



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

EQUIPO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA
DEL SUELO EN TIEMPO REAL

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

JOSÉ ORBELIN GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR:

DR. GILBERTO DE JESÚS LÓPEZ CANTEÑS



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, MÉXICO, FEBRERO 2016

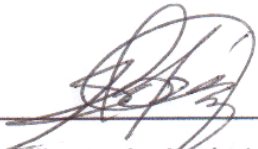


**EQUIPO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL SUELO EN
TIEMPO REAL**

Tesis realizada por **José Orbelin Gutiérrez Hernández** bajo la dirección del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA,
ORIENTACIÓN MECANIZACIÓN.**

DIRECTOR: _____


Dr. Gilberto de Jesús López Canteñas

ASESOR: _____


Dr. Eugenio Romanchik Kriuchkova

ASESOR: _____


Dr. Noel Chávez Aguilera

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por brindarme la oportunidad de continuar con mi preparación profesional.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por la formación y apoyo durante el desarrollo de mis estudios y trabajos de investigación.

Al Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs por sus aportes en mi formación académica y por su experiencia y tiempo dedicado al presente trabajo.

Al Dr. Eugenio Romatnchik Kriuchkova por sus aportes, experiencia y apoyo brindado en mis estudios de maestría y al presente trabajo.

Al Dr. Noel Chávez Aguilera por compartir sus conocimientos al presente trabajo de tesis.

Al Dr. Mario Vázquez Peña por su valioso apoyo en la parte de electrónica y entre otros apoyos brindado durante el desarrollo del proyecto.

A todos los profesores que aportaron y apoyaron para la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A México el país que me ha dado todo lo que soy y que tanto aprecio.

A mi familia que se mantiene unida y apoyando siempre.

A mi madre por toda la confianza brindada para seguir adelante con mis estudios, vivirá siempre en mi corazón, Marilú Hernández Cruz **t**.

A mi padre por sus enseñanzas y por el apoyo brindado, Esteban Gutiérrez Méndez.

A mis hermanos y hermanas por el aliento para vencer los retos de la vida.

A mi familia, mis pequeños Henry Jhonatan y Ariadna Sherley, mi esposa Danny Cindy que son una gran motivación de superación y motor de mi vida.

A la familia Ruiz López por toda la motivación brindada. Rosendo, Marlithe, Estrella y Yadira.

A mis compañeros de grupo y compañeros de IAUIA por generar el mejor compañerismo y ambiente de estudio en el posgrado.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

El autor del presente trabajo de tesis es originario de la región Centro del estado de Chiapas de nacionalidad Mexicana, nació el 16 de noviembre de 1985.

En julio del 2008 ingresó al departamento de ingeniería mecánica agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), obteniendo el título de ingeniero mecánico agrícola en Abril del 2013 mediante la tesis “Instalación de Sistemas de Auto guiado “Auto-Pilot” en Tractores John Deere en Modelos Diferentes”.

En agosto del 2013 ingresó al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la UACH, para realizar estudios de maestría.

EQUIPO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL SUELO EN TIEMPO REAL

EQUIPMENT TO MEASURE SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN REAL TIME

José Orbelin Gutiérrez Hernández¹

Dr. Gilberto de Jesús López Canteñas¹

RESUMEN

En la agricultura de precisión se requiere contar con información de las variaciones de las propiedades de suelo por sitio específico. Existen equipos que basan su funcionamiento en métodos eléctricos o electromagnéticos para la determinación de la conductividad eléctrica (CE) en tiempo real. Se diseñó y se desarrolló un circuito electrónico basado en el método resistivo y programado en Arduino, con el cual se construyó el equipo de medición de CE del suelo, el equipo fue configurado con un arreglo tipo Wenner donde los electrodos fueron de acero inoxidable 303, espaciados a cada 3.3 cm, y enterrados a 20 cm. La calibración y validación se realizó en el campo experimental la "Cerona" en las instalaciones de la UACH, latitud 19°29'3.88"N y longitud 98°54'2.22"O, los sensores de humedad se calibraron por el método gravimétrico, los electrodos de conductividad eléctrica se calibraron con el equipo TDR300, con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico en donde se encontró que el error medio muestral fue de 0.433% con 0.906 % de variación en la humedad y en la CE de 0.413 μScm^{-1} con una variación de 5.42 μScm^{-1} .

Palabras claves: Circuito Electrónico. Sensor. Mapa de Conductividad Eléctrica. Método Resistivo.

ABSTRACT

For crop management in precision agriculture, whit information on site-specific variations in soil properties is required. An electronic circuit based on the resistive method and programmed in Arduino was designed and developed, and it was used to build the easy-to-operate soil electrical conductivity equipment fed with 12V DC. The computer was configured with a Wenner-type array, where 303 stainless steel electrodes spaced every 3.3 cm and buried at 20 cm were used. Calibration and validation were performed at the UACH "Cerona" experimental field, located at 19°29'3.88 "NL and 98°54'2.22" WL. The moisture sensors were calibrated by the gravimetric method, and the electrical conductivity electrodes were calibrated with the TDR300 equipment (electrical conductivity meter). Based on data obtained in the validation, a statistical analysis was performed that found that the sample mean mistake was 0.433% with 0.906% variation in the moisture, and the electrical conductivity was 0.413 μScm^{-1} with a variation of 5.42 μScm^{-1} .

Keywords: Electronic Circuit. Sensor. Electrical Conductivity Map. Resistive Method.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE CUADROS	VII
1 INTRODUCCIÓN.	- 1 -
2. OBJETIVOS.	- 3 -
2.1 OBJETIVO GENERAL.	- 3 -
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.	- 3 -
3. REVISIÓN DE LITERATURA.	- 4 -
3.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN.	- 4 -
3.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.	- 5 -
3.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	- 6 -
3.4 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO	- 8 -
3.4.1 CONCEPTO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.	- 8 -
3.4.2 IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS.	- 10 -
3.4.3 FACTORES QUE AFECTAN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS.	- 10 -
3.4.4 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.	- 11 -
3.4.5 COMPACTACIÓN DEL SUELO.	- 12 -
3.4.6 TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELOS.	- 13 -
3.4.7 COMPOSICIÓN DEL TERRENO Y SALES SOLUBLES EN EL SUELO.	- 14 -
3.4.8 DENSIDAD APARENTE DEL SUELO.	- 14 -
3.4.9 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO.	- 15 -
3.4.10 pH (potencial de hidrogeno).	- 16 -
3.4.11 PROFUNDIDAD.	- 17 -
3.4.12 MATERIA ORGÁNICA Y CONTENIDO DE ARCILLA.	- 17 -
3.4.13 PRESIÓN OSMÓTICA.	- 18 -
3.4.14 MAPA DE RENDIMIENTO.	- 19 -
3.5 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.	- 21 -
3.5.1 MEDICIÓN POR ANÁLISIS DE LABORATORIO.	- 21 -
3.5.2 MEDICIÓN POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.	- 22 -
3.5.3 EQUIPOS CON MEDICIÓN DISCRETA.	- 25 -

3.5.4 MÉTODO RESISTIVO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	30 -
3.5.5 Puente de Wheatstone	30 -
3.5.6 EQUIPOS DE MEDICIÓN CON FUNCIONAMIENTO RESISTIVO.....	31 -
3.5.7 TIPOS DE ARREGLOS.....	32 -
3.5.8 ARREGLO DIPOLO-DIPOLO	34 -
3.5.9 ARREGLO SCHLUMBERGER	35 -
3.5.10 ARREGLO WENNER.....	35 -
3.5.11 EQUIPOS CON MEDICIÓN CONTINUA.	36 -
3.5.12 SOIL DOCTOR SYSTEM.....	43 -
4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	47 -
4.1 ÁREA EXPERIMENTAL	47 -
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ELECTRÓNICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	47 -
4.2.1 Microcontrolador.	48 -
4.2.2 Reloj de tiempo real.	50 -
4.2.3 Módulo SD Card.	50 -
4.2.4 Pantalla de cristal líquido.	51 -
4.2.5 Sensor de Temperatura.....	52 -
4.2.6 Módulo de humedad de suelo.	53 -
4.2.7 TDR 300 (Time Domain Reflectometry).	54 -
4.2.8 Acero inoxidable 304.....	55 -
4.2.9 MÉTODO GRAVIMÉTRICO.	55 -
4.2.10 GPS.	56 -
4.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.	57 -
4.3.1 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN ARDUINO MEGA 2560.....	57 -
4.3.2 VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS	60 -
4.3.3 EVALUACIÓN DEL EQUIPO.....	62 -
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	63 -
5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	63 -
5.2 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.	64 -
5.3 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES.....	66 -
5.4 COMPROBACIÓN DEL DISPOSITIVO EN CAMPO.	68 -



5.5 EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO-	
72 -	
5.6 REPRESENTACIÓN GEOESPACIAL DE LOS DATOS OBTENDIDOS EN CAMPO.....	- 74 -
5.7 ANÁLISIS DE COSTO.....	- 76 -
6 CONCLUSIONES.	- 78 -
6.1 RECOMENDACIONES.	- 79 -
8 BIBLIOGRAFÍA.....	- 80 -
ANEXOS	- 86 -

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de la Agricultura de Precisión, Fuente: Terralia (2014).....	5
Figura 2. Intercomunicación del GPS en la Agricultura de Precisión.....	6
Figura 3. Componentes del Sistema de Información Geográfica, fuente Ovalles, (2006).....	8
Figura 4. Efecto de la Sal, Humedad y la Temperatura en la CE del suelo, fuente Yanque, (2003).....	12
Figura 5. Intensidad de conductancia (mSm^{-1}) de arena, limo, arcilla y condiciones de salinidad del suelo, fuente Grisso <i>et al.</i> , (2007).....	15
Figura 6. Presión osmótica del suelo saturado en relación con la conductividad eléctrica expresada en milimhos/centímetros, fuente Enrique <i>et al.</i> , (1967).....	19
Figura 7. Comparación entre mapas de rendimiento y conductividad eléctrica del suelo, a) rendimiento de una cosecha, b) CE para el mismo lote de terreno, fuente Adanchuk <i>et al.</i> , (2002).....	21
Figura 8. Esquema de la técnica de inducción electromagnetismo en el suelo; transmisión de la corriente primaria (a b); interacción y conducción de la corriente secundaria (c); lectura de los campos magnético primario y secundario por medio de la bobina receptora (d), fuente Machado (2009).....	23
Figura 9. Equipo electromagnético EM38, fuente Geonics (2015).....	26
Figura 10. Equipo de medición de CE del suelo EM38-DD, fuente Geonics (2015).....	26
Figura 11. Equipo CDM-1, fuente Gf Instruments (2015).....	28
Figura 12. Equipo electromagnético GEM-2, fuente Gophex Ltd (2015).....	29
Figura 13. Esquema del puente de Wheatstone.....	31
Figura 14. Aplicación de corriente eléctrica al terreno, corriente I entre los electrodos AB y se mide el potencial ΔV entre el par de MN, fuente Acuña, (2011).....	32
Figura 15. Diagrama representando un disco sumergido en el suelo, fuente Acuña, (2011).....	33
Figura 16. Arreglo Dipolo-Dipolo, fuente Chelotti <i>et al.</i> , (2010); Loke, (2010)..	34
Figura 17. Arreglo tipo Schlumberger, fuente Chelotti <i>et al.</i> , (2010); Loke, (2010).....	35
Figura 18. Arreglo tipo Wenner, fuente Chelotti <i>et al.</i> , Acuña, (2010).....	36
Figura 19. Modelo Veris 2000, fuente Veris technologies, (2014).....	38
Figura 20. Equipo Quad EC1000, fuente Veris technologies, (2014).....	38
Figura 21. Dimensiones entre discos o electrodos, fuente Veris technologies, (2014).....	39
Figura 22. Tracción del V3100 con una camioneta, fuente Veris technologies (2014).....	40
Figura 23. Especificaciones técnicas del modelo V3100, fuente Veris technologies, (2014).....	40
Figura 24. Modelo V3150 equipo de CE, fuente Veris technologies, (2014)...	41
Figura 25. Especificaciones técnicas del modelo V3150, fuente Veris technologies, (2014).....	42
Figura 26. Equipo Quad 2800, fuente Veris technologies, (2014).....	42

Figura 27. Diagrama de dimensiones del equipo Quad 2800 (Veris technologies, 2014).....	43
Figura 28. a) Equipo resistivo Soil Doctor System, b) cuchillas sensoras para medir el potencial de nutrientes, nitrato (NO ₃), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fuente Geremia <i>et al.</i> , (2010).....	44
Figura 29. Equipo ERP-03 método resistivo, fuente Geocarta, (2014).....	46
Figura 30. Especificaciones técnicas del ARP-03, fuente Geocarta, (2014)....	46
Figura 31. Área experimental donde se realizaron las mediciones de conductividad eléctrica y humedad del suelo.....	47
Figura 32. Partes principales del Arduino Mega 2560.....	48
Figura 33. Parte física y esquema de conexión del RTC.....	50
Figura 34. Modulo para la SD Card.....	51
Figura 35. Pantalla de Cristal Líquido.....	51
Figura 36. Sensor de temperatura ds18b20 en capsulado.	53
Figura 37. Módulo YL-38 para la humedad del suelo.....	53
Figura 38. Equipo TDR300.	54
Figura 39. Varillas de acero inoxidable 304.....	55
Figura 40. Secado de muestras de suelo en la estufa Theco scientific.....	56
Figura 41. GPS 72H Garmin, utilizado para posicionamiento de los puntos muestreados.....	57
Figura 42. Proceso en la programación del microcontrolador Admega 2560... ..	59
Figura 43. Esquema de las posibles formas de visualizar los resultados.....	60
Figura 44. Diagrama general del sistema de adquisición de datos.....	61
Figura 45. Circuito para obtener y visualizar los datos en la LCD y para tomar las lecturas de CE.....	63
Figura 46. Diagrama de conexión de todos los componentes electrónicos del dispositivo.....	64
Figura 47. Ensamble de las piezas del circuito electrónico.....	65
Figura 48. Partes físicas importantes del equipo construido.....	65
Figura 49. Toma de muestras de suelo y toma de lectura de la CE.....	67
Figura 50. Calibración de los sensores de temperatura del suelo DS18B20... ..	68
Figura 51. Comparación de la toma de datos de la humedad (%) con las tres forma de medición por gravimetría y con los dos equipos, TDR300 y el equipo construido.....	69
Figura 52. Grafica que relaciona la humedad del suelo por gravimetría y el equipo construido.....	69
Figura 53. Residuos del modelo lineal obtenido por gravimetría.....	70
Figura 54. Grafica comparativa entre ambos equipos.....	72
Figura 55. Conductividad eléctrica del suelo con el equipo TDR 300 contra el equipo construido.	73
Figura 56. Comportamiento de los residuos de CE.....	73
Figura 57. Mapa georreferenciado de la conductividad eléctrica del suelo.....	75
Figura 58. Mapa georreferenciado de la humedad del suelo.....	76

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Comportamiento eléctrico de los tipos de suelos de acuerdo a los rangos de variación de parámetros, fuente Yanque, (2003).....	11
Cuadro 2. Rango y promedio de las zonas de CEa y rendimiento normalizado de los cultivos en 3 campañas, fuente Peralta <i>et al.</i> , (2012).....	20
Cuadro 3. Características de la placa Arduino Mega 2560, fuente Arduino (20015).....	49
Cuadro 4. Referencia de la distribución de los pines de la pantalla de cristal Líquido.....	51
Cuadro 5. Especificaciones técnicas del TDR 300.....	54
Cuadro 6. Precio de los componentes del equipo construido.....	76

1 INTRODUCCIÓN.

En la agricultura de precisión es imprescindible tener información sobre las características de la parcela, el cultivo, clima y las propiedades del suelo, para conocer la variabilidad presente.

