarse en Corwin y Lesch (2005).

Existen tres grandes casas comerciales que comercializan equipos para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo: VERIS (3100), GEOCARTA

(ARP), y GEONICS (EM31 y EM38). Las dos primeras emplean métodos resistivos (ER) sobre la base de una medida directa (DC) de la conductividad eléctrica y precisan la introducción en el suelo de electrodos, tanto de corriente como de voltaje. En estos equipos, se denomina configuración Werner a aquella que emplea cuatro electrodos alineados y equi-espaciados Figura (2.17), en la que los electrodos externos realizan la función de transmisión de corriente mientras que los internos efectúan la determinación del potencial. En este caso la profundidad de penetración de la corriente y el volumen de suelo evaluado aumentan proporcionalmente con la distancia entre electrodos (a), y en el caso de un suelo homogéneo el volumen evaluado es aproximadamente πa^3 .

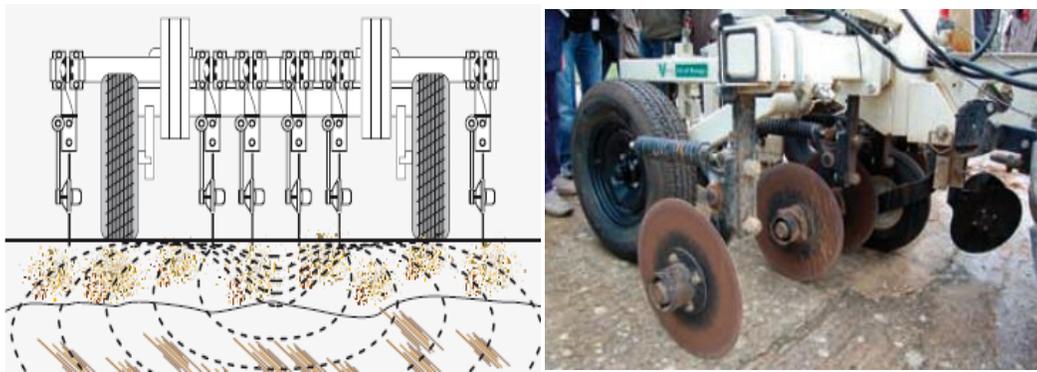


Figura 2.16 Disposición de los electrodos en equipos de muestra del suelo (a) ERDC3100 VERIS con configuración Wenner y (b) ARP GOECARTE

Los equipos comerciales basados en inducción electromagnética (EM) emplean corriente alterna que al circular por una bobina emisora generan un campo magnético en el suelo, que a su vez genera una corriente eléctrica en una bobina receptora Figura (2.17). La señal es posteriormente amplificada y acondicionada en voltaje, siendo proporcional al volumen de suelo evaluado y a la ECa del mismo. Recientemente, GEONICS ha introducido en el mercado un equipo dual (EM-38 dual-dipole) que dispone de una bobina horizontal y otra vertical que van alternando sus medidas cada varios segundos. Según Corwin y Lesch (2005), la relación de conductividades aparentes obtenidas con EMhorizontal y EMvertical refleja las propiedades de conductividad hidráulica del suelo, y permite evaluar la lixiviación de nutrientes. Según

estos mismos autores, la media geométrica en EMh y EMv está relacionada con las propiedades químicas de la fracción acuosa del suelo. La medida de ECa revela la heterogeneidad del suelo debida a variaciones de textura, salinidad, materia orgánica, contenido en agua, y profundidad de la capa de erosión de arcilla muestra un ejemplo de mapeado de la ECa.

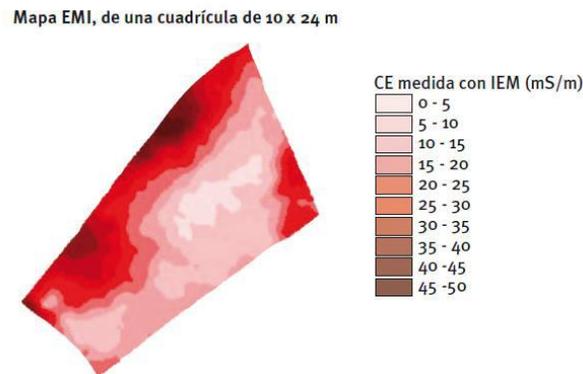


Figura 2.17 Mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) obtenido con un equipo EM38

2.15.2 Sensores de tratamientos en tiempo real

Se conoce como sensor cualquier dispositivo que permite convertir una magnitud física en una señal eléctrica que, posteriormente, puede manejarse para suministrar información o para ser tratada directamente por un ordenador.

Los sensores son los que servirán para determinar, en cada momento y posición de la máquina, su velocidad de avance, la temperatura en un determinado lugar, el estado de cualquiera de sus mecanismos, o también la cantidad de grano instantáneamente cosechado por la máquina, la fertilidad del suelo en una zona del campo, el nivel de vegetación del cultivo. Cualquier máquina agrícola, o para uso doméstico, incluye numerosos sensores que proporcionan información al usuario, dentro de sistemas para la medida electrónica de magnitudes mecánicas, figura (2.18).

Lo innovador en la Agricultura de Precisión es que se utilizan dispositivos que permiten determinar, en tiempo real, algunas de las características agronómicas de las micro-parcelas por las que se desplazan las máquinas sobre el campo (García y Flego 2014).

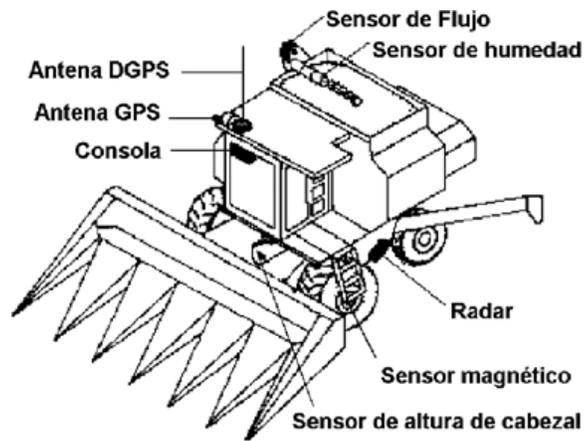


Figura 2.18 Sensores

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Acondicionamiento del carro porta-sensores

Para el acondicionamiento en el carro porta-sensores se emplearon 2 discos cortadores de residuos a una distancia de 20, 25 y 30 cm, (Figura 3.1), como electrodos, a los discos se les aplicó voltaje para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica en el suelo. Los discos se aislaron para evitar contacto con el bastidor y que pudiera afectar la medición del voltaje aplicado. Para aislarlos se realizaron bujes de nylamid en los ocho tornillos donde van sujetos al bastidor del carro y para las placas (figura 4.8), se cortó neopreno del mismo tamaño a las placas, se colocaron entre la barra del carro y la placa. Para asegurarse de que no haya discontinuidad entre el disco y cualquier otra parte del carro, se verificó con un multímetro para tener la confiabilidad de que existió dicha continuidad.

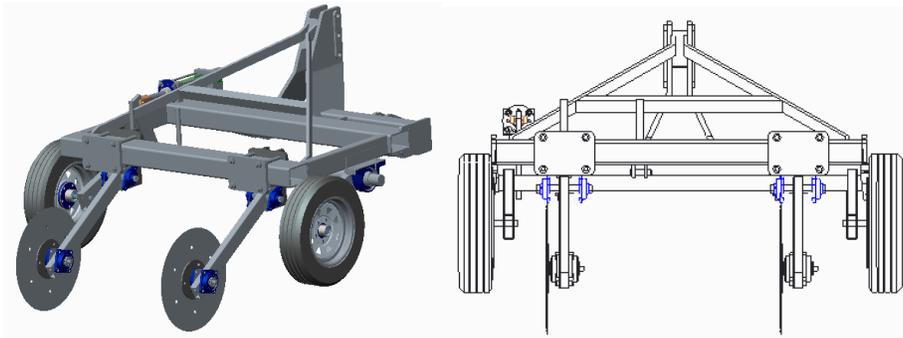


Figura 3.1 Carro con dos discos para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.

Se ajustaron las secciones donde va colocado el mecanismo de control de amortiguamiento (figura 3.2) para que permitiera un mayor rango de ajuste en los niveles de profundidad de los discos y se soldaron tornillos de cobre para la aplicación de voltaje.



Figura 3.2 Ajuste mecánico de los discos del carro porta sensores

3.2 Determinación de la conductividad eléctrica.

Para la medición de variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo se desarrolló un circuito que transformó el voltaje alterno a directo, puesto a que el equipo con el que se trabajó para el almacenamiento de datos solo mide voltajes analógicos de corriente directa.

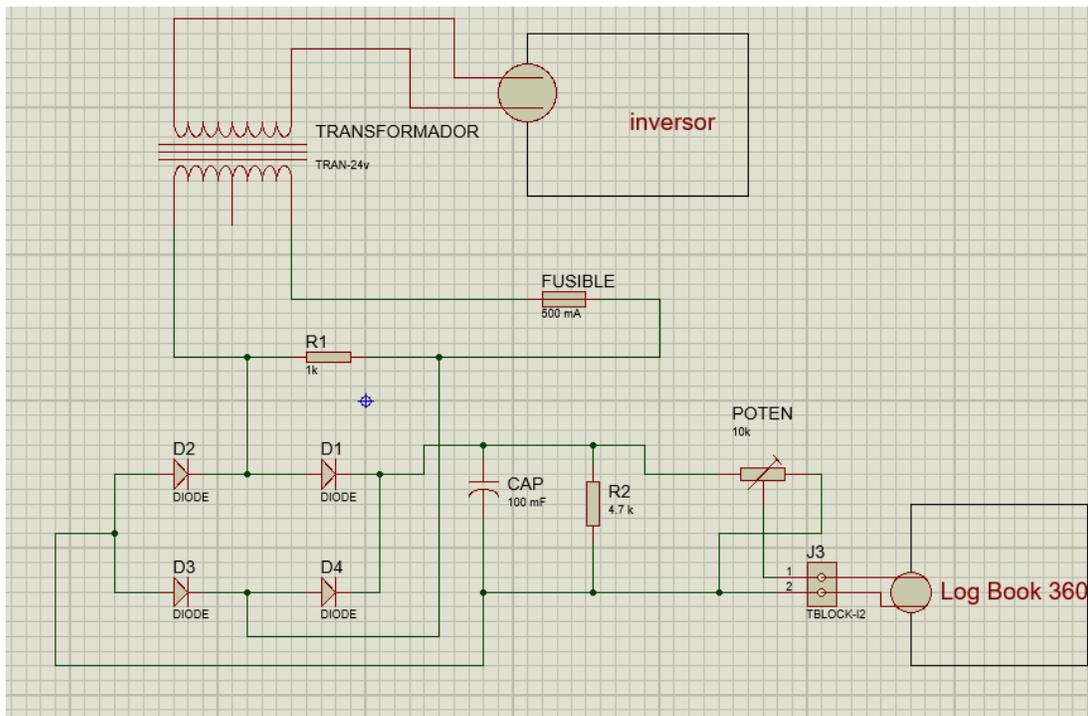


Figura 3.3 Diagrama esquemático para medir variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.

La figura (3.3), muestra los componentes de los que consta el circuito. Estos se montaron y se soldaron en una placa perforada para prototipos. El circuito consta de un inversor para generar un voltaje alterno, este alimenta a un transformador para producir el voltaje alterno de salida de menor amplitud. La corriente eléctrica proviene del transformador, pasa por la muestra de suelo y una resistencia para crear un divisor de voltaje. El puente de diodos rectificadores realiza la conversión de voltaje alterno de la resistencia R1 a un voltaje directo, un capacitor es utilizado como filtro y por último se utiliza un potenciómetro para regular la tensión eléctrica de salida y así poder realizar los registros de datos en el LogBoog 360.

3.3 Inversor

Se utilizó un inversor simple que consiste de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utilizó para transformar la energía eléctrica continua disponible en corriente alterna que pueda ser utilizada y generar una onda rectangular. Esta corriente alimenta a un transformador haciéndola parecer una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario.

El inversor figura (3.4), cambia un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna con la magnitud de 12v a 120 vac y frecuencia de 60 Hz.



Figura 3.4 Inversor

3.4 LogBook 360

El LogBook 360, figura (3.5), es un dispositivo de adquisición de datos donde podemos observar las diferentes entradas analógicas de medida, entradas de frecuencia, y entradas digitales. Se utilizó para la adquisición de datos que se obtuvieron de las pruebas realizadas en laboratorio y campo. Utilizando una frecuencia de 20 Hz y adquiriendo 1700 datos



Figura 3.5 Sistema de adquisición de datos LogBook 360

3.5 Evaluación de tarjeta electrónica para determinar la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.

Para la medición de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo se utilizaron probetas de tubo PVC, figura (3.6). Se introdujo en la probeta dos cables para la conducción de voltaje de entrada (24 volts) de corriente alterna (AC) con un transformador de forma directa, pasando a su vez por una mezcla de sal, humedad y suelo. Teniendo en cuenta una probeta como referencia, que en este caso fue con un suelo colectado en campo. Esta probeta tiene dos electrodos a una distancia de 3.5cm y cuenta con un volumen de 538.78 cm³.



Figura 3.6 Probeta de tubo de PVC

Se realizó el registro de datos en el Logbook 360 figura (3.5) y una computadora, figura (3.7). Adquiriendo 1700 datos a una frecuencia de 20 Hz bajo condiciones de laboratorio, se cambió cada una de las probetas en: sin sal añadida, 40 gr y 60 gr de sal.

Posteriormente, los datos obtenidos se graficaron en el programa Excel para su verificación de registro y análisis.



Figura 3.7 Computadora para almacén de datos

3.6 Acondicionamiento de tractor

El acondicionamiento se realizó con la finalidad de reunir y adaptar los elementos necesarios, figura (4.12), para conectar el circuito electrónico al sistema de

adquisición de datos (LogBook 360) y la PC con corriente alterna, esto se realizó con la ayuda de un inversor.

Posteriormente se identificó el canal (34), figura (3.8), donde se adaptó el cable, con el cual conecta las salidas del circuito al sistema de adquisición de datos LogBook 360



Figura 3.8 Cable adaptado

3.7 Evaluación en campo

Para la evaluación en campo se empleó el tractor y el carro porta sensores que contó en su diseño con la facilidad de regular la profundidad de trabajo. El sistema se completó con equipos de posicionamiento global (GPS), AgGPS Trimble 132, figura (3.9).



Figura 3.9 AgGPS Trimble 132

La evaluación del circuito eléctrico diseñado se hizo en una superficie de 1 ha, en el campo experimental “el bajío” de la UAAAN (Figura 3.10), en la cual se hizo unas pruebas de doce líneas (tabla 3.1), para registrar los datos y realizar los mapa de diagnóstico de variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.

Superficie: Esta unidad experimental cuenta con 32 ha de terreno agrícola de riego, y tiene además terrenos de temporal y cerril donde se siembran cultivos de verano e invierno.

Ubicación: Está situado en la sede de la Universidad en la ex-hacienda de Buenavista, Municipio de Saltillo, a 7 km, al sur de esta ciudad, sobre la carretera 54 (Saltillo-Zacatecas).

Localización: Se localiza en las coordenadas geográficas 25° 22" de latitud norte y 101° 02" longitud oeste y a una altitud de 1742 msnm.

Clima: Muy seco, semicálido, con invierno fresco, extremoso, con lluvias en verano, y una precipitación invernal superior al 10% del total anual. La precipitación total anual media 350-400 mm; régimen de lluvias: la temporada lluviosa es de junio a octubre. El mes con lluvias más abundante es julio y marzo es el mes más seco y una precipitación invernal superior al 10% del total anual (INEGI 2018).

Temperatura: Temperatura media anual de 19.8 °C. Las heladas comienzan en noviembre, no son muy severas en noviembre y diciembre, son más intensas en enero (hasta - 10°C). Terminan en marzo, mes que ni son muy intensas, ni se presentan frecuentemente, en algunas ocasiones, pueden presentarse ligeras heladas en abril.

Suelo: El suelo es de textura migajón y migajón arcilloso, con bajos contenidos de materia orgánica y poseen una capa subyacente de carbonato de calcio.

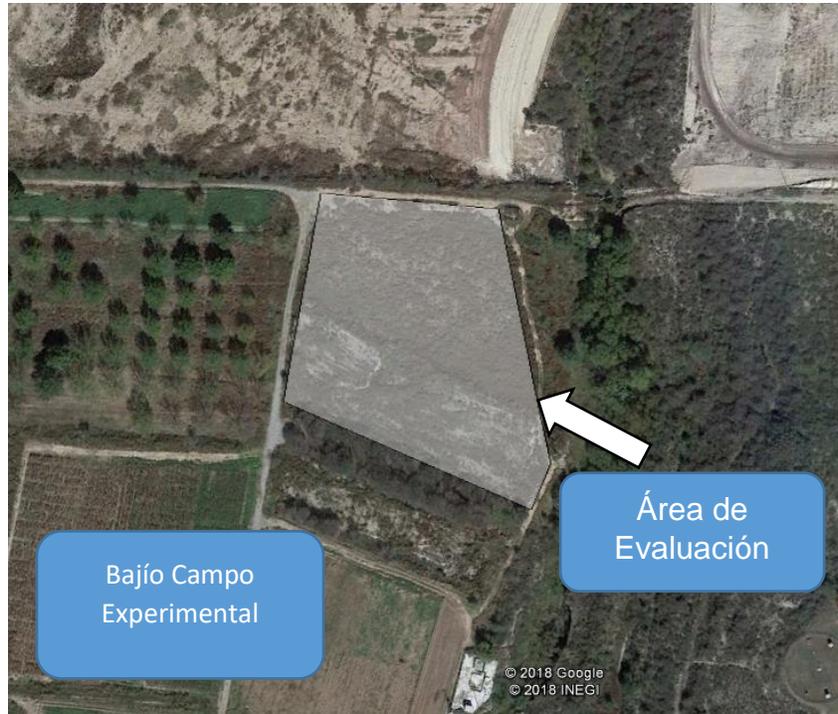


Figura 3.10 Bajío campo experimental.

Cuadro 3.1 Arreglo de recorridos

Profundidad (cm)	Distancia Entre Discos (cm)
10	20
	25
	30
15	20
	25
	30

cm=centímetros

Se realizaron dos pruebas de cada uno de los arreglos para seleccionar el mejor arreglo en términos de la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.

3.8 Generación de mapas

QGIS 2.14.3. Es un sistema de información geográfica (SIG). Permite manejar formatos raster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así como bases de datos.

La introducción de datos al software figura (3.11), se realizó con archivos de texto delimitados por comas (.csv) para generar los mapas con la herramienta de interpolación de distancias invertida (IDW) y observar por medio de colores los intervalos de la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo en campo.



Figura 3.11 Software para mapas.

IV. RESULTADOS

Para lograr los objetivos planteados se construyeron los circuitos electrónicos los cuales se muestran en la Figura (4.1), estos fueron elaborados en Proteus 8 Profesional. Se muestran los diagramas en: 3D (A), PCB (B) y real (C), del equipo electrónico para medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.

Este circuito permite la aplicación de la corriente alterna en los discos en un nivel de voltaje de 24 vac, también permite rectificar y filtrar la señal conectada que atraviesa por el suelo y convertirla en directa para leerla en el sistema de adquisición de datos Log Book 360.

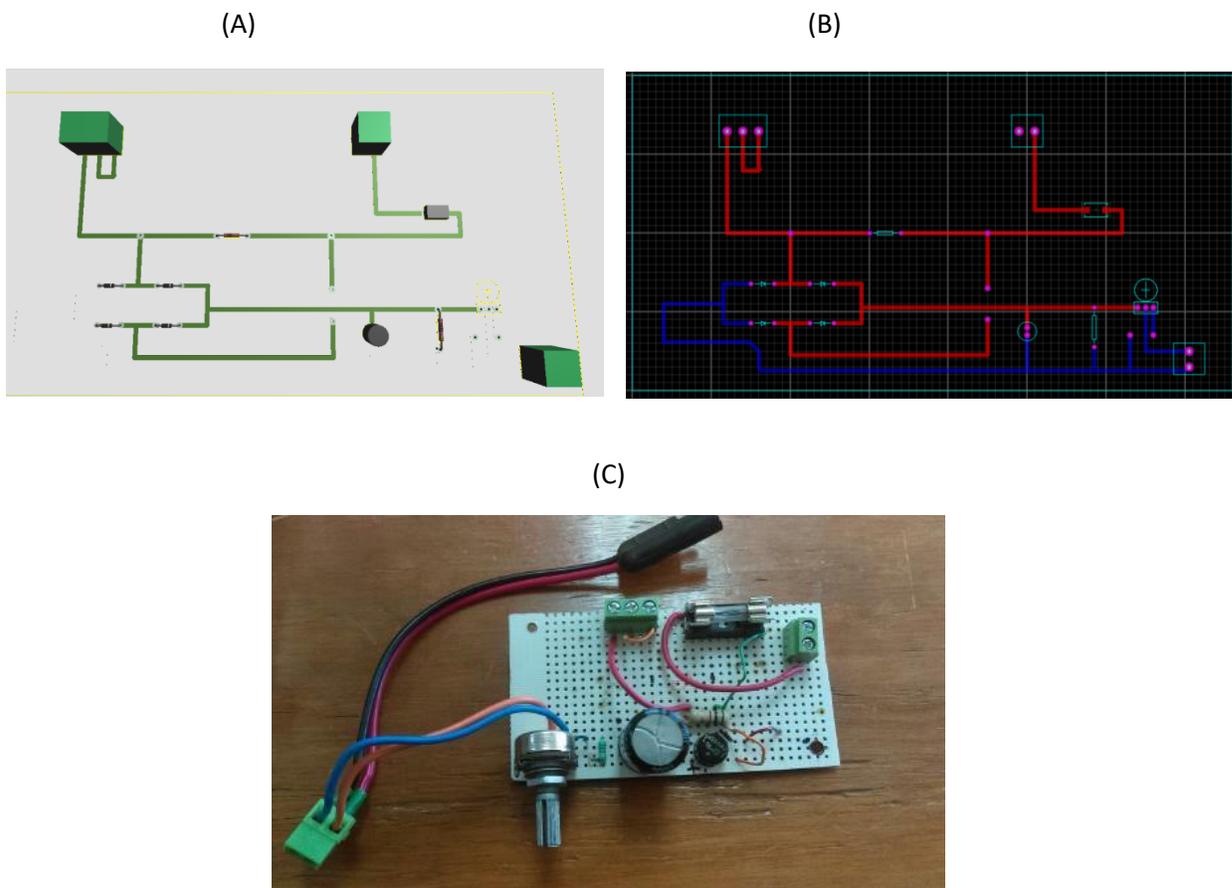


Figura 4.1 Circuitos electrónicos desarrollados para medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.

En la figura (3.3). Se muestran los componentes instalados en el circuito electrónico.

4.1 Resultados de pruebas realizadas en laboratorio para medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo

En la Figura (4.2), se muestran los equipos empleados con los que se llevó a cabo las pruebas para la determinación de la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo y revisión del comportamiento con respecto a distintas probetas dentro de laboratorio.



Figura 4.2 Equipo utilizado para la determinación de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo.

Cuadro 4.1 Resultados en volts con diferentes niveles de sal en laboratorio

Probetas	Voltaje Aplicado	Voltaje (V)
sin añadir sal extra	Entrada a circuito.	31.63
	Alternado salida de probeta.	4.628
	Directo salida de circuito.	4.376
40 gr de sal	Entrada a circuito.	31.52
	Alternado salida de probeta.	19.57
	Directo salida de circuito.	23.73
60 gr de sal	Entrada a circuito.	31.53
	Alternado salida de probeta.	28.87
	Directo salida de circuito.	37.318

En el cuadro (4.2) se muestra la recolección de datos en los diferentes niveles de sal.