En el caso de la salinización de un suelo puede ser definido como un proceso de acumulación en el suelo de sales solubles en agua. Este proceso puede darse en forma natural, cuando se trata de un suelo bajo y plano, que son periódicamente inundados por ríos o arroyos. Medir la conductividad eléctrica (CE) del suelo se convierte en una herramienta sumamente versátil pues es un indicador del comportamiento de numerosos parámetros del suelo (contenido de materia orgánica y agua, capacidad de intercambio catiónico, niveles de salinidad, textura, y compactación, entre otros).

El mapa de conductividad eléctrica sirve para delimitar zonas de cultivo, dosificar semilla y nutrientes, y determinar cuáles partes del campo requieren más irrigación y fertilización.

Es importante medir las variables del suelo, en este caso la conductividad eléctrica, porque de esa manera se podrá realizar el estudio de una parcela y crear un mapa para uso agrícola, sin saber qué tipos de sales existe en dicha parcela (Bullock, 2000).

La variable de conductividad eléctrica generalmente guarda relación directa con la productividad del suelo. Si bien los equipos encontrados durante la investigación son varios, una de ellas es el análisis de laboratorio el cual es un proceso muy costoso en tiempo y dinero debido a que se deben tomar muestras de suelo en varios sitios de la parcela, a diferentes profundidades y luego enviarlas a un laboratorio especializado en suelos para que realicen las determinaciones. Los hay resistivos, por inducción electromagnética, óptico y ultrasónico, de estos equipos no hay conocimiento de su desarrollo en México.

Se ha mencionado anteriormente que para medir la conductividad eléctrica del suelo existen diferentes formas, unas de las formas más sencilla para medir esta variable de CE es por el método de resistividad ya que un equipo de tipo electromagnético, ultrasónico y óptico requiere de un profundo conocimiento de las leyes que gobiernan los campos electromagnéticos en el suelo, y la interpretación de los datos suele ser una

tarea muy complicada, en comparación, el método resistivo es sencillo y no requiere de un conocimiento profundo de electricidad.

Ahora bien, ¿Por qué tanto interés en medir las variables de un suelo?, por la simple y sencilla razón de que es en el suelo donde inicia todo. Si el suelo tiene las condiciones idóneas, el cultivo crecerá y se desarrollará adecuadamente, sin embargo la mayoría de las veces no es así. Por lo tanto se debe tener un manejo adecuado del suelo. Y para realizar un manejo adecuado del suelo se deben conocer las condiciones de la misma y para ello se deben medir las variables que intervienen en el desarrollo de las plantas.

Se requiere que en México se desarrollen equipos que ayuden a los productores a practicar una agricultura más eficiente, la intención de este trabajo es diseñar y construir un equipo que ayude a obtener información sobre el suelo para poder realizar un manejo más adecuado del suelo, por ejemplo, para identificar y delimitar zonas del suelo con características iguales o distintas y así implementar prácticas de dosis variables que repercutan en los costos de producción y permita a los productores ser más competitivos.

2. OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar un equipo portátil para medir la conductividad eléctrica del suelo en tiempo real, mediante el método resistivo.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.

- Diseñar y programar el sistema eléctrico del equipo para medir la conductividad eléctrica.
- Construir el equipo de conductividad eléctrica del suelo
- Calibrar los sensores de humedad del suelo.
- Calibrar y evaluar el equipo para su validación.

3. REVISIÓN DE LITERATURA.

3.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

Dentro del marco de la agricultura de precisión (AP), conocer las propiedades del suelo no solo da una guía para un adecuado manejo del suelo, proporciona además otros beneficios, como reducir la cantidad de insumos utilizados, gracias a la aplicación discriminada de los mismos, que se traduce en menores costos y mejores ganancias económicas (Ruiz, 2011; *Marioni, 1996*).

La agricultura de precisión tiene como objetivo, poner a disposición del agricultor toda información necesaria sobre las variaciones agronómicas dentro de la parcela, para que en cada metro cuadrado de terreno se labre, fertilice, siembre, riegue, entre otros parámetros de medición, en la proporción idónea para conseguir la máxima producción posible en cada punto. Esto conlleva a definir el ciclo de agricultura de precisión (AP), en la Figura 1, se hace describe de forma esquemática el procedimiento necesario para el desarrollo adecuado de una AP. (Valero, 2014).

Debido a la variabilidad de los suelos en particular de los atributos relacionados con la fertilidad, surge la necesidad de desarrollar metodologías para la aplicación variable y selectiva de los fertilizantes, que posteriormente pueden ser extendidas al uso de otros insumos como es el caso del uso de los mapeos de conductividad eléctrica del suelo (Ovalles, 2006).

En resumen, la AP está relacionada con el convencimiento que existe una variabilidad importante en las condiciones del uso del suelo, bajo las cuales se desarrollan los distintos tipos de sistemas de producción y la relación existente entre la variabilidad de los recursos y los rendimientos obtenidos. Creándose así unidades relativamente uniformes desde el punto de vista de los usos agrícolas y requerimientos de manejo (Ovalles, 2006).

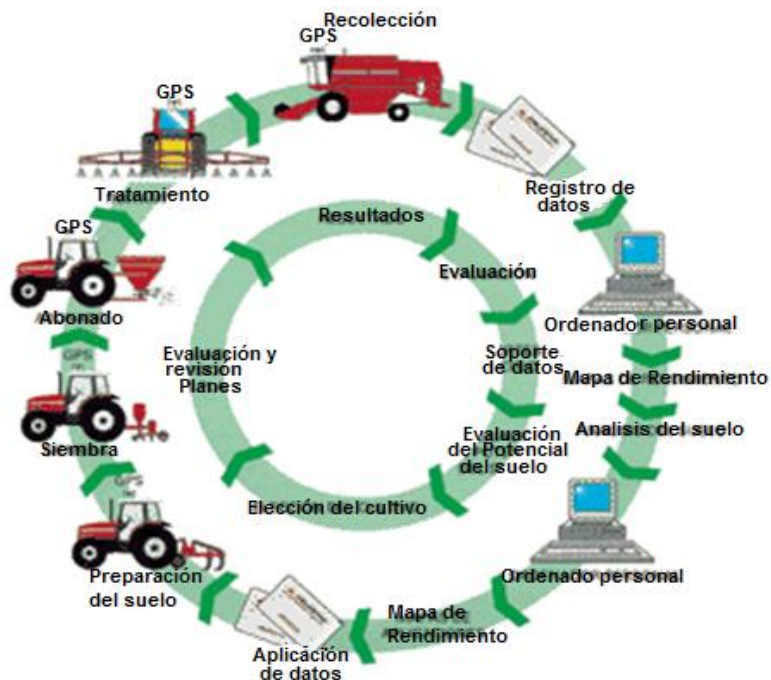


Figura 1. Ciclo de la Agricultura de Precisión
Fuente: Terralia (2014).

3.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.

Dado que la agricultura de precisión se basa en la localización exacta de las variaciones dentro de la parcela, es imprescindible el uso de un sistema que permita identificar de manera unívoca la posición de la maquinaria trabajando en el campo con relación a las coordenadas terrestres (latitud, longitud). Esto es posible gracias al uso de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y de las comunicaciones de las redes de satélites que brindan en tiempo exacto la ubicación de los equipos utilizados. Por ejemplo la máquina (tractor, cosechadora) disponen de un receptor por el que le llegan las señales desde varios satélites, y el sistema electrónico la cual es capaz de calcular las coordenadas correspondientes (Valero, 2014).

Lo importante es que la precisión en la localización de un punto del terreno que proporcionan estos sistemas, es baja (está disminuida a propósito) y sólo llega a +/-100 m ó +/- 35 m respectivamente, lo cual es insuficiente para el uso agrícola. Este problema se solventa mediante la implantación del sistema DGPS o GPS diferencial, que se basa en la instalación de antenas emisoras auxiliares en lugares

estratégicos, de forma que la señal conjunta de éstas y los satélites permiten corregir los errores de posicionamiento y llegar a precisiones cercanas al centímetro (Valero, 2014).

El sistema GPS está constituido por dos sistemas intercomunicados que son utilizados para poder llevar a cabo la recopilación de datos de campo, denominado estación base y estación móvil (Figura 2). La estación base está constituida a su vez por tres elementos, el radio módem, la antena de recepción y el GPS base y la estación móvil o remota, está constituida por cuatro partes que son; la estación remota, o móvil, la antena de recepción el radio módem, y una computadora.

El uso de los GPS, es para posicionar los puntos (latitud y longitud) tomados en las parcelas de cultivos, en este caso los sitios tomados son para generar un mapeo de conductividad eléctrica del suelo.

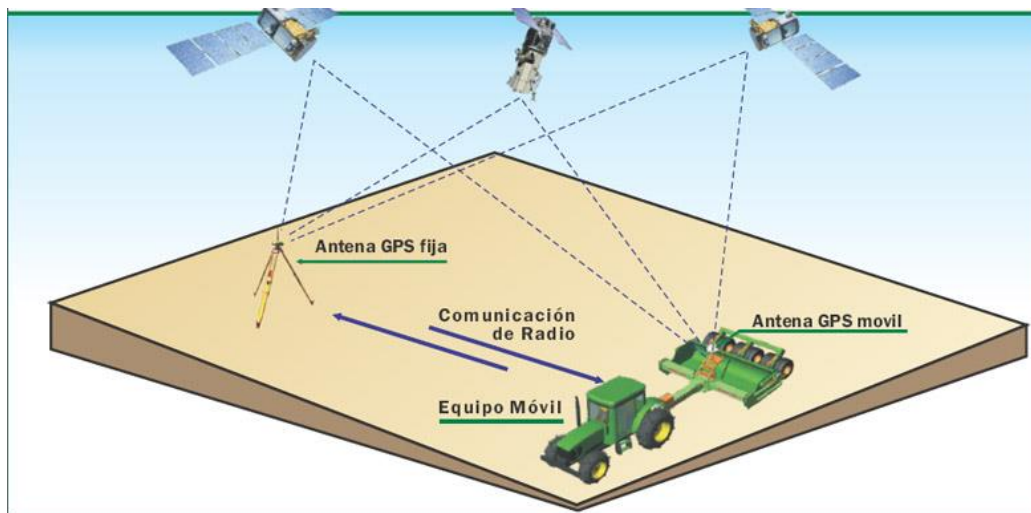


Figura 2. Intercomunicación del GPS en la Agricultura de Precisión.

3.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

El termino Sistema de Información Geográfica (SIG), es la ciencia al sistema de información orientada a la gestión de datos espaciales que constituyen la herramienta informática más adecuada y extendida para la investigación y el trabajo profesional en ciencias de la tierra y ambiental (Alonso, 2006). También lo definen como una integración organizada de hardware, software y datos geográficos, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la

información geográficamente referenciada con el fin de solucionar dificultades complejas relacionadas con los procesos de planificación y gestión, relacionándolo con las coordenadas terrestres constituida para satisfacer necesidades concretas de información (Santovenia *et al*, 2009).

Los inventarios a distintas escalas han generado altos volúmenes de datos, de ahí que la evolución natural fue hacia el desarrollo de sistemas de información, bajo la premisa de la integración espacial de los datos. Un SIG se compone de elementos para su desarrollo como se muestra en la Figura 3.

Laslett (1987) indica que la organización, manipulación y representación gráfica de los datos espaciales del suelo y la conductividad eléctrica (*CE*) se logra mejor con un sistema de información geográfica (SIG). Los datos espaciales de las propiedades del suelo se introducen en cualquiera de los varios paquetes de software SIG como ArcView o ArcGIS. Una vez que los datos espaciales se introducen, se pueden crear fácilmente mapas de las propiedades físico-químicas del suelo. Se pueden utilizar una variedad de técnicas de interpolación, tales como la ponderación inversa a la distancia y diversas técnicas kriging.

Warrick (1988); Leenaers *et al.*, (1990); Kravchenko y Bullock, (1999), en sus trabajos previos llegan a la conclusión de que las técnicas kriging son mejores para la interpolación de las propiedades del suelo. Para determinar que método es mejor para un determinado conjunto de datos espaciales puede utilizarse el método estadístico “jackknifing” porque permite determinar el método de interpolación que minimice el error de predicción (Isaaks y Srivastava, 1989).

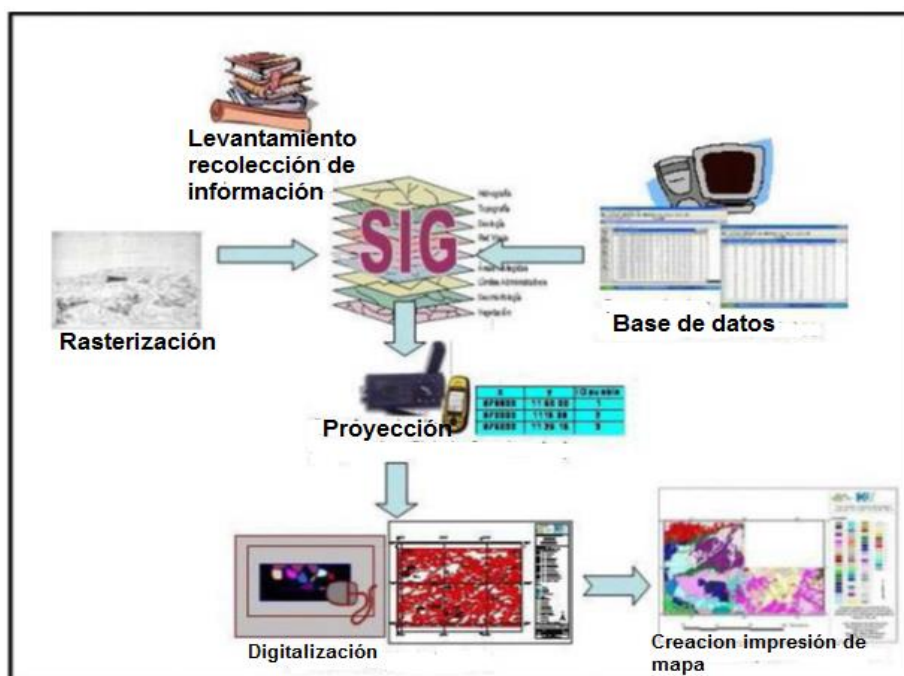


Figura 3. Componentes del Sistema de Información Geográfica, fuente Ovalles, (2006).

3.4 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.

La conductividad eléctrica (CE) es la medida total de sales en solución, es el factor que influencia la habilidad de las plantas para absorber agua. En aplicaciones agrícola, el monitoreo de salinidad ayuda a manejar el efecto de sales solubles en el crecimiento de las plantas. La CE es un indicador importante de calidad de agua, salinidad de suelo y concentración de fertilizantes. La unidad de conductividad eléctrica es el Sm^{-1} , para las mediciones de la CE del suelo se cuantifica en valores entre $0\text{-}0,8 \text{ dSm}^{-1}$ ($0\text{-}800 \mu\text{Scm}^{-1}$) los cuales son aceptables para el crecimiento de los cultivos (Romero *et al.*, 2009).

Por otro lado, los indicadores de CE del suelo integran factores que afectan su medición, como lo son la humedad del suelo, temperatura, compactación, capacidad de intercambio catiónico, etc.

3.4.1 CONCEPTO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.

Las mediciones de la conductividad eléctrica se remonta al menos a la última parte del siglo XIX cuando Whitney *et al.*, (1897) intento inferir el contenido de agua y la salinidad a partir de las mediciones de la CE del suelo usando una sonda de dos electrodos. Gardner (1898) y Briggs (1899) reportaron mediciones adicionales como par del grupo inicial de científicos del USDA (United Department of Agriculture) que investigaban los

efectos de la temperatura del suelo, salinidad y contenido de agua sobre la CE del suelo. Frank Wenner (1915) introdujo la teoría de utilizar cuatro electrodos igualmente espaciados para medir la conductividad del suelo.