En la siguiente figura (4.3), se observan un ejemplo de las gráficas obtenidas de las pruebas con las probetas a diferentes niveles de sal con suelo de acuerdo al cuadro 4.1, se aprecia resistencia en serie con la probeta en cada uno de los porcentajes de sal y humedad.

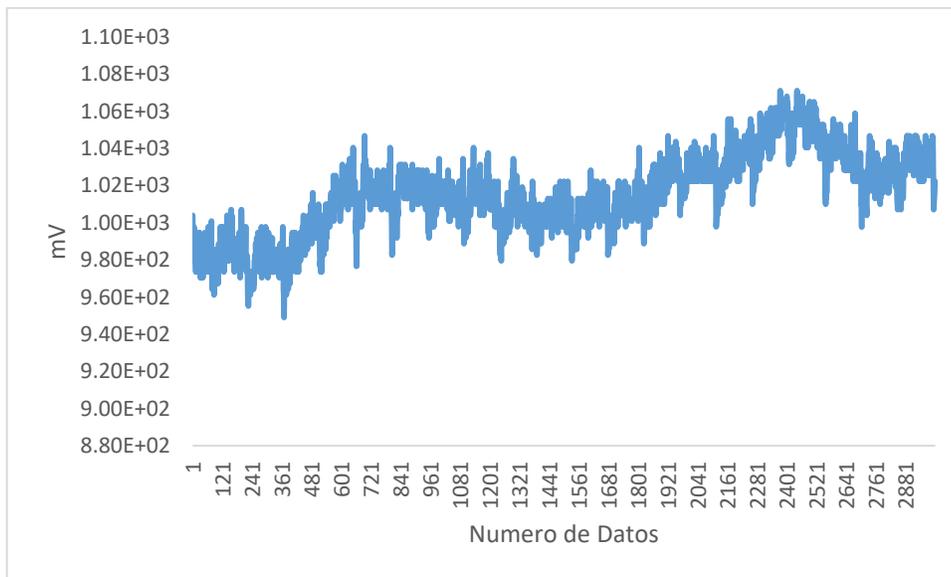


Figura 4.3 Probeta sin gramos de sal

Cuadro 4.2 Promedio de pruebas de laboratorio

Probeta	Promedio (VOLTAJE DIRECTO) mV
Sin añadir sal extra	1.04E+03
40 gr de sal	1.74E+04
60 gr de sal	3.08E+04

mV=milivolts

En el cuadro (4.2), se muestran los promedios de voltaje obtenidos de las pruebas que se realizaron en laboratorio empleando tres diferentes niveles de sal (NaCl). Se aprecia claramente que conforme se incrementa el nivel de sal se ve incrementado el nivel de voltaje de salida, lo cual se traduce en una disminución de la impedancia eléctrica del suelo.

4.2 Resultados del acondicionamiento del equipo y carro porta sensores

Los resultados obtenidos del acondicionamiento del equipo y el carro se observan a continuación. En la figura (4.6), se ilustra el resultado del carro porta sensores después de haberse aislado los dos discos. Una vez montado los discos se verificó la continuidad con la ayuda de un multímetro para corroborar que no existiera contacto con otra parte del carro.



Figura 4.6 Acondicionamiento de los discos en el carro porta sensores.

En la figura (4.7), observamos las ubicaciones donde se colocaron unos tornillos de cobre para la aplicación de voltaje.

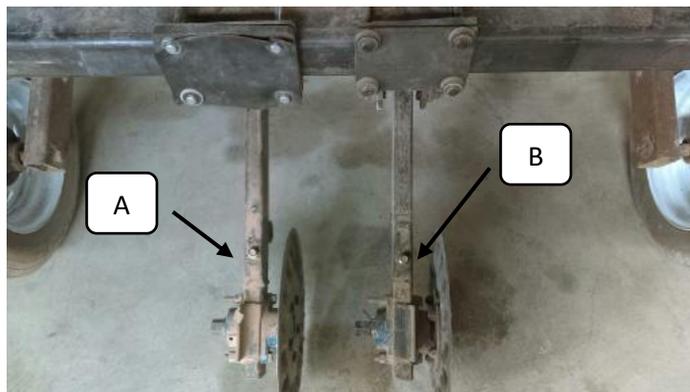


Figura 4.7 Aplicación de voltaje en discos.

En la figura (4.8), se aprecia el ajuste que se le dió a los resortes de compresión para que cuando se encontrara con algún obstáculo el disco fácilmente se levantara y no tuviese algún problema al regreso de la profundidad que se requiere o que se esté trabajando, ya sea 10 cm o 15 cm.

1. Ajuste de mecanismo para control de pivoteo de los discos.
2. Bujes de nailon.
3. Juntas de neopreno.
4. Placas de soporte.

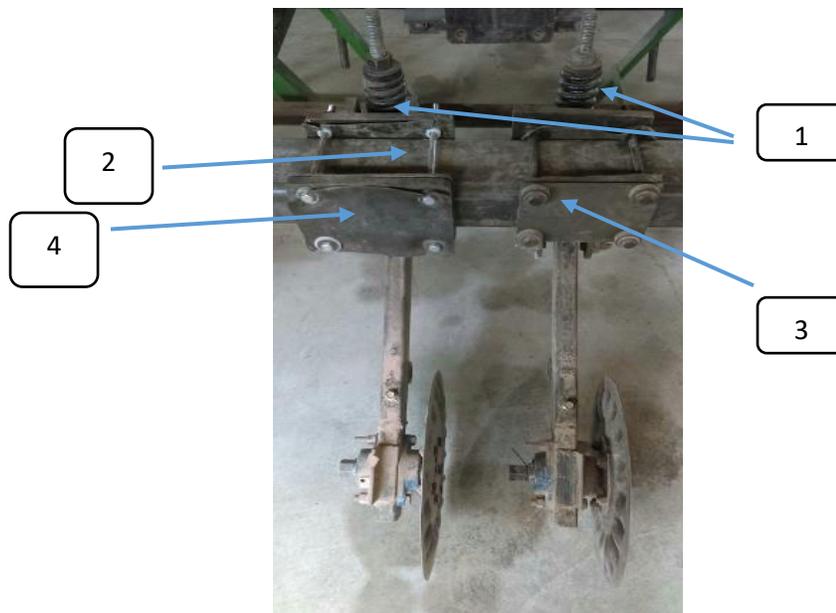


Figura 4.8 Ajuste general de discos.

4.3 Resultados de evaluación de niveles de profundidad

Se realizaron pruebas de profundidad para corroborar los ajustes que se le realizaron a los brazos y placas, estos van sujetos del bastidor y a su vez sostienen a los discos para seleccionar el mejor arreglo en términos de la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.

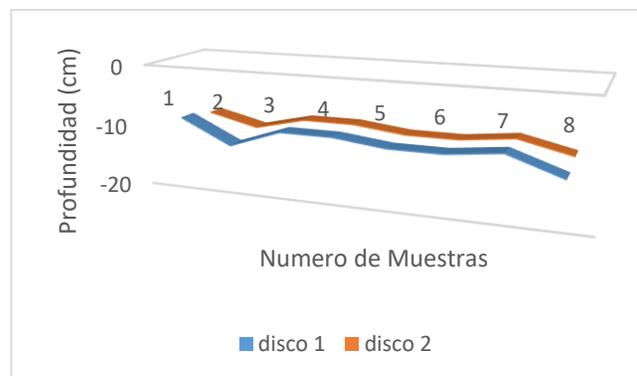
En el cuadro (4.3), se muestra los valores obtenidos en una prueba de profundidad de 10 cm, así como la desviación estándar que establece un valor de referencia para estimar la variación que existe en los datos obtenidos y la media para observar a que nivel iba el disco.

Cuadro 4.3 Análisis de profundidad a 10 cm

Profundidad real con ajuste de profundidad 10 cm			
Prueba 1 (A)		Prueba 2 (B)	
Disco 1 (cm)	Disco 2 (cm)	Disco 1 (cm)	Disco 2 (cm)
9	10	10	10
13	12	9	10
10	10	10	10
10	10	13	14
11	11	10	11
11	11	10	9
10	10	8	11
13	12	13	10
Desviación Estándar			
1.45	0.88	1.76	1.50
Media			
10.87	10.75	10.37	10.62

Las gráficas, figura (4.9), muestran el comportamiento de los discos en campo donde se realizaron estas pruebas a una profundidad de 10 cm. Las profundidades tomadas varían de acuerdo a la compactación que tiene el suelo.

(A)



(B)

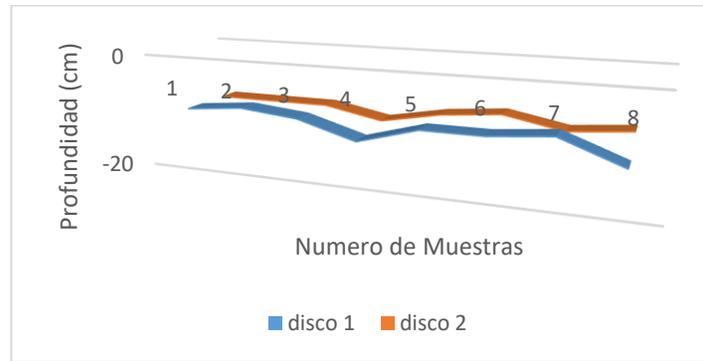


Figura 4.9 Comportamiento de los discos con un nivel de 10 cm (A y B)

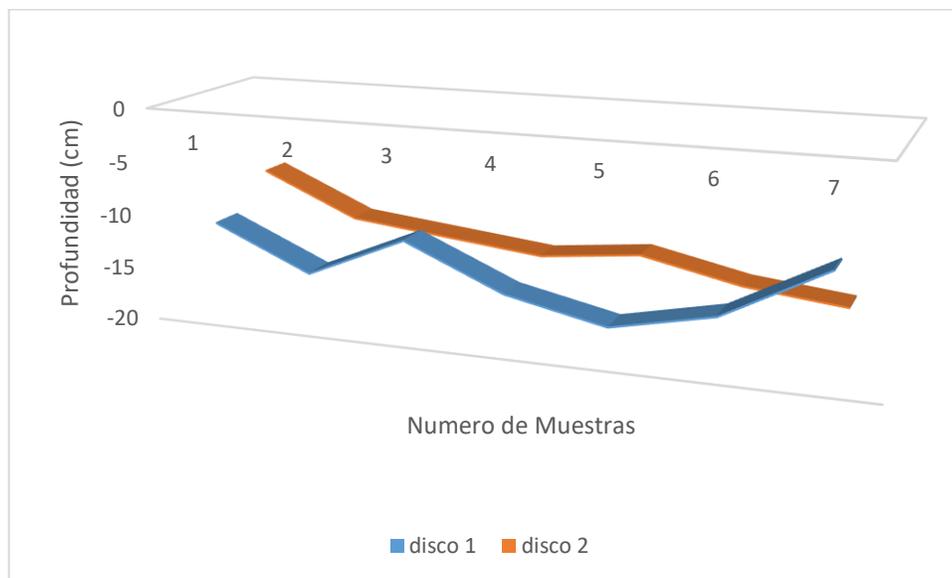
En el cuadro 4.3, se muestra los valores obtenidos en una prueba de profundidad de 15 cm. Así como la desviación estandar y la media. Se observó que tiene una mayor variación en las profundidades por la compactación del terreno.

Cuadro 4.4 Análisis de profundidad a 15 cm

Profundidad aproximada de 15 cm			
Prueba 3 (C)		Prueba 4 (D)	
Disco 1 (cm)	Disco 2 (cm)	Disco 1 (cm)	Disco 2 (cm)
11	8	10	11
15	12	15	12
11	13	15	16
15	14	16	12
17	13	14	15
15	15	15	15
10	16	14	16
Desviación Estándar			
2.69	2.58	1.95	2.11
Media			
13.42	13	14.14	13.85

La gráfica, figura (4.10), se muestran el comportamiento de los discos en campo donde se realizaron estas pruebas a una profundidad de 15 cm. Se observa la variación de los discos con respecto a la profundidad

(C)



(D)

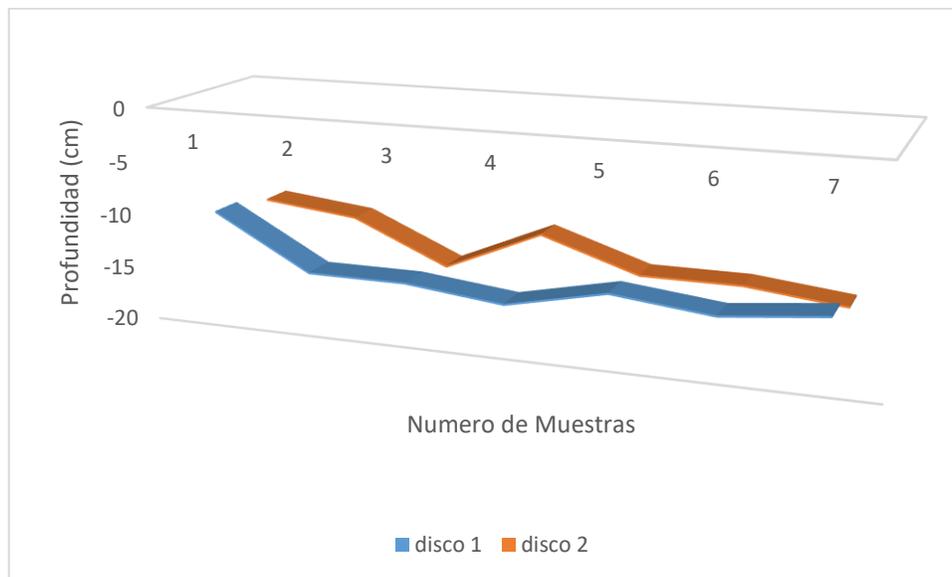


Figura 4.10 Comportamiento de los discos con un nivel de 15 cm (C y D)

4.4 Resultados de evaluación del circuito electrónico bajo condiciones de campo

Se realizó una prueba preliminar con el circuito electrónico mencionado anteriormente figura (3.3), para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo y poder revisar el comportamiento.

Cuadro 4.5 Niveles de voltaje bajo condiciones de campo de 10 cm

Profundidad de 10 cm (V)	
Voltajes más altos (V).	Voltajes más bajos (V).
2.48	0.242
1.218	0.092
3.821	0.183
1.371	0.184
5.552	0.71
6.52	0.81

cm=centímetros v=volts

Cuadro 4.6 Niveles de voltaje bajo condiciones de campo de 15 cm

Profundidad de 15 cm (V)	
Voltajes más altos (V).	Voltajes más bajos (V).
5.587	0.425
6.789	0.21
7.832	0.43
8.821	0.052
8.507	0.4
6.795	0.23

cm=centímetros v=volts

En los cuadros (4.5 y 4.6), se observa los diferentes niveles de voltaje obtenidos en campo con la ayuda de un osciloscopio tomando en cuenta que no se sobrepase un nivel mayor a 10 volts para poder conectarlo al sistema de adquisición de datos Log Book 360 y mostrar datos y gráficas completas.

4.5 Resultado de pruebas realizadas en el campo para medir la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.

En la Figura (4.11), se muestran los equipos empleados con los que se llevó a cabo las pruebas para la determinación de la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo y revisión del comportamiento con respecto a las distintas distancias y profundidades que se le dieron a los discos en campo.



Figura 4.11 Equipo y carro porta sensores



Figura 4.12 Equipo utilizado para el almacenamiento de datos

Una vez realizado las pruebas en campo de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo con el equipo mostrado, figura (4.12) y la superficie indicada, figura (3.10), se obtuvo el registro de datos, para ser procesados en el software Excel. Se analizaron los datos, se creó un archivo delimitado por comas para poder impórtalos al software QGIS 2.143 y poder crear los mapas.

En las siguientes figuras se muestra los resultados obtenidos en campo tomando en cuenta los diferentes niveles y distancias. Las distancias que se tomaron fueron de 20, 25 y 30 cm de distancia entre discos y también se varió con dos niveles de profundidad de 10 y 15 cm.

En las siguientes figuras (4.13 y 4.14) se muestra el comportamiento de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo tomando en cuenta que los discos se tenían a una distancia de 20 cm y a una profundidad de 10 cm.

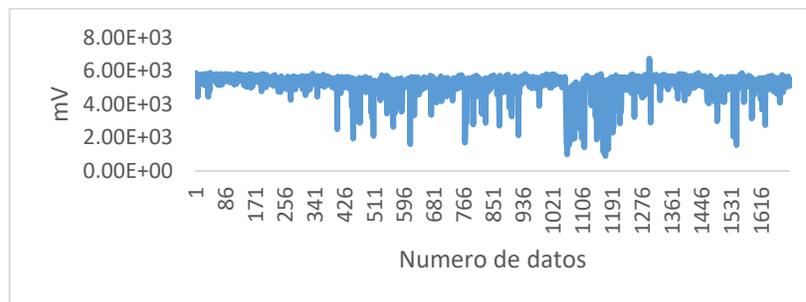
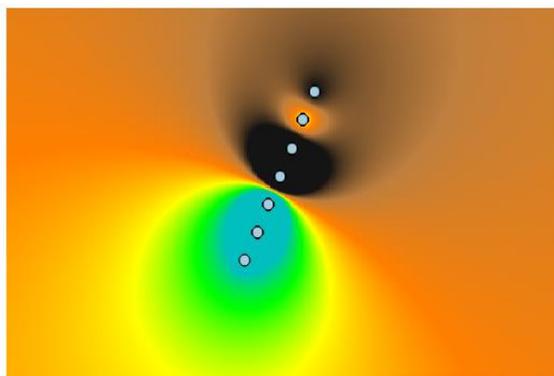


Figura 4.13 Comportamiento a una distancia de 20 cm y 10 cm de profundidad.



mV	Color	mV
5068.370000	Dark Blue	5068.370000
5092.688000	Light Blue	5092.688000
5117.006000	Yellow	5117.006000
5141.324000	Orange	5141.324000
5165.642000	Red-Orange	5165.642000
5189.960000	Dark Red	5189.960000

Figura 4.14 Mapa con una separación de 20 cm y 10 cm de profundidad.

En la figura (4.14) muestra el mapa obtenido de los cambios de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo, a un costado estan los niveles de voltaje y colores respectivamente de cada uno a una separación de 20cm de distancia y 10cm de profundidad.

En estas figuras (4.15 y 4.16), se muestra la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo tomando en cuenta una distancia de 20 cm entre discos y 15 cm de profundidad.

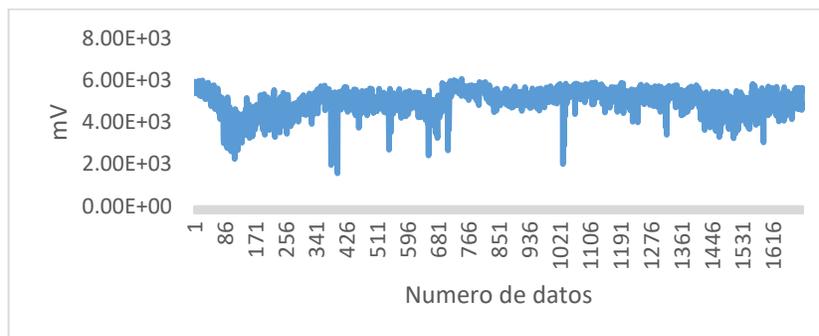
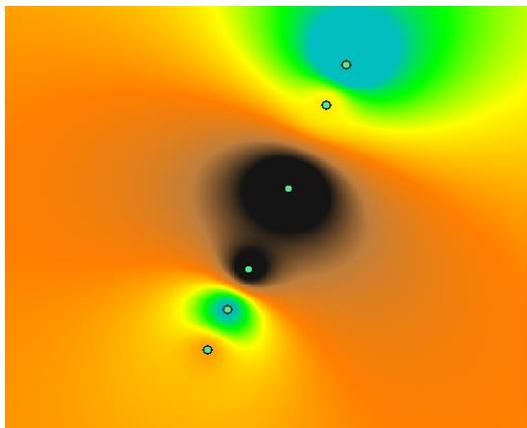


Figura 4.15 Comportamiento a una distancia de 20 cm y profundidad de 10 cm.



mV	color	mV
4804.100000		4804.100000
4888.060000		4888.056000
4972.010000		4972.012000
5055.970000		5055.968000
5139.920000		5139.924000
5223.880000		5223.880000

Figura 4.16 Mapa con una separación de 20 cm y una profundidad de 10 cm.

Este mapa figura (4.16), muestra los cambios de variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo representada en voltaje a un costado y niveles con respecto a colores.

En las siguientes figuras (4.17y 4.18), se muestra en comportamiento de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo con una distancia de 25 cm y 10 cm de profundidad.

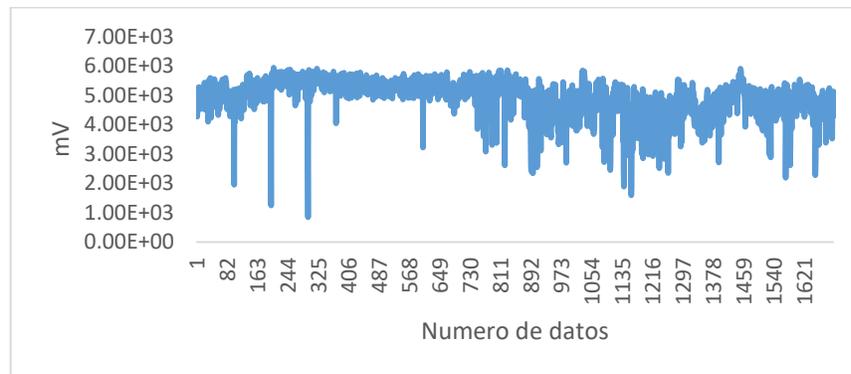


Figura 4.17 Comportamiento a una distancia de 25 cm y 10 cm de profundidad.

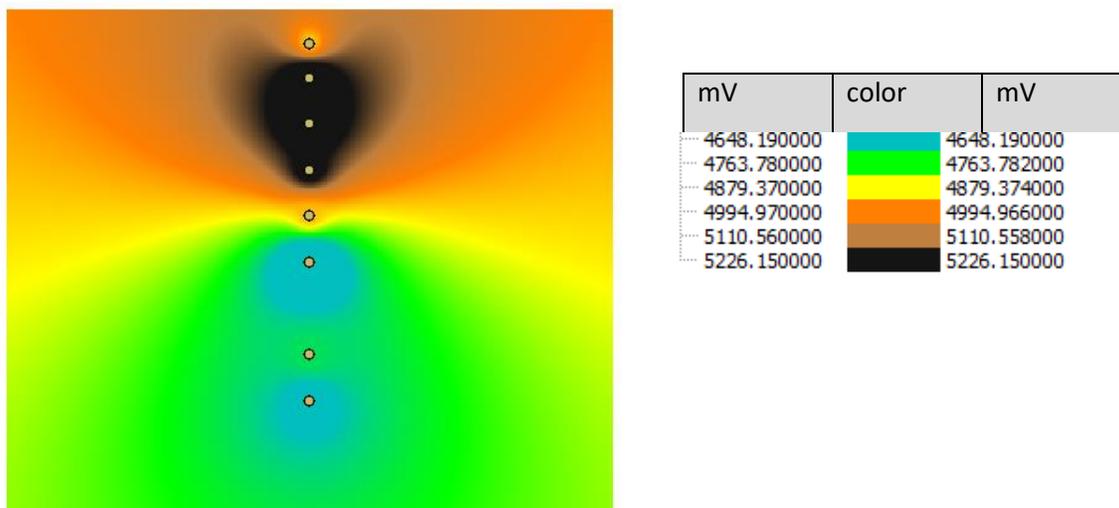


Figura 4.18 Mapa con una separación 25 cm y 10 cm de profundidad.