La salinidad se refiere a la presentación de los principales solutos orgánicos disueltos en la fase acuosa del suelo que consiste de sales solubles y fácilmente disolubles en el suelo y puede ser determinado por la medición de la concentración total del soluto de la fase acuosa del suelo, más comúnmente conocida como solución del suelo. La determinación de la concentración total del soluto a través de la medición de la conductividad eléctrica ha sido bien establecida desde hace medio siglo (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

Los principios básicos de la teoría para medir la conductividad eléctrica del suelo es la resistividad eléctrica determinada por la distribución de la resistividad del volumen del suelo. Las cuales miden la diferencia de potencial resultante en el suelo. Para los cuerpos simples, la resistividad ρ ($\Omega \text{ m}$) se define como se indica en la siguiente expresión.

$$\rho = R \left(\frac{S}{L} \right) \quad (1)$$

Donde; R es la resistencia eléctrica (Ω), L la longitud del cilindro (m) y S el área de la sección transversal (m^2). La resistencia eléctrica de un cuerpo cilíndrico R (Ω), se define por la ley de Ohm como se muestra en la siguiente expresión.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Donde; V es el potencial o voltaje (V), e I es la corriente (A), esta característica eléctrica también es comúnmente descrita por el valor de la conductividad expresado σ , igual a la inversa de la resistividad del suelo. Por lo tanto la expresión con la cual se puede calcular la CE, es la que se describe a continuación (Samouëlian *et al.*, 2005).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

La unidad de medición es el Siemens por metro (Sm^{-1}) que equivale a $\Omega \text{ m}^{-1}$. Para facilitar los cálculos y evitar el uso de decimales, es habitual utilizar otras unidades,

tales como el Scm^{-1} que es cien veces menor que él (Sm^{-1}) o decisiemen por metro (dSm^{-1}), los milisiemen por centímetro ($mScm^{-1}$) o los microsiemen por centímetros (μScm^{-1}) (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

3.4.2 IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS.

Si bien la teoría científica permite llegar a una expresión matemática para indagar la conductividad microscópica, es en verdad muy difícil de aplicar en la práctica y, por otro lado, aunque los efectos de ciertas heterogeneidades son relativamente sencillos de determinar en electrodos elementales, no resulta así en el caso de electrodos múltiples (Acuña , 2011).

La importancia de medir la conductividad eléctrica de los suelos agrícolas, permite evaluar el estado y la calidad del suelo, constituyéndose en indicadores de la eficacia de las obras de bioingeniería

La medición de la conductividad eléctrica del suelo es muy importante ya que de acuerdo a los resultados obtenidos se puede hacer una planeación a corto, mediano y largo plazo (1 a 5 años) para la producción agrícola y de esa manera reducir los costos de producción por hectáreas.

La contaminación de los suelos agrícolas está muy ligado con las aplicaciones no adecuadas de los fertilizantes, químicos, entre otras aplicaciones que se le hace al cultivo en el transcurso de su desarrollo, es por eso que medir la conductividad eléctrica del suelo es importante debido a estos problemas ocasionados por el mal manejo de los suelos (Romero *et al.*, 2009).

3.4.3 FACTORES QUE AFECTAN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS.

El suelo al igual que cualquier material, es susceptible de aplicaciones y usos para distintos fines, en el presente caso interesa examinar su desempeño eléctrico a partir de los parámetros básicos; debido a su gran variedad de composición y entornos que le influyen. Sólo es posible clasificarlos de manera referencial, a partir de los rangos de CE que se pueden caracterizar con medidas directas como se puede apreciar en el

Cuadro 1. Donde se hace referencia sobre el comportamiento eléctrico de suelos homogéneos trabajables típicos en la agricultura.

Cuadro 1. Comportamiento eléctrico de los tipos de suelos de acuerdo a los rangos de variación de parámetros, fuente Yanque (2003).

Suelos Trabajables Básicos	Rangos de Variación de Parámetros				
	Contenido de Humedad % (Peso seco)	Conductividad eléctrica. Húmedo a seco $\rho(\Omega.m)$	Permisividad de Seco a Húmedo $\epsilon_r(pFm^{-1})$	Grado dispersión PONER COMPLETO Alta a Baja F. $E_s(kVm^{-1})$	Densidad de corriente J (Am^{-2})
Arcilla y Limos Finos	Húmedo 5% - 10%	Hasta 100	30 - 40	200-350	2500-3000
Tierra finas y Fangos	Muy Húmedo 10% - 20%	100 – 200		150-300	
Tierra Aluvial y Areniscas	Poco Húmedo 3% - 5%	200 - 500	20 – 30	250-350	600-700
Arena Eólica y Arena Firme	Medio Seco 1% - 3%	500 – 1500	10 – 20	350-400	250 - 300
Rocas Estratificadas y alteradas	Seco Aireado 0.1% - 1%	1500 – 3000	2 - 10	200-300	50 - 60
Mezcla Tierra Feldespatos, Micas, Cuarzos	Secos y Húmedo 0.1% - 5%	3000 - 45000		200-450	

La conductividad eléctrica es un promedio de la circulación de la electricidad por tres vías distintas (Rhoades et al, 1989).

- 1) Fase líquida del suelo que tiene nutrientes disueltos.
- 2) Fase sólido-líquida debido al intercambio de cationes asociados con arcillas y minerales.
- 3) Fase solidad derivada del contacto físico entre partículas sólidas.

3.4.4 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.

Para los fines del uso del suelo de un sitio como medio conductor, se les somete a análisis de laboratorio, físicos, químicos y mecánicos, a partir de cuyos resultados se especifican complementos o modificaciones con distintos tratamientos o agregados de alcance local que propician su mejor comportamiento eléctrico, siendo inocuos para el

medio ambiente y mínimamente agresivos para los materiales de obra que están en sus inmediaciones (Yanque, 2003).

De otro lado, la influencia del nivel de pH en la Resistividad depende del contenido de humedad, principalmente cuando el suelo tiene una humedad entre 13% y 25,5%; la CE aumenta y cuando el pH del suelo se encuentra entre 6 y 14 la CE aumenta de manera significativa (Araujo, 1979).

La estandarización de las mediciones exige, en consecuencia, la compensación del efecto de la humedad, o bien la realización de mediciones a un contenido de humedad más o menos constante, siendo el de capacidad de campo el más idóneo (Figura 4). Para realizar mediciones próximas a este contenido de humedad se aconseja esperar 2 o 3 días tras un riego o una lluvia intensa. Existen pues, varios tipos de sonda para realizar las mediciones de conductividad eléctrica del suelo (IVIA, 2011).

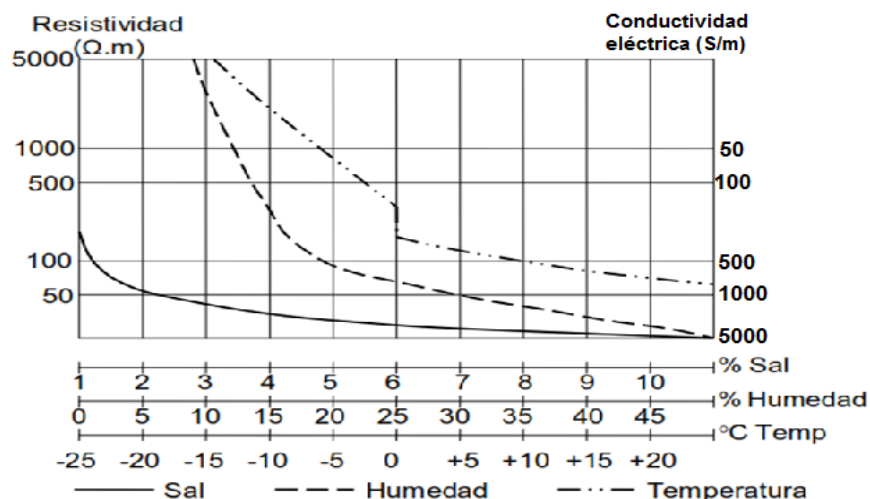


Figura 4. Efecto de la Sal, Humedad y la Temperatura en la CE del suelo, fuente Yanque, (2003).

3.4.5 COMPACTACIÓN DEL SUELO.

Una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas y se logra una mejor conducción a través de la humedad contenida. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor acercamiento entre éstas obteniendo una mejor conducción del suelo (Acuña, 2011).

En los suelos compactados y con humedad a capacidad de campo se obtienen mejores lecturas de la conductividad eléctrica, esto porque se convierte en un medio sólido, permitiendo mejor la conducción del suelo.

3.4.6 TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELOS.

La mayoría de los terrenos son muy buenos aislantes cuando su contenido de humedad es cero. Sin embargo, su comportamiento con humedad inferior al 2% es de poco interés práctico ya que tal estado rara vez se encuentra en la realidad. Tanto un aumento de humedad como de temperatura generan una reducción en el valor de resistividad; sin embargo, el grado de dependencia varía según dos zonas normalmente bien marcadas: la sensibilidad es muy fuerte en la zona de bajos porcentajes de humedad y bajas temperaturas, pero se reduce notablemente con altos valores de humedad o temperatura.

Existe una expresión analítica aproximada que intenta cuantificar la influencia de estos dos parámetros en el valor de resistividad y que pretende ser independiente del tipo de terreno (Qqueshuayllo, 2005).

$$\rho = \frac{1.3 \cdot 10^4}{(1+0.73H^2)(1+0.03T)} \quad \text{donde } T > 0^\circ\text{C}, \quad (4)$$

En esta expresión, conocida como "ecuación de Albrecht", se incorpora la humedad del suelo, en % de peso (H) y su temperatura en grados Celsius (T). Se recomienda su utilización sólo para el cálculo comparativo de la influencia de los parámetros en la resistividad del terreno.

De lo señalado, cabe esperar que la resistividad de un terreno varíe sustancialmente según las estaciones del año, en particular la zona próxima a la superficie. Esto trae como consecuencia, en primer lugar, la conclusión que un conjunto de electrodos enterrados a mayor profundidad tiene características más estables que uno superficial; en segundo lugar, es recomendable efectuar las mediciones de campo en la época del año en que se prevé un mayor valor, lo cual otorga mayor seguridad al diseño del equipo para medir la conductividad eléctrica. Normalmente, será conveniente efectuar las medidas de campo durante el verano (Acuña, 2011).

3.4.7 COMPOSICIÓN DEL TERRENO Y SALES SOLUBLES EN EL SUELO.

La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500 Ohm*m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 Ohm respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 Ohm*m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 Ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible.

La resistividad del suelo es determinada también por su cantidad de electrolitos; esto es, por los minerales y sales disueltas. Como ejemplo, para valores de 1% (por peso) de sal (NaCl) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero, para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta (Acuña, 2011).

Además, como cada capa de suelo tiene una composición diferente, cada una de estas tiene una resistividad distinta dependiente de estos dos factores.

3.4.8 DENSIDAD APARENTE DEL SUELO.

La densidad aparente refleja el contenido de poros en el suelo, es importante porque denota el nivel de compactación del suelo y por ende la facilidad con que se produce la movilización del aire, el agua y por lo tanto los nutrientes. En cuanto a la magnitud de la porosidad total, es mayor cuando en la textura dominan las fracciones finas que cuando dominan las gruesas. Los suelos arcillosos poseen más porosidad total que los arenosos. Tomando en cuenta esto se puede deducir que los suelos que presentan menor conductividad son los suelos de textura arenosa y los suelos con mayor conductividad son los suelos arcillosos como se puede observar en la Figura 5 (Corwin *et al.*, 2008; Barry *et al.*, 2008).

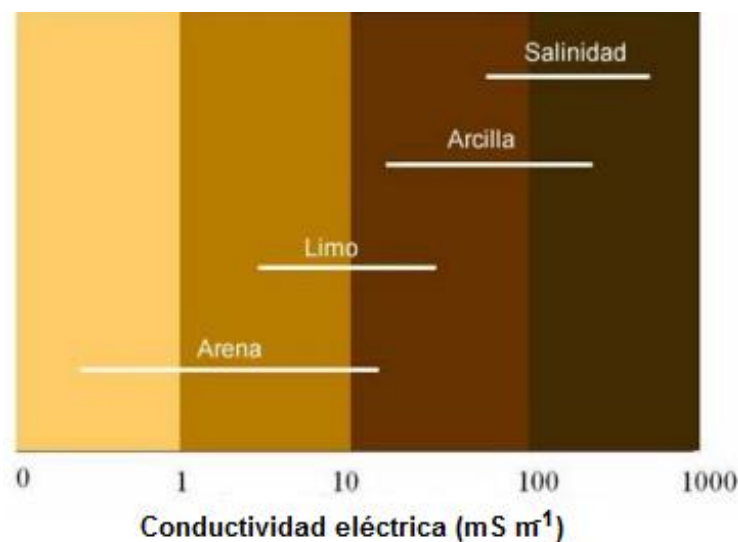


Figura 5. Intensidad de conductancia (mS m^{-1}) arena, limo, arcilla y condiciones de salinidad del suelo, fuente Grisso *et al.*, (2007).

3.4.9 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO.

La sustitución de iones diferentes de los que normalmente componen la red cristalina de los minerales de arcilla y los grupos funcionales que forman partes de la estructura química del humus generalmente produce un gran número de sitios discretos cargados negativamente sobre la superficie de las partículas de minerales de arcilla y materia orgánica. Los cationes son atraídos electrónicamente y se adhieren a los sitios de las superficies cargados negativamente, la cantidad de sitios de las superficies cargadas negativamente por la cantidad total de suelo seco se conoce como capacidad de intercambio catiónico (Barry *et al.*, 2008).

Los cationes son desplazados por otros cationes que están presentes temporalmente en los suelos, el desplazamiento y el movimiento de cationes de un sitio de intercambio a otros produce un mecanismo por lo que la corriente eléctrica es, esencialmente, transmitida electrónicamente a través del suelo a lo largo de las superficie de las arcillas minerales y materia orgánica (Muñoz *et al.*, 2000). Asumiendo que las condiciones son lo suficientemente húmedas, la presencia de minerales de arcilla y materia orgánica en cantidades significativas incrementará la capacidad del suelo para transmitir corriente eléctrica, que corresponde a un valor de resistividad más bajo del que hubiera sido obtenido si los minerales de arcilla y la materia orgánica no estuvieran presentes.

El mecanismo de transferencia de corriente electrolítica facilitado por los minerales de arcilla y la materia orgánica depende del número de sitios de las superficies cargadas negativamente. Por consiguiente, se espera una fuerte corriente inversa entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la resistividad eléctrica, aun así, diferentes minerales de arcilla presentan diferentes valores de CIC (Barry *et al.*, 2008).

3.4.10 pH (potencial de hidrogeno).

El pH gobierna parte de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de las arcillas minerales y toda la CIC de materia orgánica del suelo. La implicación resultante son respecto a la dependencia de la CIC en el tiempo de minerales de arcilla y el pH, es que hay una relación inversa entre la resistividad eléctrica y la cantidad total de minerales de arcilla y materia orgánica presente, probablemente no sea tan fuerte como la relación inversa entre la CIC y la resistividad eléctrica, asumiendo que este mecanismo domina, gracias a los minerales de arcilla y la materia orgánica, el transporte de corriente electrolítica (Barry *et al.*, 2008).

De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica, pH y porcentaje de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- a) Suelos salinos. Se caracterizan porque su extracto de saturación tiene un valor de conductividad eléctrica igual o superior que 4 mmhoscm^{-1} a 25°C y la cantidad de sodio intercambiable es menor de 15%. Por lo general tienen una costra de sales blancas, que pueden ser cloruros, sulfatos y carbonatos de calcio, magnesio y sodio.
- b) Suelos sódicos. Presentan un color negro debido a su contenido elevado de sodio. Su porcentaje de sodio intercambiable es mayor que 15, el pH se encuentra entre 8.5 y 10.0, y la conductividad eléctrica está por debajo de 4 mmhoscm^{-1} a 25°C .
- c) Suelos salino-sódicos. Poseen una conductividad eléctrica de 4 mmhoscm^{-1} a 25°C , una concentración de sodio intercambiable de 15% y el pH es variable, comúnmente superior a 8.5 mmhoscm^{-1} (Muñoz *et al.*, 2000).

La conductividad eléctrica se puede complementar con la determinación de Na^+ o bases intercambiables (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+). Principalmente si los suelos fueron contaminados con aguas congénitas.