En la figura (4.18), se muestra el mapa de variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo representada en voltaje y aun costado del mapa se muestra los niveles de voltaje con su representación de color.

En estas figuras (4.19 y 4.20), se muestra la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo con una distancia de 25 cm entre discos y 15 cm de profundidad.

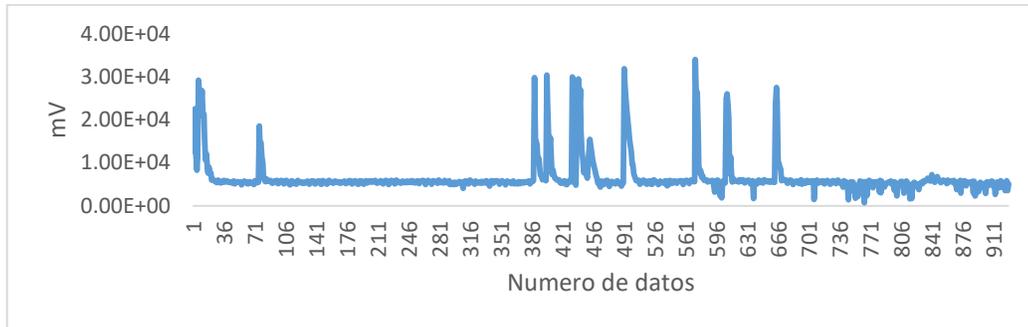


Figura 4.19 Comportamiento a una distancia de 25 cm y una profundidad de 15 cm.

En esta gráfica (4.19), se muestra un comportamiento distinto a las demás debido que en suelo donde se tomó la adquisición de datos existía un gran número de terrones de grandes proporciones u obstáculos que afectaba la aplicación de voltaje entre el disco y el brazo que lo sujeta.

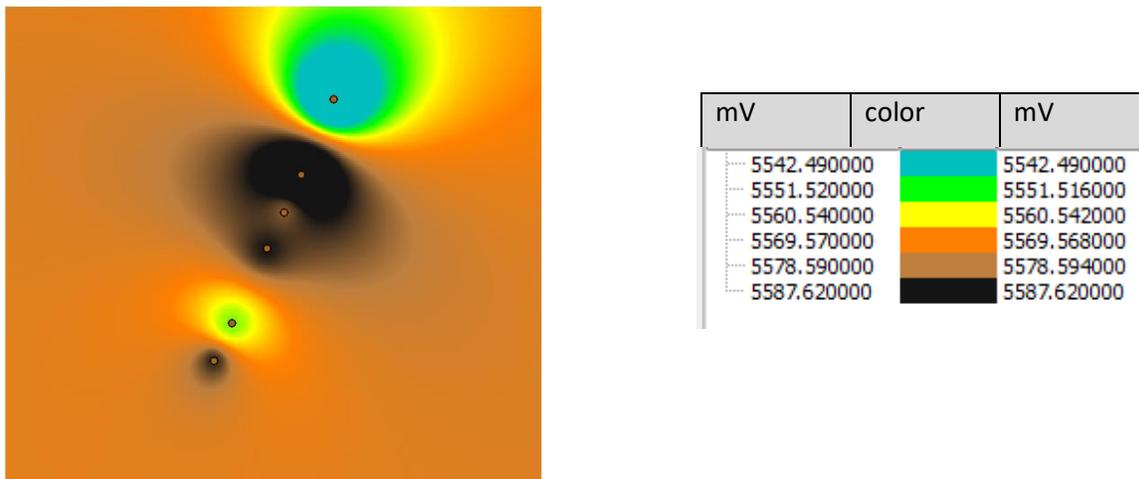


Figura 4.20 Mapa con un separación se 25 cm y una profundidad de 15 cm.

En el mapa figura (4.20), muestra los cambios de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo, a un costado estan los niveles de voltaje y colores respectivamente de cada uno a una separación de 25cm de distancia y 15cm de profundidad.

En las siguientes figuras (4.21 y 4.22), se muestra en comportamiento de la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo con una distancia de 30 cm y 10 cm de profundidad.

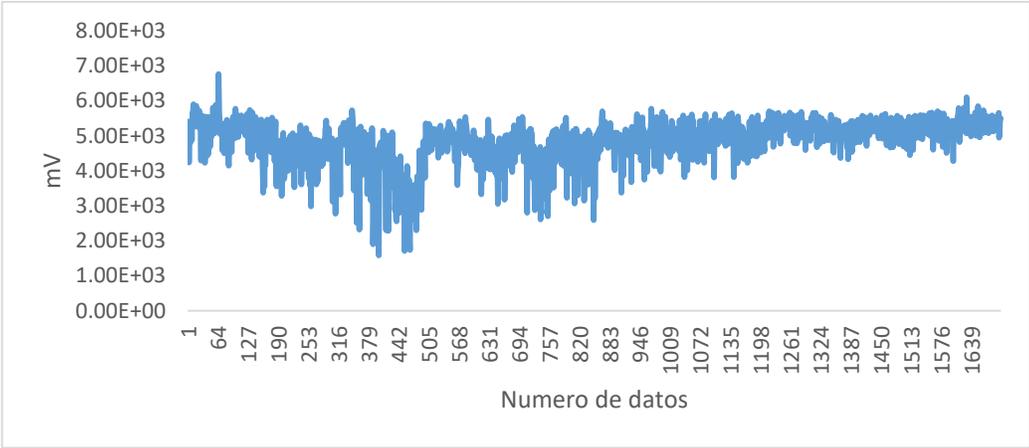


Figura 4.21 Comportamiento a una distancia de 30 cm y un profundidad de 10 cm.

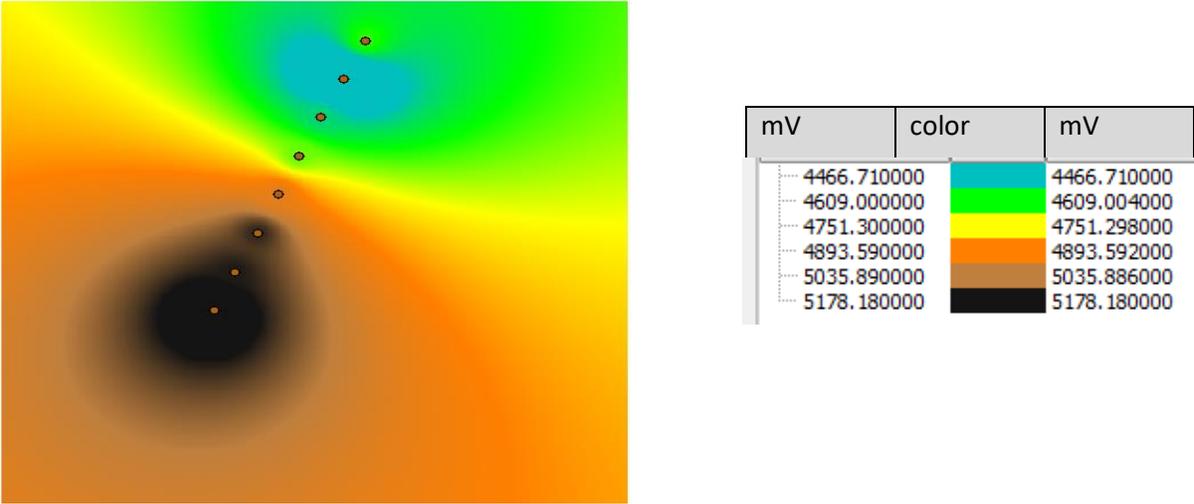


Figura 4.22 Mapa con una separación de 30 cm y un profundidad de 10 cm.

Este mapa figura (4.22), muestra los cambios de variabilidad en la impedancia eléctrica que hay en el suelo. Se aprecia claramente el cambio del nivel de voltaje más bajo al más alto con respecto a los colores mostrados a un costado.

En estas figuras (4.23 y 4.24), se muestra la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo con una distancia de 30 cm entre discos y 15 cm de profundidad.

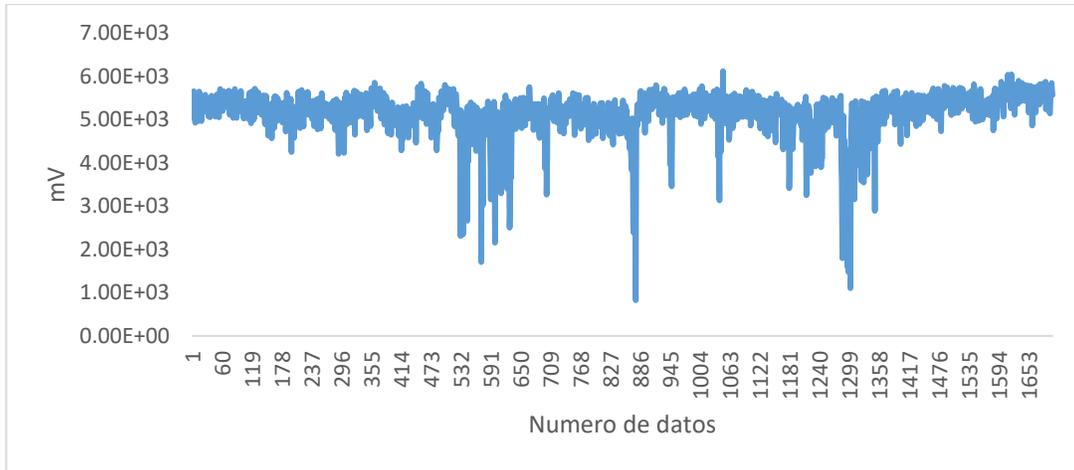


Figura 4.23 Comportamiento a una distancia de 30 cm y una profundidad de 15 cm.

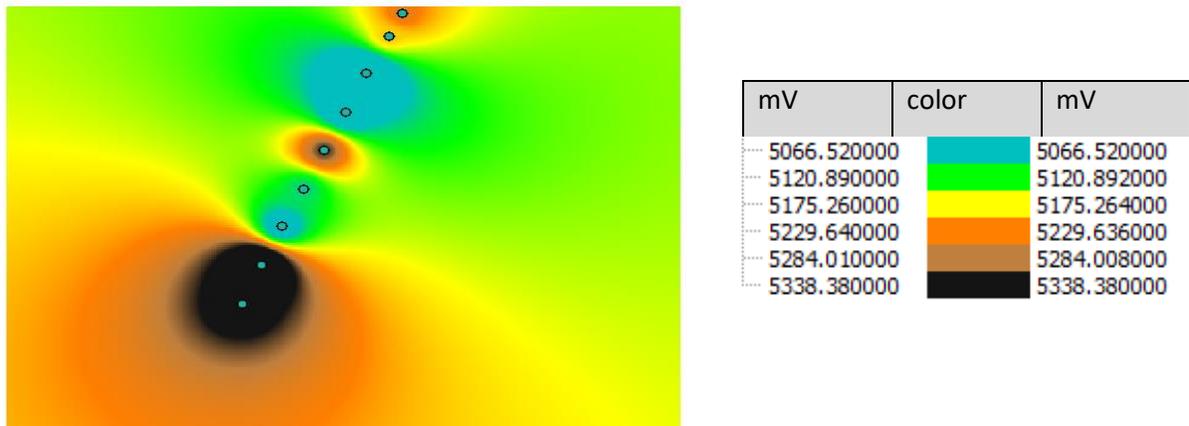


Figura 4.24 Mapa con una separación de 30 cm y una profundidad de 15 cm.

En esta figura (4.24), se observa como los colores están más combinados, permitiendo medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo

En la parte de anexos, se realizaron mapas en el software GS+ con los diferentes niveles de profundidad y separaciones entre los electrodos, mostrado la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo y la secuencia del registro de datos en el sistema de adquisición de datos Log Book 360.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se lograron los objetivos establecidos al inicio de la investigación que fue el acondicionamiento y la estabilidad de la parte mecánica del carro porta sensores y la obtención de los mapas de variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo.

- Se desarrolló un circuito electrónico que nos permitiera medir la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo en condiciones de laboratorio y campo.
- El acondicionamiento del aislamiento y sistema de amortiguamiento del carro porta sensores permitió el sondeo de la variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo a profundidades estables y deseables.
- En las mediciones de variabilidad de la impedancia eléctrica del suelo obtenidas en campo muestra que es mejor trabajar a una distancia de separación entre electrodos de 20 cm y una profundidad de 10 cm, ya que muestra una mayor estabilidad y un mayor número de rangos de la variabilidad representados en volts.
- En los mapas obtenidos se observa la variabilidad en la impedancia eléctrica del suelo y rangos representados en niveles de voltaje.

5.2 Recomendaciones

- En el circuito electrónico se tiene que revisar con frecuencia el fusible instalado o colocar un led, para que éste confirme si la corriente está circulando correctamente para evitar un error de almacenamiento de datos
- Instalar en el carro porta sensores discos de mayor diámetro, peso y de un material más resistente si se quiere trabajar a una profundidad mayor.
- Colocarle otro gato hidráulico de lado derecho para evitar una posible ruptura del que ya se encuentra instalado.

VI. LITERATURA CITADA

Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K., 2004, On- the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 71-91.

Astier, C.M., M. Mass-Moreno y J. Etchevers, B. 2002. *Derivación de indicadores de calidad de suelo en el contexto de la agricultura sustentable*. *Agrociencia* 36: 605-620.

Bautista, C.A., J. Etchevers, B., F. del Castillo, R., C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores; ecosistemas. *Asociación Española de Ecología Terrestre*.

Bolstad, P., 2005. *GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems*, Second Edition. White Bear Lake, MN: Eider Press, 543 pp.

Bongiovanni, R.; C. Mantovani, E.; S. Best., A. Roel, (Ed.). 2006. *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*.

Bragachini, M., A. Mendez., F. Scaramuzza y F. Proietti. 2006. "Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas". En: *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Capítulo 3. Editores: Bongiovanni R., Chartuni Mantovani E., Best S. y A. Roel. p. 45-54. PROCISUR.

- Buol, S. W. 1995.** Sustainability of soil use. Annual Review of Ecology and Systematic 26:25-44.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997.** Concepts of soil quality and their significance. En Soil quality for crop production and ecosystem health.
- Calderón, S.F., 2001.** Control de humedad en cultivos de clavel mediante el uso de Sensores Eléctricos; F. Calderón; Dr. Calderón Laboratorios Ltda. Avda. 13 No. 87-81 Bogotá D.C., Colombia S.A.
- Calderón S.F., 2002.** La conductividad eléctrico y la conductividad eléctrica a granel del suelo como base para le medición de humedad. Calderon laboratorios.
- Corwin, D.L. y Lesch, S.M. 2005.** “Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture”. Computers and electronics in agriculture 46:11-43.
- Corwin, D.L. and J.D. Rhoades., 1999.** << Determining soil electrical conductivity using an inductive electromagnetic soil conductivity meter>>, Soil Sci. Soc Amer.J., 45:255260,1981.
- Dávila R., 2010.** La agricultura de precisión, la innovación en el campo, journalmex, México, México.
- Doran, J.W. y B. Parkin, T. 1994.** Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

Durán altisent J.M. y R. Moratíel Y. 2013. La conductividad eléctrica al servicio de la agricultura y de los céspedes deportivos Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Universidad Politécnica de Madrid.

Emiliano G. y Flego, 2014. Agricultura de precisión. Tecnología agropecuaria; Universidad de Palermo.

Evandro, C.M., Francisco de A., Daniel M. y Emilio R., 2017. *Nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria.* Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Brasil.

Fernando R., 2009. Tesis sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales. Instituto Politécnico Nacional.

García, E. y Flego, F. 2014. Agricultura de precisión. Tecnología agropecuaria. Facultad de ingeniería. Universidad de Palermo.

Geremía, A. y Cesari, C. 2000. Proyecto agrícola de precisión. SOIL DOCTOR: CROP TECHNOLOGY, Inc. *INTA* Manfredi.

Goddard, T. (1997), What is precision farming, in 'Proceedings of Precision Farming Conference', Taber, Alberta, Canadá.

Guadarrama E.M. 2013. Evaluación se sensor de conductividad y capacitancia eléctrica bajo condiciones de campo. Tesis de licenciatura sin publicar. Departamento de maquinaria agrícola. Universida Autonoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. 1997.** Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J. 61: 4-10.
- Larson, W.E. y J. Pierce, F. 1991.** Conservation and Enhancement of Soil Quality. In Evaluation for sustainable land management in the developing world. En Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai. pp. 175-203. 15-21 Sept. 1991. Int. Board of Soil
- Lobo-guerrero, y A. Geólogo 2001.** Agricultura de Precisión y Mapeo de Conductividad Eléctrica Tecnología para mejorar la eficiencia de los cultivos; M.Sc., Min.Ex., Ph.D., LOGEMIN S.A
- López L. J. A., 2012.** Evaluación de un Sensor de Permisividad Eléctrica para Agricultura de Precisión. Tesis de Nivel Licenciatura. Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Luciana G. H., 2011.** Conductividad Eléctrica aparente como herramienta para delimitar Zonas de Manejo Sitio Especifico en Maíz. Universidad Nacional de la Plata.
- Magan H., A. Domene M., R. Ordiales, y S. Vidal., 2002.** Self Balance Impedance Bridge, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad

edáfica; Departamento de Instrumentación, Estación Experimental de Zonas Áridas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Almería.

María R.F., 2013. Permitividad eléctrica y permeabilidad magnética efectivas de compuestos. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Madrid. España.

Molina, B, M., 2012. Sensores por Conductividad eléctrica Programación de Interfaces.

Navarrete G., J. Vela., L. Maria, y L. Rodríguez. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de la calidad del suelo. Instituto de Ecología, UNAM. Circuito Exterior s/n. Ciudad Universitaria. México.

Ortega, R. y Flores, L. Agricultura de precisión: introducción al manejo sitio específico. 1a ed. Chillán (CL): INIA, Departamento de recursos naturales y medio ambiente Vicente Méndez. 8 p. tesis 2007.

Ramírez, F., Tesis sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales, noviembre del 2009.

Reyes L. F., 2009. LOGEMIN S.A. Agricultura de Precisión y Mapeo de Conductividad Eléctrica Página

Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F. y McSweeney, K. 1995. How farmers assess soil health and quality. J. Soil Water Conservation 50: 229-236.

Rucks, L., F. García., A. Kaplan., J. Ponce L. y M. Hill. 2004. Propiedades Físicas del suelo. Facultad de Agronomía, Departamento Suelos y Aguas; Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay. 68 p.

Salazar, G. A. J. 2010. Capacitancia e inductancia. Universidad de los andes, Bogota Colombia,

Singer, M.J. y S. Ewing. 2000. Soil Quality. En Handbook of Soil Science. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida. SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA

Paredes, M. R., Mandujano B A., Gámez V. J. A., García N. H. 2011. Actualización del mapa de uso del suelo agrícola en el estado de Guanajuato. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias México. Vol. 2, N° 1, Pp 85-96.

Pérez, G.N., Garnica, A. P., Delgado, V. H., Landaverde, N. 2010 Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 325. Sanfandila, Qro, 2010.

Wetzel, R. G. and G. E. Likens. 1979. Limnological Analyses. W. B. Saunders Co., Philadelphia. 357 pp.

Páginas web consultadas

LOGEMIN S.A. Mapeo de Conductividad Eléctrica de Suelos Agrícolas. [En línea] [Fecha de consulta: febrero, 2018] [Base de datos disponible en:]

<http://www.logemin.com/esp/c8.htm>

ECUARED. Impedancia eléctrica [En línea] [Fecha de consulta: Febrero, 2018] [Base de datos disponible en:]

<https://www.ecured.cu/Impedancia>

INEGI Sistema de Información Geográfica [En línea] [Fecha de consulta: febrero, 2018] [Base de datos disponible en:]

<http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>

JOHN DEERE Agricultura de Precisión [En línea] [Fecha de consulta: Febrero, 2018] [Base de datos disponible en:]

http://www.deere.com/es_ES/agriculture/ams/yield_mapping.html

INTAGRI Conductividad eléctrica del suelo [En línea] [Fecha de consulta: marzo, 2018] [Base de datos disponible en:]

<https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>

ECOSISTEMAS Calidad del suelo revista científica y técnica de ecología y medio ambiente [En línea] [Fecha de consulta: marzo, 2018] [Base de datos disponible en:]

<http://www.redalyc.org/pdf/540/54013210.pdf>

LOGEMIN Mapeo de conductividad eléctrica del suelo [En línea] [Fecha de consulta: marzo, 2018] [Base de datos disponible en:]

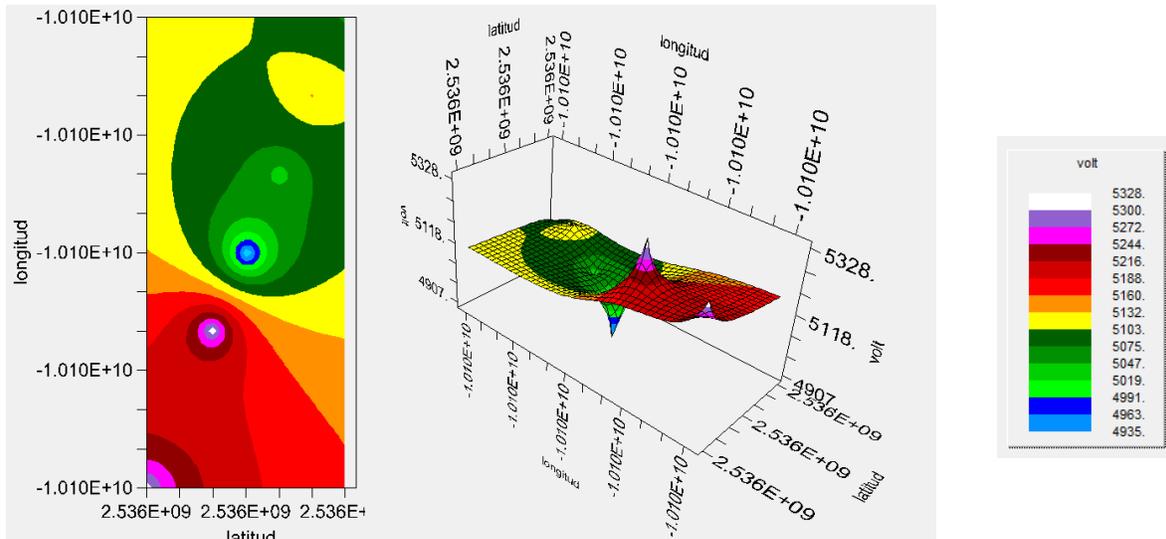
http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/39_mapeo_conductividad_electrica.pdf

USER´S MANUAL Manual LogBook 360 [En línea] [Fecha de consulta: marzo, 2018]
[Base de datos disponible en:]