3.4.11 PROFUNDIDAD.

Las variaciones de CE con la profundidad se deben principalmente a los cambios en la salinidad, textura y contenido de agua. Los niveles de salinidad pueden cambiar muy rápido con la profundidad, no es raro ver en algunas regiones áridas fluctuaciones en los niveles de salinidad del perfil de suelo de manera significativa en el primer metro de profundidad de suelo.

El contenido de agua tiende a incrementarse con la profundidad y variará de acuerdo con la distribución de la textura. La distribución de la textura es principalmente una consecuencia de los procesos de formación de suelo, sin embargo, los efectos antropogénicos pueden resultar en un incremento de la uniformidad de la textura dentro de la capa superior del suelo o puede producir otras variaciones localizadas. La salinidad variará en el perfil del suelo principalmente a partir de los procesos de filtración y de los efectos químicos y topográficos (Corwin *et al.*, 2005).

3.4.12 MATERIA ORGÁNICA Y CONTENIDO DE ARCILLA.

La mayoría de los suelos, tienen cantidades significativas de minerales de arcilla (capas de aluminosilicatos) y materia orgánica. La materia orgánica del suelo se puede dividir en dos componentes. El primer componente incluye un pequeño porcentaje del total de la materia orgánica del suelo e incluye organismos vivos (gusanos, bacterias, hongos, etc.) y sustancias no descompuestas como raíces de plantas muertas. El segundo componente, representa la gran mayoría de la materia orgánica del suelo, es el estable, residuo descompuesto llamado “humus” (Bohn *et al.*, 1979). Esta porción estable y descompuesta de la materia orgánica del suelo es la que afecta la conductividad eléctrica del suelo (Barry *et al.*, 2008).

Los suelos que contienen cantidades significativas de minerales de arcilla y materia orgánica, bajo determinadas condiciones de humedad, existe un efecto adicional causado por la presencia de minerales de arcilla y materia orgánica, que tienden a mejorar el flujo de corriente eléctrica. (Barry *et al.*, 2008).

Por otra parte conforme la temperatura cae por debajo de los 0°C los iones disueltos tienden a migrar fuera de la parte de la solución del suelo que comienza a congelarse, causando que la solución del suelo no congelada junto a las superficie de los materiales de arcilla y materia orgánica se vuelva mucho más concentrada con los iones disueltos. La principal consecuencia para suelos que contienen cantidades significativas de minerales de arcilla y materia orgánica es que estos suelos mantienen su habilidad para transferir corriente eléctrica, incluso cuando las temperaturas caen por debajo de los 0°C por prolongados periodos. Por lo tanto, cuando la temperatura se quedan en 0°C o por debajo por un extenso periodo, los suelos que contienen cantidades significativas de minerales de arcilla y materia orgánica por lo general tendrán valores de resistividad eléctrica más bajo que aquellos suelos que contienen pocos minerales y materia orgánica (Barry *et al.*, 2008).

3.4.13 PRESIÓN OSMÓTICA.

Los experimentos han demostrado que hay estrecha relación entre el crecimiento de la planta y la presión osmótica de la solución del suelo. En cantidades equivalentes los cloruros son más definidos para el crecimiento de la planta que los sulfatos, pero desde el punto de vista osmótico hay pequeñas diferencias, esto indica, que la concentración total de sales en solución es la principal responsable de los efectos dañinos de las soluciones salinas en los crecimientos de los cultivos (Enrique *et al.*, 1967).

Es posible extraer la solución del suelo y determinar su presión osmótica, pero esto es un procedimiento más difícil que estimar la concentración de las sales determinando la conductividad eléctrica de un extracto de suelo saturado de agua (extracto de saturación). La conductividad eléctrica de la solución de suelo, extractada de un suelo saturado, es directamente a su presión osmótica como se muestra en la Figura 6, los valores de la presión osmótica fueron calculados de las medidas del punto de congelación. La presión osmótica en atmosfera es aproximadamente 3 veces la conductividad eléctrica del suelo expresado en millimhoscm⁻¹, por lo tanto se puede estimar la presión osmótica de la solución del suelo de las medidas de la conductividad (Enrique *et al.*, 1967).

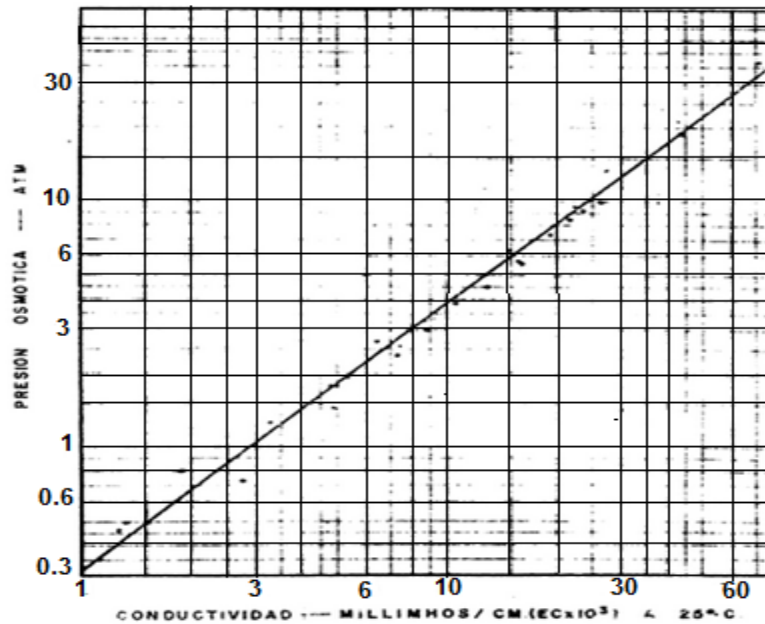


Figura 6. Presión osmótica del suelo saturado en relación con la conductividad eléctrica expresada en milimhos/centímetros, fuente Enrique *et al.*, (1967).

3.4.14 MAPA DE RENDIMIENTO.

Los mapas de rendimiento de cultivos tienen una estrecha relación con los mapas de conductividad eléctrica del suelo. De acuerdo a Peralta *et al.*, (2012) en los mapas de CE y de Rendimientos se observa la existencia de patrones en la variabilidad espacial, a partir de esto, se tiene una base efectiva para poder delimitar zonas de manejos homogéneos y ofrecer un marco de trabajo útil para el muestreo de suelo (Johnson *et al.*, 2001).

Una investigación hecha por Peralta (2012), en la cual hicieron una delimitación de zonas de manejos homogéneas de suelo, en donde tomaron un mapa de rendimiento de 3 campañas de diferentes cultivos, trigo, soja y cebada, presentando diferencias significativas entre las zonas delimitadas por la CE, el trabajo se caracterizó en tres categorías, zona bajas, zona media y zona alta. En donde la CE es baja, el rendimiento promedio normalizado representa -12% por debajo del rendimiento promedio para todo el lote, mientras que en la zona alta con CE alta, el rendimiento fue de +24% por encima del promedio de todo el lote.

En las zonas bajas CE se encuentran los menores contenidos de arcilla, materia orgánica, Humedad del suelo y CIC, son áreas con poca disponibilidad de agua para los cultivos afectando negativamente al rendimiento. Y en la zona de alta CE se

encuentran los mayores contenidos de los materiales mencionados, son zonas de mayor contenido de agua disponible para los cultivos, posibilitando que en estas zonas los rendimientos sean mejores (Peralta *et al.*, 2010, 2012). En la Figura 7, se puede observar las tres zonas bien caracterizada de los datos de los mapas de rendimiento y de los datos obtenidos por la medición de la CE con el equipo Veris 3100.

La CE del suelo no tiene efecto directo sobre el crecimiento de la cosecha o su rendimiento. La utilidad de los mapas de CE proviene de las relaciones que comúnmente se presenta entre la CE y una variedad de otras propiedades del suelo que se encuentran íntimamente asociadas con la productividad de una cosecha. Estas incluyen propiedades tales como capacidad para almacenar agua, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, drenaje del suelo, nivel de materia orgánica, niveles de nutrientes, salinidad y características del subsuelo (Doerge *et al.*, 2010).

Los valores obtenidos en la cosecha y con el equipos Veris 3100 son los que se muestran a en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Rango y promedio de las zonas de CE y rendimiento normalizado de los cultivos en 3 campañas, fuente Peralta *et al.*, (2012).

zonas	CE(mSm ⁻¹)		Rendimiento (tonelada)						Rendimiento Promedio.	
	Prom.	Rango	Trigo Prom.	2005/06 EE*	Soja Prom.	2008/09 EE	Cebada Prom.	2009/10 EE	Normalizado Prom.	(%) EE
Bajas	15	7-19 19	83	0.63	83	0.77	83	0.54	83	0.54
Media	21	24 24	98	0.66	93	0.76	96	0.59	95	0.59
Alta	27	35	113	0.66	120	0.96	116	0.71	116	0.71

Prom, promedio; EE, error estimado en %.

Con un adecuado control de campo, los valores de CE pueden usarse como medida sustituto para las propiedades que afectan el rendimiento de una cosecha. En general, la correlación entre la CE del suelo y rendimiento será mayor cuando el rendimiento está controlado principalmente por la capacidad del suelo para almacenar agua (Figura 7) (Doerge *et al.*, 2010).

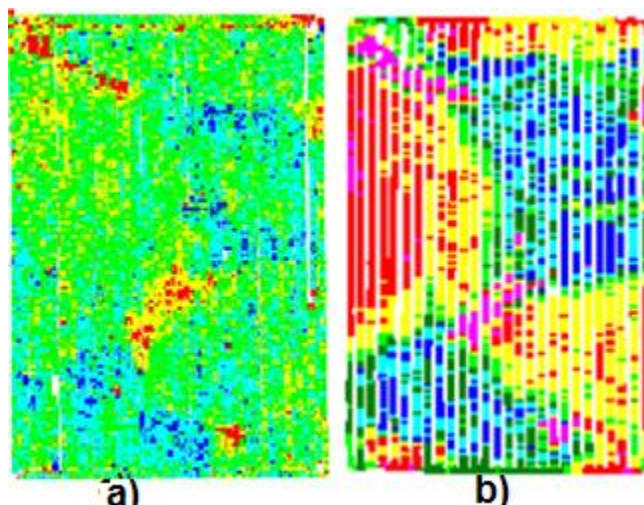


Figura 7. Comparación entre mapas de rendimiento y conductividad eléctrica del suelo. a) rendimiento de una cosecha. b) CE para el mismo lote de terreno, fuente Adanchuk *et al*, (2002).

3.5 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.

Para determinar la conductividad eléctrica en los suelos agrícolas existen diferentes métodos, como pueden ser el método resistivo o por inducción electromagnética, también puede ser medido por ultrasonido y por rayos láser (óptica), al igual puede ser medida en laboratorio. Siendo los dos primeros métodos más utilizados en la actualidad, en cuanto al de ultrasonido y de rayo láser aún se encuentra en investigación.

3.5.1 MEDICIÓN POR ANÁLISIS DE LABORATORIO.

El procedimiento estándar para la determinación en laboratorio de la salinidad de los suelos requiere de la realización de lo que comúnmente se denomina "pasta saturada del suelo", para posteriormente obtener el extracto de saturación que es donde se medirá la conductividad eléctrica. El procedimiento se lleva a cabo añadiendo agua destilada a una muestra de suelo, mezclándolos hasta hacer una pasta que esté saturada de agua. Se toma una proporción de pasta de suelo saturada de aproximadamente unos 750 ml, y enseguida con un equipo de filtración de la pasta mediante una bomba de succión en la cual debe salir alrededor de 25 ml, se realiza la medición de conductividad eléctrica del mismo (Calderón *et al.*, 1999). Con este valor

de conductividad eléctrica en extracto de saturación (CE) se puede clasificar el grado de afectación por salinidad del suelo.

Hay métodos simplificados que se basan en la obtención del extracto de una suspensión suelo-agua formada por cinco partes de agua y una de suelo. En este extracto se mide la conductividad eléctrica, la cual puede relacionarse de modo aproximado con la medida de referencia en el extracto de saturación.

Este método se complica debido a que el muestreo de suelo es muy costoso, lo que conlleva a que no es muy confiable debido a que solo se realiza pequeñas muestras en el terreno y no de toda la parcela.

3.5.2 MEDICIÓN POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

La inducción electromagnética es un método no invasivo, que permite la determinación de la CE por medio del proceso de transmisión de un campo magnético en el suelo, donde se pueden despreciar las corrientes de propagación y considerar sólo las corrientes de conducción (Rhoades *et al*, 1990), este método ha sido muy utilizado para cartografiar la salinidad de parcelas regadas por superficie ya que las medidas con estos equipos corresponden, a la facilidad y rapidez con la que estos equipos realizan las medidas, haciéndolos muy útiles para conocer la distribución espacial de la salinidad en un campo de cultivo.

Estos equipos utilizan la inducción electromagnética para medir la conductividad eléctrica aparente de una columna de suelo hasta una profundidad de observación específica (Sudduth *et al.*, 2001).

Estos equipos han sido ampliamente utilizados en la agricultura de precisión, ya que pueden conectarse fácilmente a un GPS y un ordenador portátil. Los equipos de inducción electromagnética, se basan en la ley de Faraday, la cual indica que la corriente inducida en una espiral cerrada es igual al negativo de la relación de cambio con respecto al tiempo de flujo magnético a través de la espiral y está dado por la siguiente ecuación (IVIA, 2011).

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (5)$$

Donde; ε - Campo magnético; $d\Phi_B$ -Flujo magnético a través del área; dz –Diferencial del Tiempo.

La inducción electromagnética es generada de la siguiente manera Figura 8, (Mcneill, 1980). Una bobina emisora sobre el suelo es energizada con una corriente, generando un campo magnético primario oscilante (H_p) en las proximidades de la bobina transmisora (Figuras 8a y 8b) y que varía con el tiempo en el suelo.

El campo magnético primario oscilante genera una variación en el flujo del campo magnético del suelo (medio conductor) que favorece la aparición de corrientes secundarias inducidas (Figura 8c).

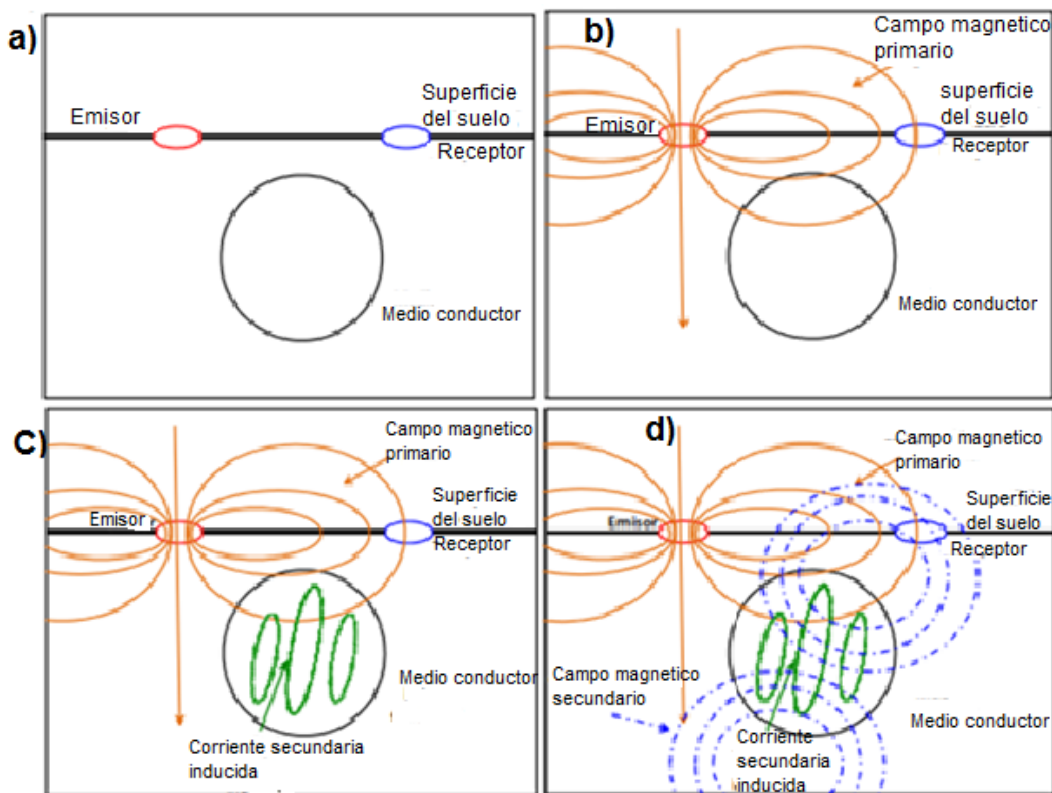


Figura 8. Esquema de la técnica de inducción electromagnetismo en el suelo; transmisión de la corriente primaria (a y b); interacción y conducción de la corriente secundaria (c); lectura de los campos magnético primario y secundario por medio de la bobina receptora (d); fuente Machado (2009).