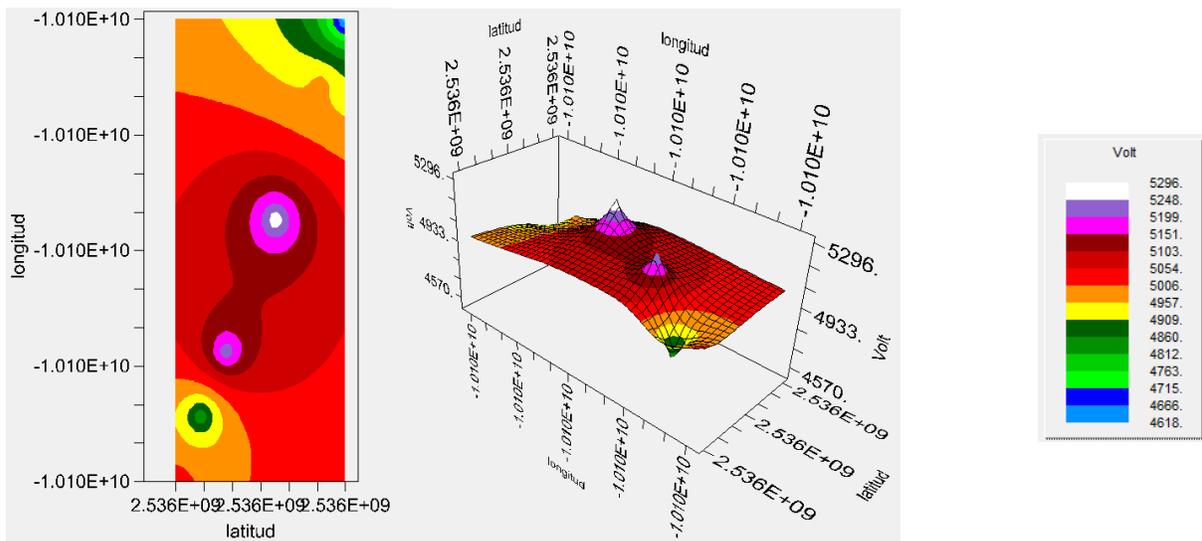
https://www.mccdaq.com/pdfs/manuals/logbook_series.pdf

vii. ANEXO

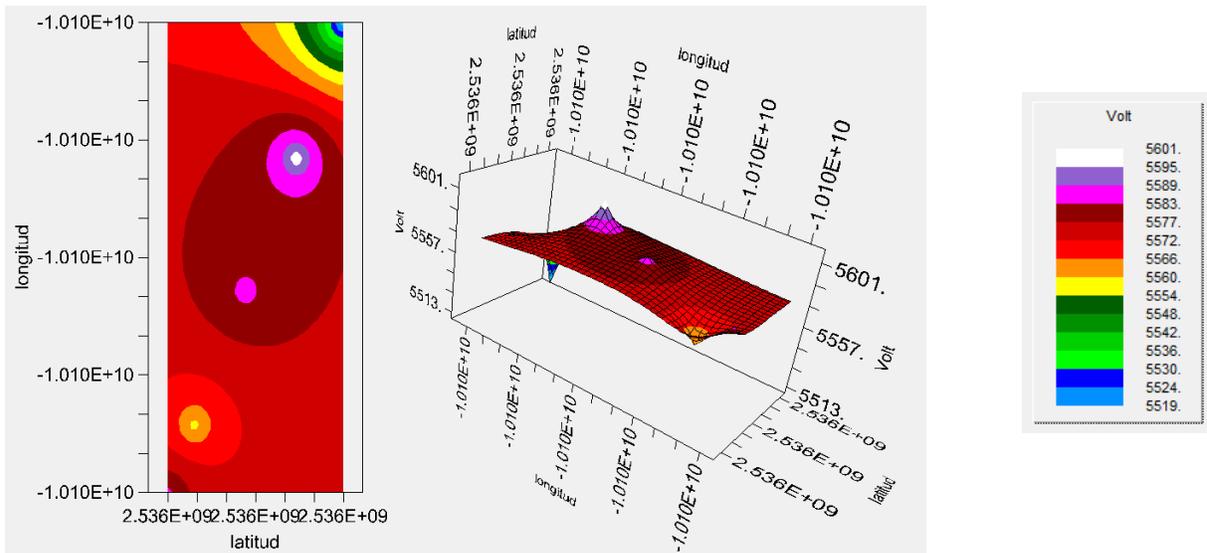
7.1 Elaboración de mapas en el programa GS+



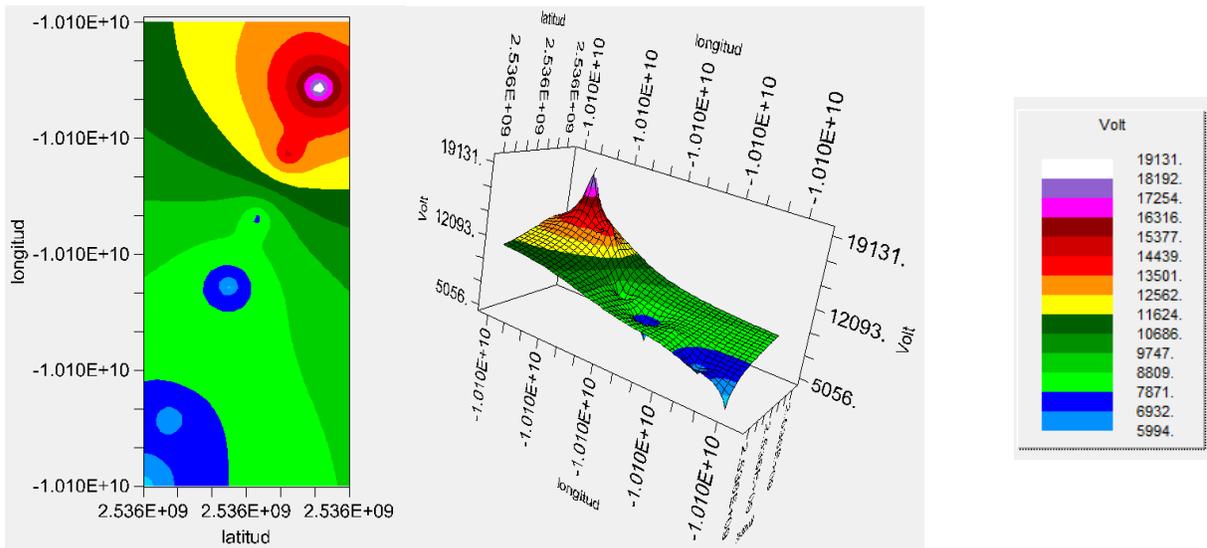
Mapa a 20 cm de distancia y 10 de profundidad



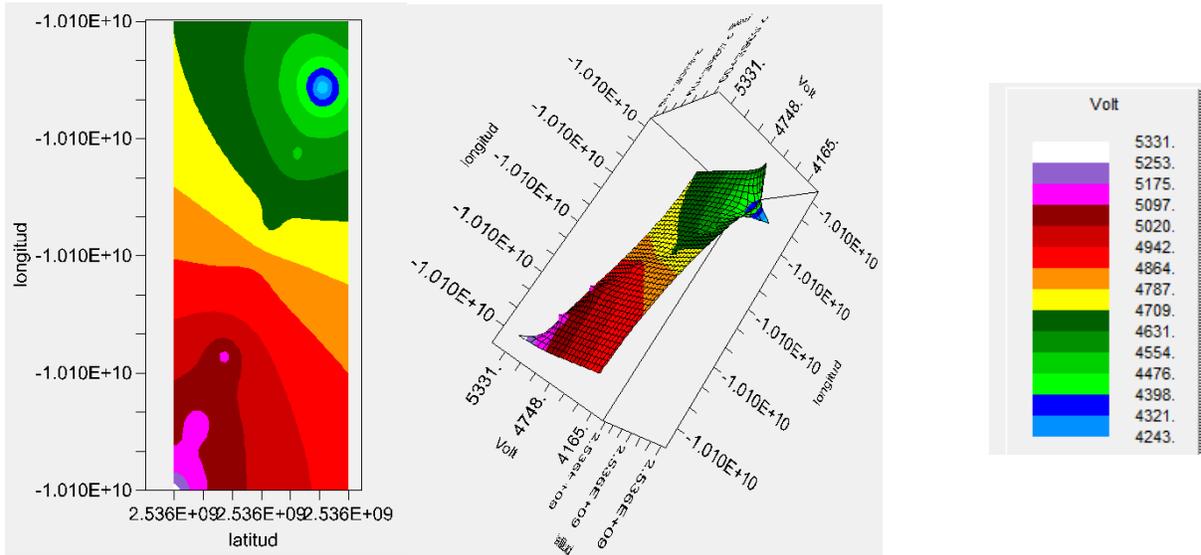
Mapa a 20 cm de distancia y 15 cm de profundidad



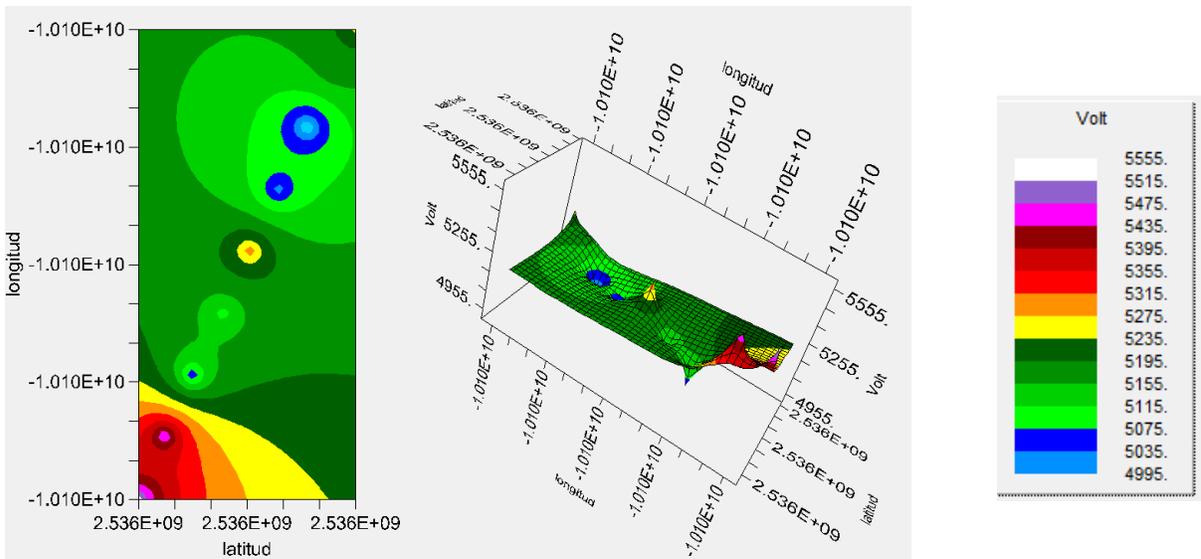
Mapa a 25 cm de distancia y 10 de profundidad



Mapa a 25 cm de distancia y 15 de profundidad



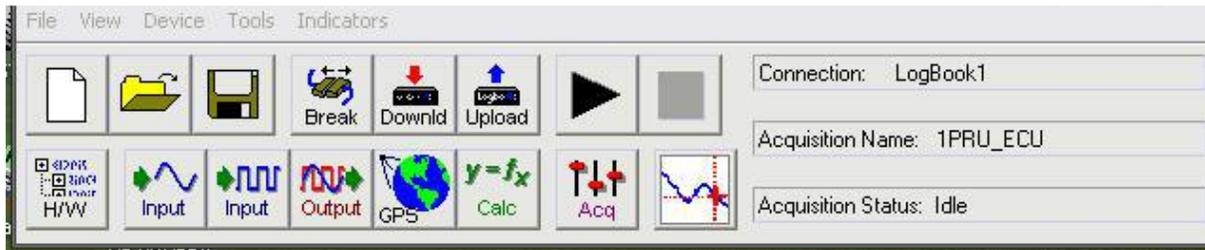
Mapa a 30 cm de distancia y 15 de profundidad