Las corrientes secundarias al pasar por el suelo generan un nuevo campo magnético, denominado campo magnético secundario (H_s). Una bobina receptora capta ambos campos magnéticos H_p y H_s , de esta manera, la relación entre H_p y H_s es función de las diferentes conductividades en el subsuelo, además de otros factores como la

orientación, distancia entre las dos bobinas, frecuencia de operación y susceptibilidad magnética (Figura 8d). La relación entre los módulos de los campos primario (H_p) y secundario (H_s) puede ser obtenida por medio de la ecuación 6, (Mcneill, 1980): la cual tiene particularidad de medir la conductividad eléctrica del suelo.

$$\frac{H_p}{H_s} \cong \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad (6)$$

Donde; H_p - campo magnético primario en la bobina transmisora; H_s - campo magnético secundario en la bobina receptora; ω - $2\pi f$; f - frecuencia (Hz); μ_0 - permeabilidad magnética del medio poroso del suelo; s - distancia de separación entre las bobinas (cm).

El cociente entre el campo magnético secundario (H_s) y primario (H_p) es linealmente proporcional a la conductividad eléctrica aparente (CE) del suelo, de acuerdo a lo descrito por Mcneill (1980). A partir de lo cual es posible la determinación directa de la CE (Figura 8b), es decir el valor de esta relación cuando la onda oscilante del campo magnético primario está en un cuarto del ciclo 90° (Callegary *et al.*, 2007, Abdu *et al.*, 2007).

Despejando la ecuación 6 se obtiene la ecuación 7 la cual se utilizada para determinar la conductividad eléctrica del suelo por el método de electromagnetismo.

$$CEa = \frac{4}{\omega\mu_0\sigma s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (7)$$

La calibración de un equipo por medición de inducción electromagnético (MIE) puede ser difícil y requiere de tiempo, esta es otra diferencia con el método de resistividad eléctrica. La complejidad de las mediciones MIE y las dificultades en su calibración son varias de las desventajas del uso de la técnica MIE que han reducido su uso en la agricultura, otra desventaja es que las lecturas de CEa con esta técnica pueden ser perturbadas por la temperatura, objetos metálicos (vehículos, tuberías de agua), y la interferencia eléctrica del ambiente. Estas limitaciones son las razones más probables por las que no son tan comunes comercialmente. Esto ha causado que su uso en la agricultura, incluso hoy, sea principalmente una herramienta de investigación (Corwin, 2008).

3.5.3 EQUIPOS CON MEDICIÓN DISCRETA.

Es nombrado de esa manera a estos equipos por que toman los datos puntuales, es decir, se toman datos en un punto y luego se necesita trasladar el equipo a otro punto para tomar los datos correspondiente; por esta razón, es necesario diseñar un muestreo estadístico para identificar los puntos en los que se tomaran los datos de conductividad eléctrica, esto supone una desventaja porque la cantidad de puntos en los que se pueden registrar los datos son reducidos y trasladar el equipo de un punto a otro es laborioso y requiere de mucho tiempo, por esta razón no se pueden utilizar para caracterizar parcelas grandes. Entre los equipos de medición discreta están los siguientes: EM38, EM38-DD, CMD-1, GEM-2 entre otros modelos que se pueden encontrar en el mercado.

EM38

El EM38 (Figura 9) es un equipo de Geonics Inc. Canadá. Su principio de medición se basa en la inducción electromagnética. Es un equipo muy popular pero necesita de una calibración en el campo, su desventaja radica en su principio de funcionamiento. El EM38 proporciona la CE en mSm^{-1} y funciona con una señal de frecuencia fija de 14.6 kHz y su rango de medición varía desde 100 hasta 1000 mSm^{-1} , mide a una profundidad efectiva de 1.5 m en el modo dipolo vertical ó 0.75 m en el modo dipolo horizontal (Ehsani *et al.*, 2002).

Hay algunas variantes de la serie EM38: el EM38-DD (Figura 10) y el prototipo EM38-MK2. El EM38-DD consiste de dos EM38 que se acomodan en un arreglo dipolo con orientación vertical y horizontal recolectando datos a dos profundidades simultáneamente (Gebbers *et al.*, 2005).



Figura 9. Equipo electromagnético EM38, fuente Geonics (2015)

El EM38-MK2 es un prototipo, especialmente construido para la Technical University of Múnich. Esta construido de dos instrumentos EMI con espaciamento entre bobinas de 0.5 m y 1 m, opera a una frecuencia de 40.4 kHz aproximadamente. Para evitar interferencias, los elementos del EM38-DD y del EM38-MK2 trabajan a diferentes frecuencias (Gebbers *et al.*, 2005).



Figura 10. Equipo de medición de CE del suelo EM38-DD, fuente Geonics (2015).

El EM38 está diseñado para aplicaciones de relativamente poca profundidad, específicamente dentro de la zona radicular y puede examinar grandes áreas rápidamente sin ningún contacto con el suelo. Es muy ligero con un peso de apenas 3 kg y de solo un metro de largo, provee lecturas rápidas con una excelente resolución de $\pm 0.1 \%$ de la escala total; tiene una precisión de $\pm 5 \%$ en 30 mS/m y es capaz de realizar lecturas de CE durante 30 horas continuas. Las lecturas generalmente se toman colocando el equipo sobre el suelo y registrando las lecturas obtenidas, los

medidores digitales se localizan encima en el modo dipolo horizontal y a los lados en el modo dipolo vertical (Geonics Ltd, 2011).

A pesar de que el equipo es fundamentalmente de medición discreta, se pueden tomar mediciones continuas utilizando un brazo extensible opcional con una conexión a un sistema de adquisición de datos. En este modo se pueden obtener varios miles de datos en muy poco tiempo. Para áreas muy grandes, el EM38 se puede montar sobre una plataforma y ser tirado por un vehículo. Opcionalmente, tiene un sistema de adquisición de datos en tiempo real con conexión directa a un sistema de adquisición de datos computarizado (Geonics Ltd, 2014).

CMD-1, CDM-2, CDM-4

Estos equipos es la versión más actual del anterior CM-138, es fabricado por Gf Instruments. El CM-138 utiliza la inducción electromagnética y realiza mediciones a una sola profundidad; de acuerdo con su manual de operación el CM-138 tiene parámetros similares al EM38, tiene un metro de espaciamiento entre bobinas y funciona con una frecuencia de 14.406 kHz (Gebbers *et al.*, 2005).

El CMD-1 (Figura 11) posee un cinturón que permite cargarlo y transportarlo cerca de la superficie del suelo; este equipo permite distinguir detalladamente objetos enterrados (zonas orientadas verticalmente, por ejemplo, base de una pared, yacimientos rocosos) y permite evaluar la conductividad de las capas delgadas superiores (Gf Instruments, 2014). El CMD-1 consta de dos partes principales, la sonda y la unidad de control:

La sonda mide la conductividad eléctrica aparente en mSm^{-1} en un rango que va desde 0.1 mSm^{-1} hasta 1000 mSm^{-1} con una precisión de $\pm 4 \%$. La distancia central dipolo es de 0.98 m y posee dos orientaciones dipolo, una orientación dipolo horizontal que mide hasta 0.75 m y una orientación dipolo vertical que mide hasta 1.5 m; es capaz de operar a temperaturas de hasta $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y hasta $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y tiene un peso de 2.5 kg (Gf Instruments (2014).

La unidad de control es la que se encarga de registrar y manipular los datos adquiridos y georreferenciarlos. Esta unidad de control es capaz de registrar los datos adquiridos en periodos pequeños de 0.1 s o bien de hasta 20 s y ofrece cinco modos de medición (Gf Instruments, 2015):

- ✓ Medición discreta no georreferenciada. El usuario inicia las mediciones en cada punto y la posición del punto se actualiza automáticamente en la cuadrícula del muestreo o se puede introducir manualmente, cada punto se puede volver a medir o ser evitado y se puede agregar un comentario.
- ✓ Medición continua no georreferenciada. Los datos se miden y se guardan continuamente cada cierto periodo de tiempo. Las posiciones se determinan mediante marcas de longitud y el consiguiente recalcu de la posición, en la cuadrícula, de cada lectura individual.
- ✓ Medición discreta georreferenciada. El usuario realiza la medición en cada punto y la posición de cada punto se determina por un GPS.
- ✓ Medición continua georreferenciada. Los datos se miden y se guardan continuamente cada cierto periodo de tiempo fijado previamente y la posición determina por un GPS.



Figura 11. Equipo CDM-1, fuente Gf Instruments (2015).

La unidad de control también ofrece una vista previa del área de medida, puede mostrar un mapa previo de hasta 15000 puntos, que puede guardar en su memoria de almacenamiento de datos de 128 MB con capacidad de hasta 64 archivos y de hasta 4.8 millones de puntos medidos (Gf Instruments, 2014).

Posee conectividad con un receptor GPS y tiene un soporte directo para él, de manera que la longitud, latitud y altitud se muestran y se guardan automáticamente y además le permite realizar un recalcu UTM/UPS de la posición (Gf Instruments, 2014).

Dispone de una pila recargable que permite de 3 a 4 días de trabajo o bien de 24 a 32 horas de mediciones continuas, luego los datos se pueden guardar en una memoria USB y ser transportados para su posterior análisis e interpretación o bien se puede utilizar su sistema integrado de tecnología inalámbrica bluetooth para mover los datos directamente a una computadora (Gf Instruments, 2014).

GEM-2

El GEM-2 (Figura 12) es un equipo de Geophex Ltd, es un popular sensor de inducción electromagnética, portátil, digital y programable que combina la tecnología de punta con la simplicidad de su uso. El equipo consiste de una barra que posee tres bobinas: una transmisora, una de compensación y una receptora que están colocados en una configuración coplanar, la consola, el cargador de la batería y una correa para cargar el equipo. Utiliza una señal con una frecuencia que va desde los 300 Hz hasta los 96 kHz; tiene un peso de un poco más de 4 kg y una longitud de 183 cm (Geophex Ltd, 2015). Este equipo es capaz de medir a diferentes profundidades y obtiene datos multifrecuencia que son capaces de caracterizar objetos enterrados, metálicos y no metálicos y es superior a los equipos convencionales que trabajan con una sola frecuencia (Geophex Ltd, 2015).



Figura 12. Equipo electromagnético GEM-2, fuente Geophex Ltd (2015)

La profundidad de investigación específica depende de varios factores, particularmente de la conductividad del suelo y del ambiente electromagnético; el equipo es capaz de medir de 20 a 30 m en áreas resistivas ($>1000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), y de 10 a 20 m en áreas conductivas ($<1000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$). La profundidad de investigación es inversamente

proporcional a la frecuencia: una señal de baja frecuencia viaja lejos a través de la tierra lo que permite ver estructuras profundas, mientras que una señal de alta frecuencia solo puede viajar una distancia corta y por lo tanto solo puede ver estructuras poco profundas. Entonces se puede ajustar la frecuencia de la señal para regular la profundidad de medición, sin, embargo, el fabricante recomienda no usar el equipo para realizar mediciones más allá de 30 m de profundidad (Geophex Ltd, 2015).

Tiene un software integrado que permite realizar una investigación para cubrir una hectárea en un poco más de dos horas, con un espaciamiento entre líneas de 1.5 m y con una separación de los puntos de medición a lo largo de la línea de 15 cm, que genera aproximadamente 45000 datos por hectárea que pueden ser georreferenciados, ya que posee una conexión con un sistema GPS en tiempo real, el equipo permite tomar hasta 50000 datos antes de que sea necesario descargar esos datos a una computadora, sin embargo se puede conectar a una computadora para estudios de conductividad detallados y descargar los datos en tiempo real (Geophex Ltd, 2015).

3.5.4 MÉTODO RESISTIVO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

3.5.5 Puente de Wheatstone

La medida de la conductancia de una solución generalmente requiere la determinación de la resistencia eléctrica de una columna de la solución usando alguna variante del conocido puente de Wheatstone este método puede medir la resistencia del suelo de una forma adecuada. (Holguin *et al.*, 1988).

Mediante el puente de Wheatstone (Figura 13) integrado por resistencias, permite determinar la conductancia de un suelo o solución en función del voltaje entre los puntos A-B. Cuando se tiene la celda fuera de la solución se tiene que la resistencia R_x es cero, por lo que el voltaje entre ambos puntos será el voltaje de entrada.

La teoría clásica del puente del puente de Wheatstone para la medida de una resistencia eléctrica se requiere fundamentalmente de corriente continua solamente. Cuando se usa corriente alterna, la conductividad puede medirse directamente solo cuando la resistencia a la corriente continua es la misma que a la corriente alterna. Dado que la celda de conductividad consiste en electrodos separados por un material

dieléctrico, tiene una capacidad apreciable. Para determinar la conductividad eléctrica del suelo es necesario realizar lo siguiente:

Eliminar la polarización de los electrodos (cambio de estado de la superficie de los electrodos y la concentración del electrolito alrededor de los electrodos durante la medición).

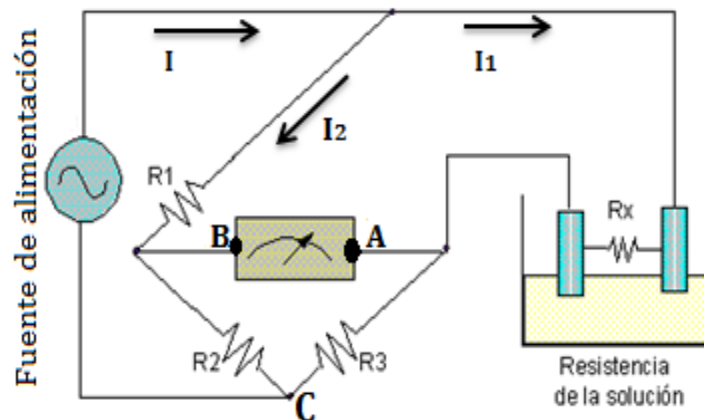


Figura 13. Esquema del puente de Wheatstone

La polarización de los electrodos se puede evitar recubriéndolos electrolícamente con una capa fina de negro de platino, aumentando de este modo su superficie y empleando corriente alterna con frecuencia de 500-2000 Hz o de otra manera para evitar este evento es limpiando los electrodos con agua destilada.

3.5.6 EQUIPOS DE MEDICIÓN CON FUNCIONAMIENTO RESISTIVO Y CONTINUAS.

En estos equipos una corriente eléctrica se inyecta en el suelo por medio de un par de electrodos, la corriente inyectada puede ser corriente continua o corriente alterna de baja frecuencia. Se evita el uso de corriente continua plena pues produce el fenómeno de “polarización” (acumulación de gas en el electrodo negativo) lo cual se traduce en un aumento artificial de la resistividad aparente (Acuña *et al.*, 2011) y de corrientes secundarias. El flujo de corriente en todo el volumen de suelo y subsuelo y su distribución espacial es función de la distribución espacial de las resistividades eléctricas, la salida de este tipo de sensores sería una resistividad eléctrica aparente.