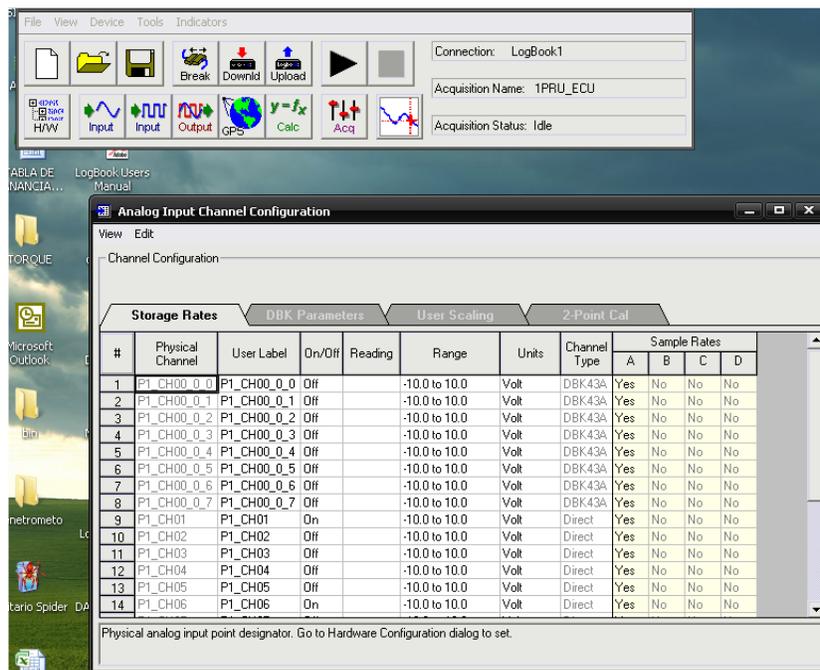
Mapa 30 cm de distancia y 15 de profundidad

7.2 Secuencia del registro de datos en el sistema de adquisición de datos Log Book 360

- Encender los equipos: PC y Log Book 360
- Abrir software

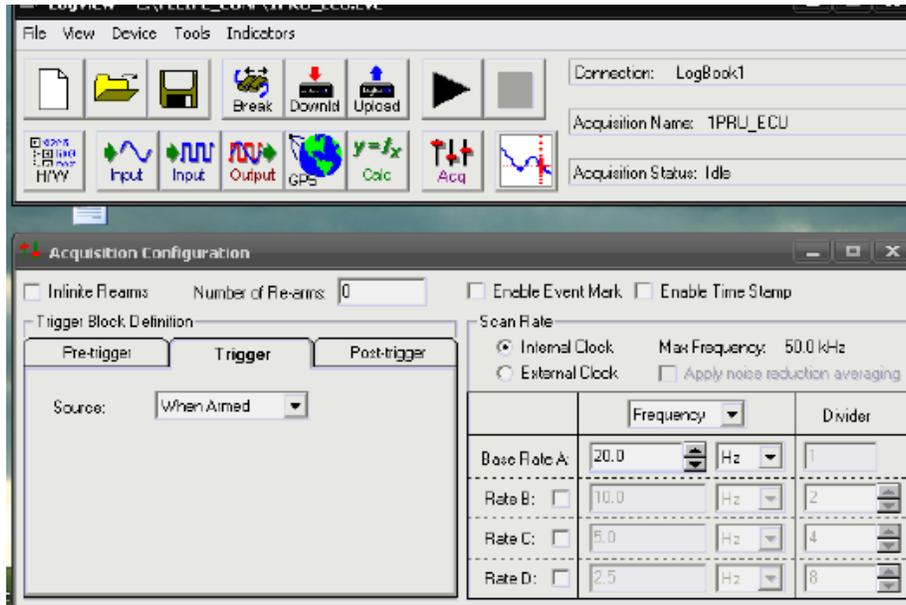


- Se abre y se configura el canal que vamos a utilizar con el cual se colectara la información hacia el Log Book360



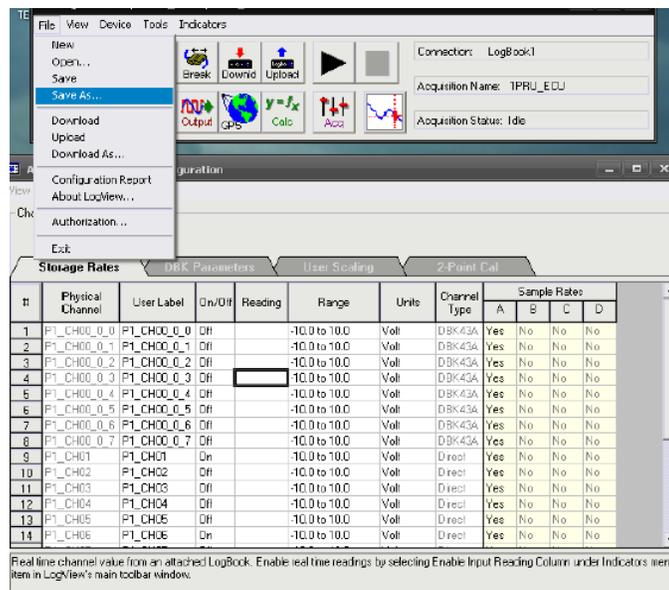
- Activamos el canal con numero 34

- En la opción de “rango” se modifica los valores que se quieren obtener, en este caso es el rango de volts que se manejaran que es de 0-20 volts.
- Configuramos el sistema de adquisición de datos; en este apartado se configura la velocidad en la que obtendremos los datos y el número de datos con lo que trabajaremos.

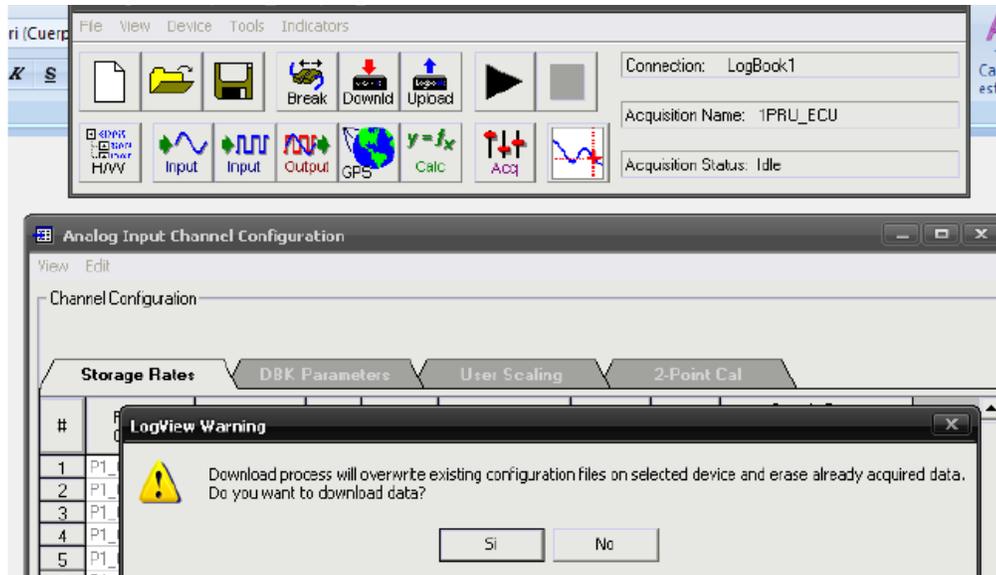


Se trabajó a 20 Hz y 1700 datos.

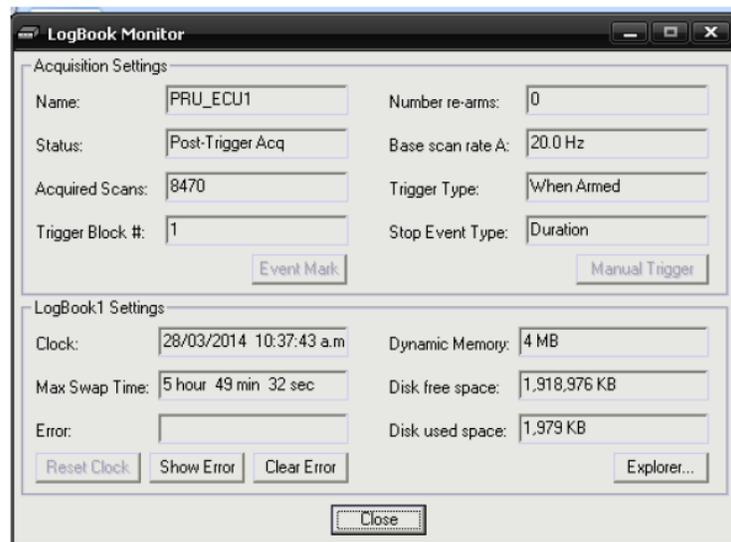
- Antes de comenzar las pruebas se tiene que guardar el archivo



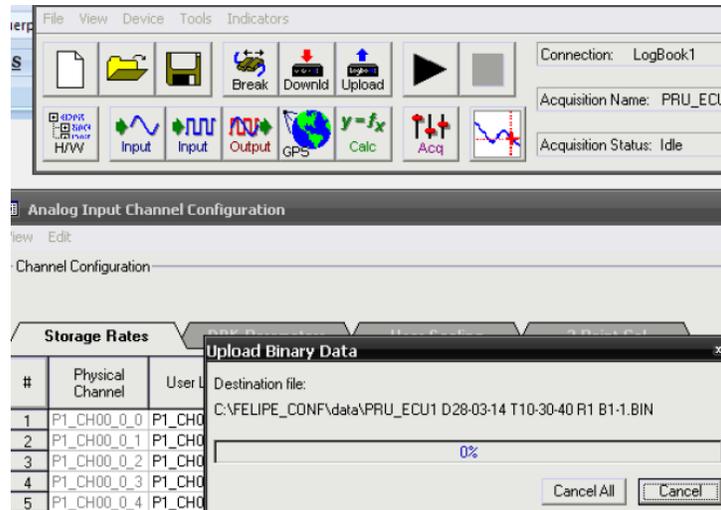
- Una vez guardado el archivo lo descargamos de la pc al Log Book 360 damos clic en el icono Downld y nos abre una ventana del LogView warning en esta damos clic en sí.



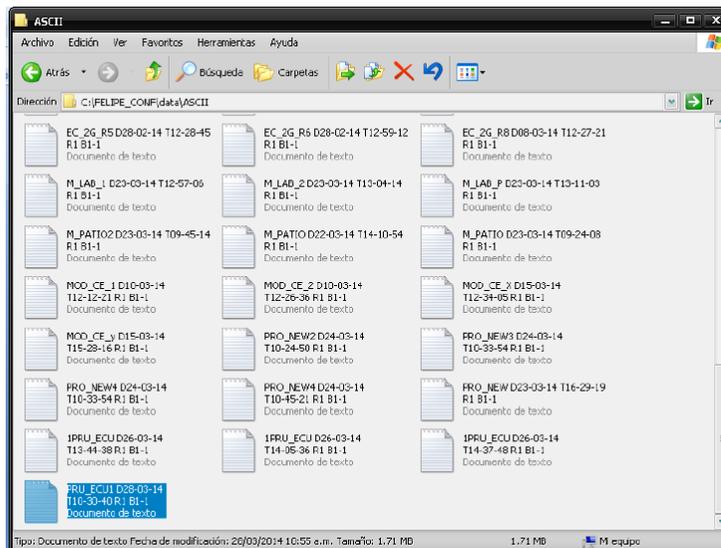
- Se le da la opción play o el icono de un triángulo
- Para visualizar el avance de los datos, damos clic en Device, LogBook Monitor.



- Al activar los iconos subimos el archivo del LogBook a la PC, para ello damos clic en Upload y podemos ver como se carga el archivo.



- Al finalizar la carga y conversión del archivo nos vamos al disco local c, en la carpeta donde se haya guardado, abrimos data, abrimos ASCII y en esta carpeta buscamos nuestro archivo, automáticamente se abre en Excel.



- Aquí se obtienen todos los datos para ser manipulados de manera que sea necesaria