El voltaje resultante de la distribución espacial se mide en la superficie del suelo por dos o más electrodos. La relación del voltaje y la intensidad de la corriente, multiplicado por

una constante (factor geométrico que depende de la configuración de los cuatro electrodos) es la resistividad eléctrica aparente (ρ_a), debido a que los materiales subsuperficiales tienen diferentes resistividades, las medidas en la superficie del suelo pueden caracterizar la distribución horizontal y vertical de las estructuras subyacentes (Machado, 2009).

3.5.7 TIPOS DE ARREGLOS.

La configuración básica empleada para deducir valores de resistividad de terreno es la de cuatro electrodos. Existe la configuración de tres electrodos la cual se usa preferentemente para medir resistencias efectivas de puesta a tierra.

Para realizar este tipo de configuración se lleva acabo con un arreglo de cuatro electrodos, en el cual están igualmente espaciados tal como lo muestra el esquema de la Figura 14, los cuatro electrodos se ubican sobre un mismo eje; se inyecta corriente al terreno a través de los electrodos externos y se mide la diferencia de potencial entre los electrodos de potencia interno.

Los electrodos se ubican a distancias relativamente grandes comparadas con la profundidad de enterramiento, de modo de suponerse a éstos como fuentes puntuales de corriente.

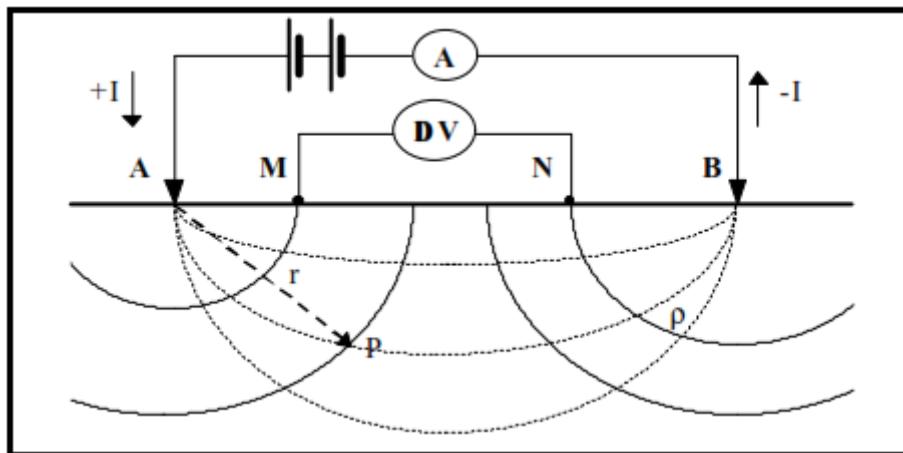


Figura 14. Aplicación de corriente eléctrica al terreno, corriente I entre los electrodos AB y se mide el potencial ΔV entre el par de MN, fuente Acuña, (2011).

El potencial es un punto de un terreno homogéneo de resistividad ρ , a distancia r de una fuente puntual de corriente I , como se muestra en la Figura 15. Esto se puede calcular de la siguiente manera aplicando la definición de resistividad:

$$R = \frac{\rho * I}{S} = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (8)$$

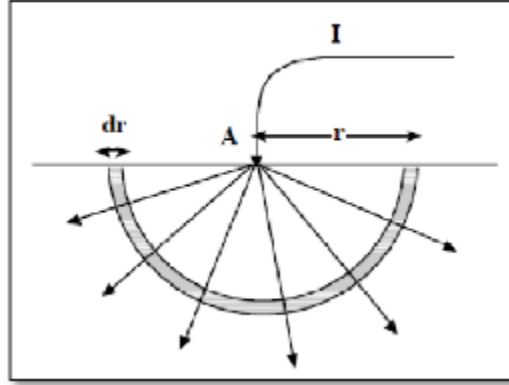


Figura 15. Diagrama representando un disco sumergido en el suelo, fuente Acuña, (2011).

Aplicando la ley de Ohm:

$$V = -d\phi = I * R \quad (9)$$

Cambiando ambas ecuaciones se obtiene la siguiente expresión;

$$-d\phi = I * \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (10)$$

Obteniendo el potencial (ecuación 11) por definición, integrando la ecuación 8 entre el infinito y r .

$$\phi = \frac{I * \rho}{2 * \pi * r} \quad (11)$$

Cambiando la ecuación 9 para los cuatro electrodos, se puede demostrar que la resistividad del terreno, conocido V, I y la posición de los electrodos, está determinado por la ecuación (9) (Acuña et al, 2011):

$$\rho_a = \frac{4 * \pi * R * r_1}{\left(1 + \frac{2r_1}{\sqrt{r_1^2 + 4r_2^2}} - \frac{2r_1}{\sqrt{4r_1^2 + 4r_2^2}}\right)} \quad (12)$$

Donde; r_1 - distancia entre electrodos; r_2 - profundidad de enterramiento; R -resistencia medida con el instrumento.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica y el volumen de medición del suelo se incrementa conforme se incrementa la distancia entre los electrodos (Corwin *et al.*, 2005).

3.5.8 ARREGLO DIPOLO-DIPOLO.

Según Orellana (1982) este arreglo consiste en cuatro electrodos dispuestos en forma lineal ABMN sobre un perfil de suelo (Figura 16); es ampliamente usado por el bajo acoplamiento entre la corriente y los circuitos potenciales. El espaciamiento entre los electrodos de corriente es determinado por el factor “a” que es la misma distancia entre los electrodos de potencial, además este arreglo tiene otro factor denominado “n”. para los estudios con este arreglo es factor “a” se mantiene fijo y el factor “n” se incrementa ya que con esto se busca aumentar la profundidad de investigación.

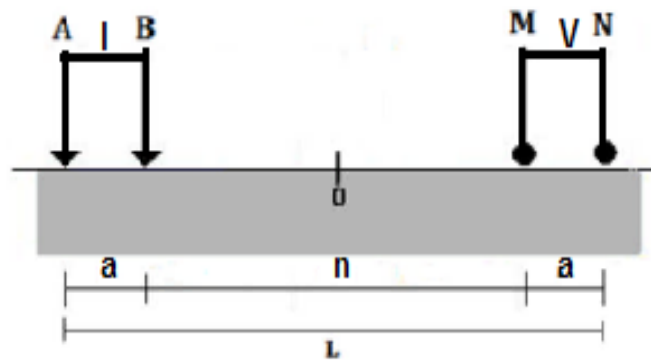


Figura 16. Arreglo Dipolo-Dipolo, fuente Chelotti *et al.*, (2010), Loke, (2010).

La ecuación para el cálculo de la resistividad aparente para este tipo de arreglo está dado por;

$$\rho_a = \pi n(n + 1)(n + 2)aR \quad (13)$$

Donde; n factor denominado; a distancia entre electrodos; R es la resistencia medida.

La desventaja de este tipo de arreglo comparado con el arreglo tipo Wenner, capta mucho ruido ambiental y la señal es muy baja para “n” con valores grandes, ya que la señal del arreglo con un factor de “n” pequeño es 28 veces más fuerte que con un factor de n grande (Edwards, 1977; Loke, 2010).

3.5.9 ARREGLO SCHLUMBERGER.

Este arreglo es llamado de esta manera por el movimiento lateral que se aplica al arreglo Schlumberger, los electrodos “AMNB” se ponen simétricamente en línea, donde la distancia de los electrodos de potencial “MN” es mucho menor que las de los electrodos de corriente AB (Figura 17). Su profundidad de investigación media es de 10% mayor que la del arreglo Wenner. La desventaja para este tipo de arreglo comparado con el Wenner, la fuerza de la señal es menor y mayor que la del arreglo Dipolo-Dipolo (Loke, 2010).

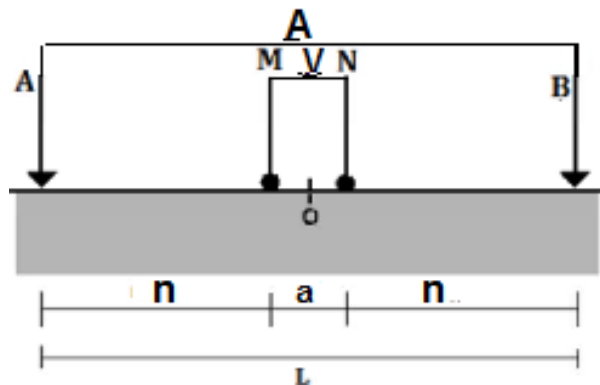


Figura 17. Arreglo tipo Schlumberger, fuente Chelotti *et al.*, (2010); Loke., (2010).

La ecuación con la cual se determina la resistividad del suelo está dada por la expresión siguiente,

$$\rho_a = \pi * n(n + 1) * a * R \quad (14)$$

Donde; n factor denominado; a distancia entre electrodos; R resistencia medida.

3.5.10 ARREGLO WENNER.

En este arreglo los electrodos son equidistante entre sí, a una distancia denominada “a” siendo esta la que más convenga al estudio (Figura 18), además tiene contorno casi horizontales en el centro del arreglo por esto es relativamente sensible a los cambios verticales en la resistividad del suelo (Loke, 2010).

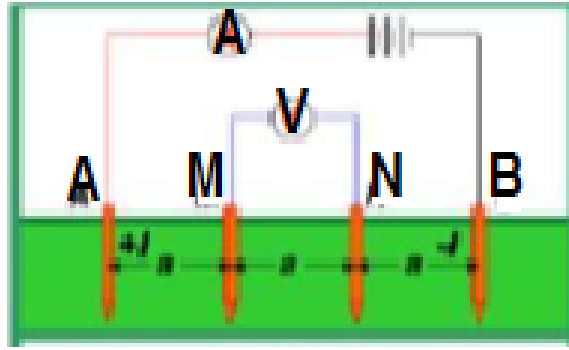


Figura 18. Arreglo tipo Wenner, fuente Chelotti *et al.*, Acuña (2010).

La ecuación para determinar la resistividad aparente es;

$$\rho_a = \frac{4\pi R a}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \quad (15)$$

Donde; a es la distancia entre electrodos; b penetración del electrodos; R resistencia.

Según Loke (2010), la profundidad media de investigación de este arreglo es aproximadamente 0.5 veces el espacio utilizado del factor “a”. Comparado con otros arreglos este tiene una profundidad moderada de investigación, además de tener la señal más fuerte, este tipo de arreglo es bueno si se realiza el estudio en una zona con mucho ruido.

La ecuación 15 es utilizado cuando a/b, tiene una relación menor a 20 y cuando a/b > 20, se reduce la siguiente expresión:

$$\rho_a = 2\pi * R * a \quad (16)$$

3.5.11 EQUIPOS CON MEDICIÓN CONTINUA.

Los equipos de medición continua son llamados de esta manera debido que son capaces de tomar datos cada cierto periodo de tiempo y georreferenciar cada uno de estos datos, esto significa una gran ventaja sobre los equipos de medición discreta, porque se pueden tomar tantos datos como se requieran para caracterizar una parcela y por ende no es necesario utilizar un método de muestreo. El método por el cual obtienen los datos de CE es mediante el método de resistividad eléctrica; los equipos de medición continua son más apropiados para caracterizar grandes parcelas ya que son tirados por un vehículo, lo que agiliza la toma de datos, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y esfuerzo.

Los equipos que funcionan con este tipo de arreglos electrónicos son los comercializados por la empresa Americana Veris Technologies y Soil Doctor System, estos equipos son los más utilizados en la agricultura de precisión para caracterizar una determinada área de terreno.

VERIS

Es un equipo de Veris Technologies capaz de generar mapas de conductividad eléctrica de las zonas radicular de los cultivos. La empresa que comercializa este tipos de equipo tienen varios modelos; entre ellos Veris Q1000, V3100, V3150 y Q2800 (Veris Technologies, 2014).

Si bien todos los equipos tienen características similares y todos utilizan el principio de resistividad eléctrica para determinar la conductividad eléctrica. Estos equipos utilizan cuchillas circulares, en cada uno de ellos posee dos o tres pares de cuchillas, por lo que estos equipos trabajan a dos profundidades simultáneamente con excepción del Veris Q1000 que solo tiene dos pares de cuchillas y en consecuencia solo trabaja a una sola profundidad. Las cuchillas solo necesitan penetrar unos centímetros (2.5 a 5 centímetros) en el suelo mientras que la profundidad de exploración se determina por la separación de las cuchillas y de la configuración que tenga las cuchillas. A continuación se presentan la descripción y características de cada uno de los modelos mencionados anteriormente.

VERIS 2000

Este modelo está diseñado para ser utilizado en viñedos o en lugares de espacios reducidos, a diferencia de los modelos V3100 y V3150 este modelo solo tiene dos pares de cuchillas circulares, con un diámetro y grosor iguales a los de los modelos anteriores, este modelo mide a una sola profundidad, sin embargo esa profundidad se puede ajustar a 45 cm y hasta 91 cm, lo que permite obtener lecturas a diferentes profundidades con un segundo o tercer recorrido del equipo (Veris technologies, 2014).

Este modelo (Figura 19) tiene un peso de 337 kg sin contrapesos y para su uso requiere de 12 a 20 HP, que varía dependiendo de la velocidad de trabajo, el terreno y las condiciones del suelo. La velocidad de trabajo para este equipo es de 25 km/h y a diferencia de otros modelos no está diseñado para transporte en carretera. Las

características de la unidad de control, su datalogger y el software son idénticos del Veris 3100 (Veris technologies, 2014).



Figura 19. Modelo Veris 2000, fuente Veris technologies (2014).

QUAD EC1000

Quad EC1000 es un equipo de diseño de la empresa Veris para medir la CE del suelo el cual puede ser traccionado por una cuatrimoto o por una camioneta, este equipo puede ser acoplado con facilidad esto debido a su peso ligero que este representa. En la Figura 20, se puede apreciar el funcionamiento en campo del equipo Quad EC1000 (Veris technologies, 2014).



Figura 20. Equipo Quad EC1000, fuente Veris technologies, (2014).

Las especificaciones técnicas del equipo son las que se mencionan enseguida; Los discos de este equipo son acero de púas montado en los muelles o chasis siguen los contornos del suelo y absorben los impactos de las rocas, el equipo está formado por cuatro discos que miden 38 cm de diámetro (15 ") proporcionando un buen contacto

del suelo. Y tiene las características de que está libre de interferencias de metal. El peso del equipo es de 273 kilogramos y con una altura de 70 cm, este equipo trabaja a una velocidad de 24 kilómetros por hora, los neumáticos miden 46 cm de alto, tiene una separación entre ambos discos de 25.4 cm (10"). En la Figura 21 se puede observar dicha especificación (Veris technologies, 2014).

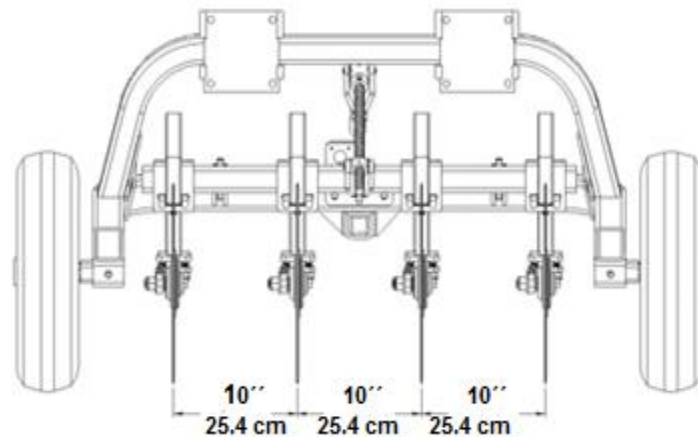


Figura 21. Dimensiones entre discos u electrodos, fuente Veris technologies, (2014).

V3100, V3150

El V3100 y el V3150 estos modelos tienen el mismo objetivo de medir la conductividad eléctrica del suelo, pero además de eso pone en funcionamiento el mapeo con los datos obtenidos con el equipo en la parcela. Estos modelos están contruidos en una plataforma de sensores móviles (MSP Movil Sensor Platform), esto significa que se pueden agregar otros modelos de sensores. Estos equipos pueden ser traccionado por una camioneta, tractor o por una cuatrimoto por sus pesos livianos que estos tienen. En la Figura 22, se puede observar como el equipo V3100 es traccionado por una camioneta.

Los dos discos de la orilla son los guías y los dos discos de la orilla de parte interna son los que inyectan la corriente y los otros dos reciben la respuesta y van recolectando los datos de la parcela para ser mandados a una datalogger y por medio de una memoria SD es almacenada la información obtenida en el trabajo de campo el cual puede ser extraída y analizada con una computadora que contenga Windows XP.



Figura 22. Tracción del V3100 con una camioneta, fuente Veris technologies, (2014).

Las especificaciones técnica generales del modelo V3100 son las siguientes, dimensiones del equipo: Ancho: 235 cm; longitud: 244 cm; Altura: 89 cm, el equipo tiene un peso de 544 kg, para poder ser traccionado se necesita un vehículo de 30 CV el caballaje está en función de las condiciones del terreno, suelo y la velocidad con la que se quiere trabajar, este modelo V3100 está compuesto por 6 discos de acero de púa que tienen de 43 cm de diámetro con un espesor de 4 mm como se puede observar en la Figura 23, los neumáticos con los que cuenta dicho equipo es de carretera P205 R75, el equipo puede ser transportado en carretera a 90 kilómetros por hora, y puede trabajar a una velocidad máxima de 24 kilómetros por hora en campo, para que las lecturas sean adecuadas los electrodos trabajan con un voltaje de 10 a 15 voltios, la señales de GPS funciona con una frecuencia de 1 Hz (Veris technologies, 2014).

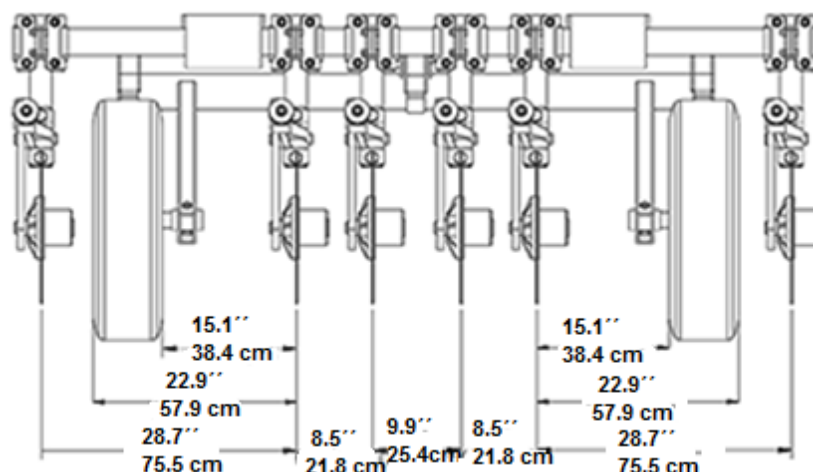


Figura 23. Especificaciones técnicas del modelo V3100, fuente Veris technologies, (2014).

VERIS 3150

Este modelo V3150 al igual que el modelo V3100 son los equipos mas avanzados para medir la conductividad electrica del suelo de Veris Technologies, como se menciono anteriormente su sistema eléctrico tiene la capacidad de procesar la información recolectada para crear un mapa de salinidad. En la Figura 24 se puede observar el funcionamiento del equipo para determinar la conductividad electrica del suelo.



Figura 24. Modelo V3150 equipo de CE, fuente Veris technologies, (2014).

Las especificaciones técnicas generales del modelo V3150 son las siguientes; las dimensiones de este modelo es de 229 cm de ancho por 132 cm de alto y 254 cm de largo, con un peso de 576 kg, haciendo este equipo uno de los más pesado a comparación de los otros modelos mencionados, para su tracción de este equipo se necesita un vehículo de 30 CV, esta potencia varía de acuerdo al tipo del terreno y el suelo y la velocidad con el que se trabaja, la velocidad de transporte para este equipo es de 93 kilómetros por hora, y puede ser trabajado a una velocidad de 24 kilómetros por hora.

Las dimensiones de sus discos de este modelo V3150 es de 43 cm de diámetro por 4 mm de espesor, el metal con el que están elaborados estos discos son de acero de púa fundido, en la Figura 25 se especifica la separación entre discos para su buen funcionamiento, las dimensiones de los neumáticos es de P205R75. El modelo V3150 trabaja con un voltaje de 10 a 15 voltios de corriente continua, este equipo tiene entrada para GPS el cual trabaja a 1 Hz y también para pH.

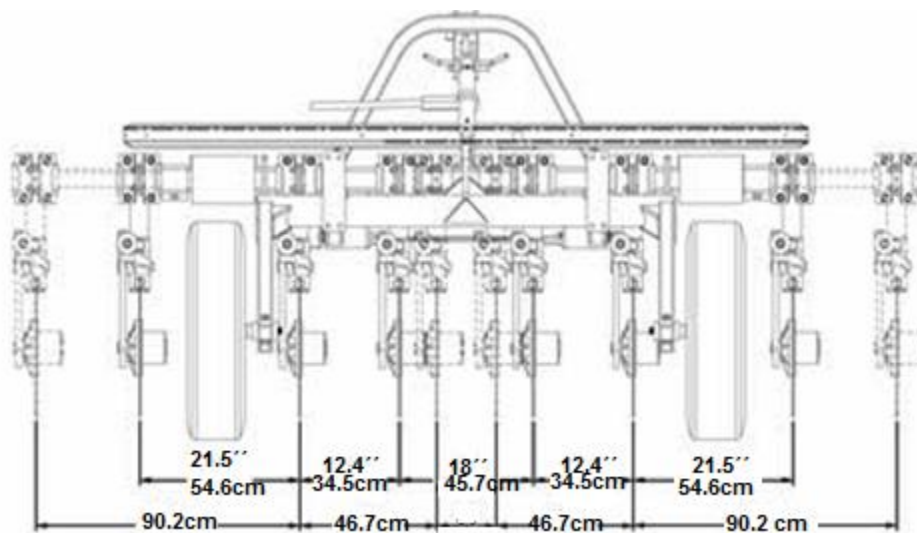


Figura 25. Especificaciones técnicas del modelo V3150, fuente Veris technologies, (2014).

QUAD 2800

El modelo Quad 2800 es una combinación de los modelos anteriormente mencionados como lo son; Q1000, V3100 y el V3150, el Q2800 es uno de los equipos más completos para realizar mediciones de CE del suelo, ya que integra GPS para el posicionamiento de puntos de datos tomados en campo, el equipo trabaja a una velocidad de 24 kilómetros por hora, tiene la característica de la tecnología de Veris para medir CE del suelo, el equipo puede ser traccionado por una camioneta, cuatrimoto o tractor como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Equipo Quad 2800, fuente Veris technologies (2014).

Las especificaciones técnicas del equipo son las que se mencionan a continuación; está compuesto de 6 discos de acero de púas montado en el chasis este tipo de metal

absorben los impactos de las rocas, los dos discos laterales sirven como guía y en los discos interiores laterales se inyecta corriente y los otros dos interiores son los que recolectan la información del suelo, tiene una dimensión en los discos de 38 cm y un espesor de 4 mm, las dimensiones de los neumáticos es de 46 cm, el equipo presenta un peso de 430 kilogramos, la separación entre ambos discos para su funcionamiento es la que se muestra en la Figura 27 (Veris technologies, 2014).

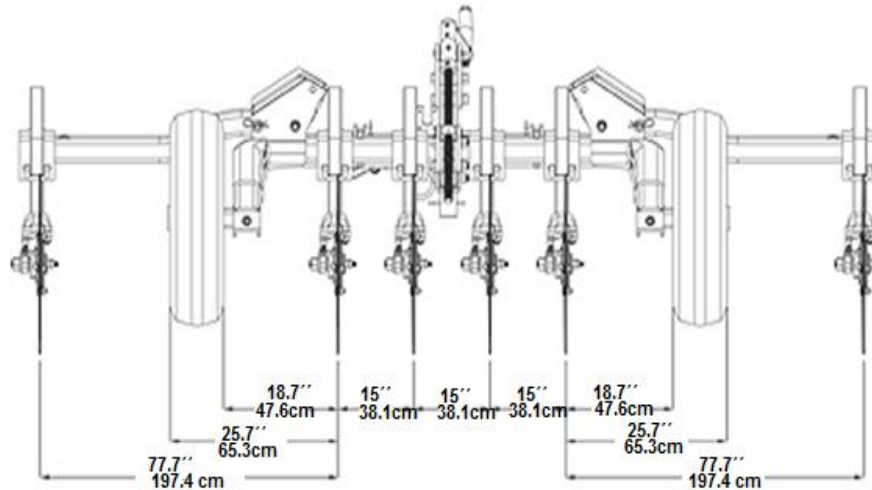


Figura 27. Diagrama de dimensiones del equipo Quad 2800, fuente Veris technologies, (2014).

3.5.12 SOIL DOCTOR SYSTEM.

Es un equipo desarrollado por la empresa Estadounidense Crop Technology, Inc, es un sistema de monitoreo y prescripción en tiempo real (on-the-go). El sistema de sensor y el software del Soil Doctor fueron diseñados inicialmente para dirigir el manejo del nitrógeno durante la fertilización solamente para maíz, en las regiones húmedas y también es usado para la aplicación variable de agroquímicos y semillas.

Una cantidad variable, según el ancho de labor del implemento de que se trate, de pares o tríos de sensores rotativos (que no son más que discos o cuchillas circulares) examinan el tipo de suelo básicamente a través de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los niveles de nitrógeno en forma de nitratos (NO^3) a medida que se desplaza el implemento (Figura 28) (Geremia *et al.*, 2010).

El equipo de Soil Doctor elabora los datos, así obtiene una 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, el propio Soil Doctor (SD) prescribe la dosis y ordena su aplicación.

También puede grabar los valores obtenidos en una tarjeta de memoria y puede relacionarlos con el posicionamiento del equipo mediante GPS para posteriores mapeos y estudios de lotes.

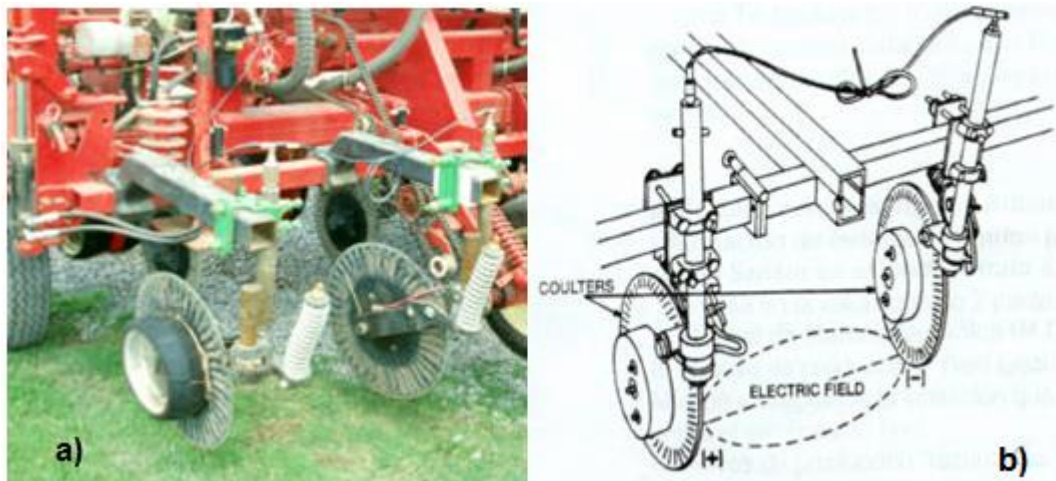


Figura 28. a) Equipo resistivo Soil Doctor System, b) cuchillas sensoras para medir el potencial de nutrientes, nitrato (NO_3), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fuente Geremia *et al.*, (2010).

El funcionamiento del Soil Doctor, se divide en dos partes cada una con funciones específicas:

- a) Adquisición y procesamiento de datos y determinación de dosis.
- b) Aplicación de la dosis determinada.

Para la primera etapa el SD cuenta con dos o más pares o tríos de sensores rotativos llamados arreglos. Entre las cuchillas de un mismo arreglo se provoca una diferencia de potencial eléctrico, para lo cual el sensor positivo deberá estar aislado eléctricamente del otro u otros del mismo arreglo y también del bastidor del implemento. Los fabricantes definen a los sensores como electrodos que relacionan la parte eléctrica del SD con el suelo.

Consecuentemente existe un campo eléctrico entre los discos sensores (los que ruedan enterrados a unos 100 mm) que varía con las características del suelo a medida que el implemento avanza; esas variaciones son captadas como señales eléctricas y

procesadas por un controlador electrónico de alta resolución, que va montado sobre el implemento dentro de una caja hermética de acero inoxidable nombrada Row Manager (R.M.), formando un conjunto con los sensores, abreviado como RE/HR (Rolling Electrodes/High Resolution).

La cantidad de suelo que analiza el Soil Doctor es la que abarca el campo eléctrico entre sus cuchillas sensoras, separadas a 700 mm, llegando a 305 mm de profundidad (Geremia *et al.*, 2010).

El RM está vinculado con un microprocesador AXT que se ubica en una consola llamada Field Manager (FM), la que se instala en la cabina del tractor. En él se programa la configuración del equipo, se establecen los valores de las constantes agronómicas y se pueden leer las variables de trabajo en el modo operativo.

ARP-03

Con el equipo ARP-03 (Figura 29) se puede mapear una parcela rápido y eficientemente con una muy alta resolución espacial, posee electrodos rodantes que tienen un arreglo trapezoidal, que lo diferencia de los equipos Veris y Soil Doctor System que tienen un arreglo lineal. Es capaz de obtener simultáneamente tres diferentes mapas de conductividad eléctrica que corresponden a tres diferentes profundidades de exploración, que usualmente son a 0.5, 1 y 2 m; opera con una frecuencia aproximada de 225 Hz con un voltaje variable de 0 a 200 V dependiendo de las condiciones de resistencia en un sitio y puede cubrir hasta 50 Ha en un solo día (Geocarta, 2014).

También mapea un modelo de elevación digital del área, el dispositivo esta hecho de cuchillas metálicas sujetas a un bastidor y puede ser tirado hasta por un vehículo todo terreno (cuatrimoto). Los componentes electrónicos incluyen un medidor de resistencia capaz de tomar 100 lecturas cada segundo, un radar que activa una medición cada 20 cm y un dispositivo GPS; el sistema en su totalidad es controlado por una unidad integrada de PC que recoge y guarda los conjuntos de datos adquiridos (Geocarta, 2014).



Figura 29. Equipo ERP-03 método resistivo, fuente Geocarta, (2014).

El ARP múltiple (Figura 30) está hecho de cuatro ejes con sus respectivas cuchillas, el primero y más cercano al vehículo que lo transporta inyecta corriente eléctrica en el suelo, mientras los otros miden la caída de voltaje resultante del flujo de corriente a través del suelo. Cada uno de estos tres ejes tiene un ancho diferente, la profundidad de exploración de cada eje es aproximadamente igual a su anchura. Dado que el dispositivo adquiere un valor de resistividad cada 20 cm a lo largo de una línea y usa una separación de 2 m entre líneas se pueden obtener 25000 puntos por hectárea (Geocarta, 2014).

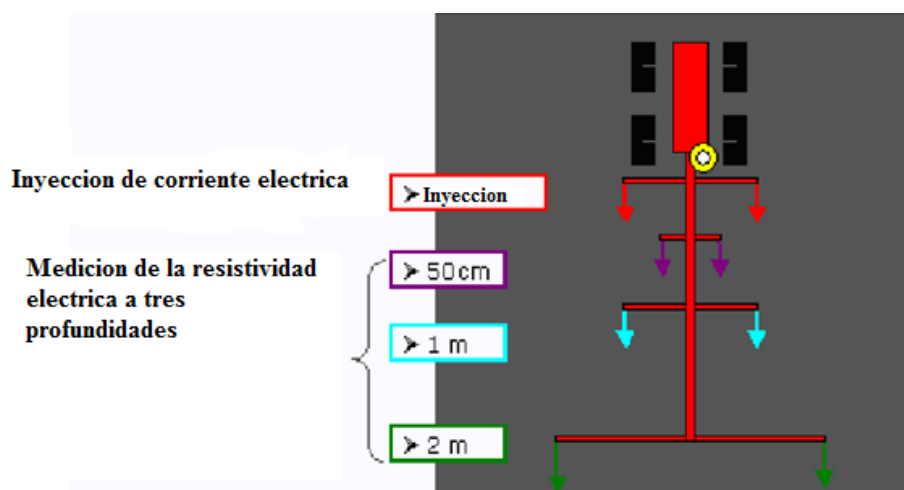


Figura 30. Especificaciones técnicas del ARP-03, fuente Geocarta, (2014).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 ÁREA EXPERIMENTAL

La investigación se realizó en la parcela experimental “CERONA” en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en las coordenadas (latitud 510493 y longitud 2154472). El suelo es franco arcilloso y la parcela estaba sembrada de avena. El muestreo consistió en tomar muestras de suelo para determinar la humedad del suelo por el método gravimétrico y se midió in situ la humedad, la conductividad eléctrica y la temperatura con el TDR300 y el equipo construido. En la Figura 31 se muestra el terreno experimental la “CERONA”, en donde el marco en rojo fue el área donde se realizó las mediciones de la conductividad eléctrica del suelo.



Figura 31. Área experimental donde se realizaron las mediciones de conductividad eléctrica y humedad del suelo.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ELECTRÓNICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

Para el desarrollo del circuito electrónico se utilizó el Programa Proteus 8 y para su ensamble de los componentes electrónicos se utilizó el Fritzing (software gratis).

En el proyecto se utilizaron resistencias de diferentes valores, para el puente de Wheatstone se utilizaron 3 resistencias de 10 K Ω y un amplificador operacional, 2 resistencias de 4.7K Ω para el funcionamiento de los sensores de temperatura.

4.2.1 Microcontrolador.

Un controlador es un dispositivo que se emplea para el control de uno o varios procesos; un microcontrolador consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado (Cooper y Helfrick, 1991). Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- ❖ Procesador o UCP (Unidad de Control de Proceso)
- ❖ Memoria RAM para contener los datos
- ❖ Memoria para contener el programa tipo EPROM o EEPROM
- ❖ Líneas de entrada y salida (E/S) para comunicar los exterior
- ❖ Diversos módulos para control de periféricos (temporizadores, puertas serie y paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: conversores Digitales/Analógico, etc.).

Para la gama de microcontrolador de la empresa Arduino Srl, las placa está basado en ATMEGA8, ATMEGA168 y ATMEGA2560 de Atmel, la cual se programa usando el “Arduino programming lenguaje”, pero puede ser expandido mediante librerías C++ (Enríquez, 2009).

En el mercado se encuentra múltiples versiones de placas de Arduinos, como puede ser Arduino mini, uno, Mega 2560, Leonardo etc., en la Figura 32 se muestra sus principales partes de un Arduino mega 2560.

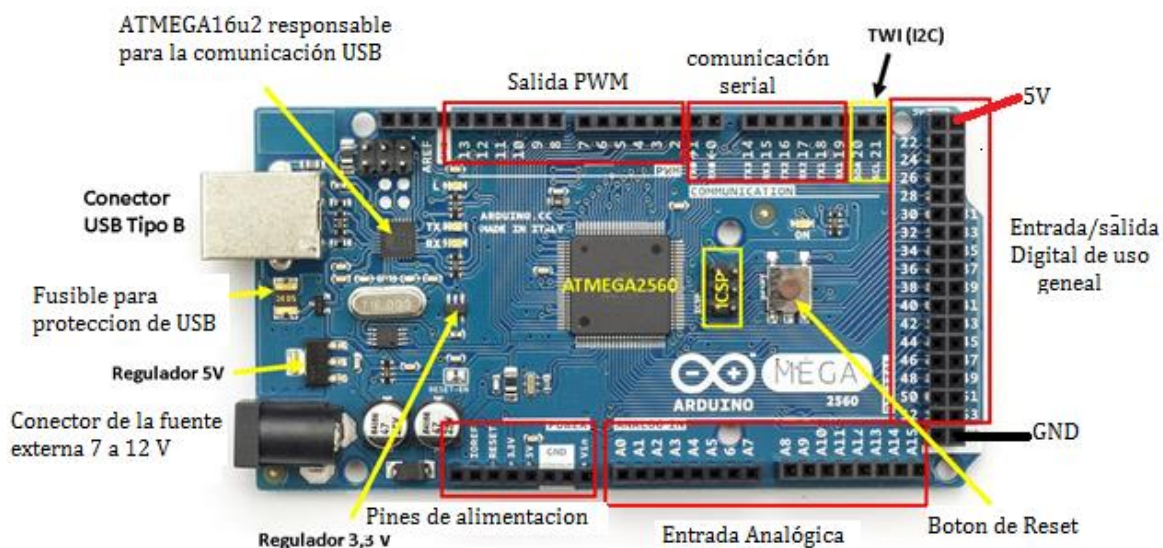


Figura 32. Partes principales del Arduino Mega 2560.

La placa de Arduino es multiplataforma, el software de Arduino es libre y se ejecuta en sistema operativo Windows, Macintosh OSX y GNU/ Linux, la mayoría de los sistemas microcontroladores están limitados a Windows. Las versiones de los drivers de la placa Arduino se puede descargar directamente de la página de Arduino (Arduino, 2015).

En el Cuadro 3 se describen las características más importantes de la placa Arduino para su funcionamiento adecuado.

Cuadro 3. Características de la placa Arduino Mega 2560, fuente Arduino (2015)

CARACTERÍSTICAS	ARDUINO MEGA 2560
Microcontrolador	Atmega 2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de alimentación recomendado	7V-12V
Voltaje de entrada limite	6V-20V
Numero de pines	54 de los cuales 15 proporcionan salida PWM.
Entrada Analógica	16 de los cuales proporciona 10 bits de resoluciones (1024 valores diferentes)
Corriente DC por E/S en los pines	20mA
Corriente DC de 3.3V pin	50mA
Memoria flash	256 KB de los cuales 8KB utiliza para el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16Mhz
Largo	101.52mm
Ancho	53.3 mm
Conector de carga externa	2.1 mm de centro

4.2.2 Reloj de tiempo real.

Se eligió el módulo de reloj de tiempo real (RTC), este módulo se basa en el chip DS1307, que soporta el protocolo I2C. Utiliza una pila de litio (CR1225). El reloj proporciona, calendario, segundos, horas, día, fecha, mes y año de información. El fin de mes se ajusta automáticamente para los meses con menos de 31 días, incluyendo las correcciones del año bisiesto, El reloj funciona tanto en el formato de 24 horas o 12 horas con indicador AM/PM. En la Figura 33 se muestra el esquema de conexión para su funcionamiento.

Las características más importantes para su funcionamiento del módulo RTC es el que se describe a continuación.

- ✓ 56- Byte es utilizado para el almacenamiento de datos.
- ✓ Se conecta a 5V de corriente directa.
- ✓ Consume menos de 500nA en modo de reserva de la batería con el oscilador en funcionamiento.
- ✓ El modulo tiene 4 pines, SCL se conecta a la entrada SCL del Arduino el cual comunica al serial I2C, SDA se conecta al Arduino para obtener los datos, 5VCC, GND.



Figura 33. Parte física y esquema de conexión del RTC.

4.2.3 Módulo SD Card.

Para guardar los datos obtenidos en campo fue necesario utilizar un módulo SD card, en la Figura 34, se puede observar los pines para su conexión en el Arduino. GND, Vcc a 5 volts, CS al pin 53, Mosi al pin 52, SCK al pin 51 y el Miso al pin 50 para el Arduino mega 2560. El modulo es capaz de soportar hasta un micro sd de 32 gigabyte.

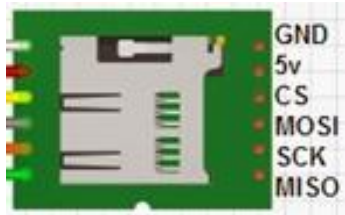


Figura 34. Módulo para la SD Card.

4.2.4 Pantalla de cristal líquido.

Las Pantallas de Cristal Líquido (LCD en inglés, Liquid Cristal Display), tiene un bajo consumo de potencia. Para mostrar los resultados provenientes del Microcontrolador Atmega 2560 se muestran en una pantalla LCD,) con 2 líneas y 16 caracteres cada uno con una interfase ASCII que utiliza un controlador estándar de Hitachi HD44780. La LCD tiene como función proveer una interfase sencilla para el usuario, que permita programar fácilmente y visualizar caracteres o números provenientes del análisis interno del microcontrolador (Figura 35).

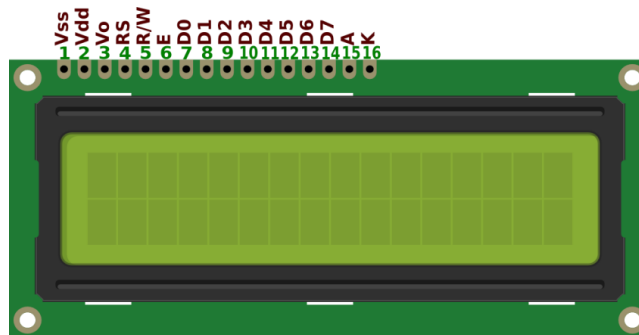


Figura 35. Pantalla de Cristal Líquido

En el Cuadro 4 se describen las características más importantes para su funcionamiento de la pantalla de cristal líquido.

Cuadro 4. Referencia de la distribución de los pines de la pantalla de cristal Líquido.

PIN #	Símbolos	Función
1	Vss	GND tierra
2	Vdd	Alimentación del módulo, +5V
3	Vo	Alimentación para el contraste de la pantalla, 0-5v.
4	RS	Selector de registro control-datos. RS=0 control, RS=1 Datos

5	R/W	Lectura o escritura en la LCD, R/W=0-escritura, R/W=1-Lectura
6	E	Habilitación de la LCD E=0-Desconectado, E=1-conectado
7	D0	Bit de dato 0
8	D1	Bit de dato 1
9	D2	Bit de dato 2
10	D3	Bit de dato 3
11	D4	Bit de dato 4
12	D5	Bit de dato 5
13	D6	Bit de dato 6
14	D7	Bit de dato 7
15	A	Alimentación de luz de fondo backlight de 3.5v-5v
16	K	Tierra del backlight resistencia de 380 Ohms

Para el contraste de la LCD se utiliza, el pin Vss que está entre GND y 5V y se puede ajustar mediante un potenciómetro o arreglo de resistencias.

4.2.5 Sensor de Temperatura.

El sensor de temperatura ds18b20 es un dispositivo encapsulado tipo transistor el cual permite medir temperatura desde -55 a 125 °C incrementos de 0.5 °C con 9 bits de precisión en un tiempo de 200 ms.

El sistema opera sobre la tradicional interfaz de un conductor, no siendo imprescindible alimentación externa y teniendo un número de serie en ROM de 64 bits, lo que permite tener un conjunto de termómetro conectados por medio de un conductor y ser interrogados uno por uno, esto debido a su número de serie.

Para su funcionamiento el sensor ds18b20 se conecta a un microcontrolador, se alimenta de 3.5 a 5 volts de corriente directa (VDD) y se conecta a tierra (GND). El pin (DQ) que se muestra en la Figura 36 es para los datos de entrada-salida, este pin permite proporcionar la energía al dispositivo cuando se utiliza en modo de alimentación para otros sensores del mismo tipo, en cada pin de datos se conecta una resistencia de 4.7 K Ω para su funcionamiento. Para evitar el contacto físico con el suelo, el sensor se encapsulo con tubos de aluminio y se selló con plasti-loka de esta manera se evitó la entrada de humedad al sensor de temperatura.



Figura 36. Sensor de temperatura ds18b20 en capsulado.

4.2.6 Módulo de humedad de suelo.

El módulo de humedad de suelo YL-38, es un dispositivo que funciona por medio del principio resistivo. El funcionamiento se completa con un sensor HL-69 que utiliza la conductividad en dos terminales para determinar ciertos parámetros relacionados con el agua, líquidos y humedad. El modulo HL consiste en dos placas separadas entre sí por una distancia determinada, la placa está recubierta de una capa de material conductor, si existe humedad en el suelo se crea un puente entre ambas puntas, lo que es detectado por un circuito de control con un amplificador operacional que es el encargado de transformar el voltaje registrada a un valor analógico que puede ser leído por un Arduino.

Este módulo tiene 6 pines para su funcionamiento (Figura 37), uno para alimentación de 5v a 12v corriente continua, GND, A0 salida analógica, D0 salida digital, y los dos últimos pines es donde se realizan las mediciones para después ser procesadas en el Arduino. La precisión para este dispositivo es de, 0.5%, rango de medición para este dispositivo es de 0 a 99 % de humedad.



Figura 37. Módulo YL-38 para la humedad del suelo.

4.2.7 TDR 300 (Time Domain Reflectometry).

El equipo TDR 300 es un dispositivo que permite medir la humedad del suelo y la conductividad eléctrica del suelo en tiempo real, con este equipo se puede tomar varias mediciones de manera rápida. Un data logger interno y un puerto RS-232 que permite almacenar lecturas geo-referenciadas de las variables, el TDR 300 registra 2700 lecturas (1250 con la opción de GS/DGPS**). Incluye software y cable para descargar el valor de una representación gráfica de las mediciones del suelo. En la Figura 38 se puede apreciar el dispositivo, con sus varillas de trabajo.



Figura 38. Equipo TDR300.

En el Cuadro 5, se especifican las principales características del dispositivo TDR300.

Cuadro 5. Especificaciones técnicas del TDR 300.

Unidades de Medición	Porcentaje volumétrico de contenido de agua
Resolución	0.1%
Precisión	+3% de contenido volumétrico de agua con conductividad eléctrica $<2\text{dSm}^{-1}$.
Rango	0% a saturación (saturación es típicamente alrededor de 50% de agua volumétrica).
Alimentación	4 pilas alcalinas tamaño AAA
Pantalla	LCD de 16 caracteres y 2 líneas.
Peso	1.4 kg.
Dimensiones de las varillas	Log: 7.6, 12.0, y 12 cm. Dim; 0.5 cm, espaciamiento 3.3 cm.

4.2.8 Acero inoxidable 304.

Las varillas utilizadas como electrodos en el equipo construido para medir la humedad y conductividad eléctrica del suelo fueron el acero inoxidable 304, este tipo de acero presenta alta resistencia a la corrosión y presenta bajo contenido de carbón lo que permite una buena conducción en los electrodos, este tipo de acero tiene una resistencia eléctrica de 72 miliΩm (Figura 39).



Figura 39. Varillas de acero inoxidable 304.

4.2.9 MÉTODO GRAVIMÉTRICO.

Para determinar la humedad del suelo se utilizó el método gravimétrico, este método se basa en el principio de la determinación de la masa de agua contenida en la masa de sólidos de una muestra de suelo, es considerado el método estándar o de referencia para la mayoría de los métodos indirectos y unas de las formas para instrumentar algún método directo. La humedad gravimétrica es la forma básica de expresar la humedad del suelo y se entiende por ella como la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo. Frecuentemente se expresa como un porcentaje mediante la siguiente expresión (Porta *et al.*, 1999). Las muestras de suelo las cuales se le calculo la humedad fueron tomados a una profundidad de 20 cm. las muestras extraídas de suelo fueron depositadas en bolsas de plástico para después ser pesadas con una báscula electrónica, dicha bascula tiene una capacidad de 500 gramos y una precisión de 0.1 gramos.

$$\%(Humedad) = \left(\frac{PH-PS}{PS} \right) \times 100 \dots\dots\dots EC.$$

Dónde: %(Humedad)-Contenido de agua en el suelo; PH-masa de suelo húmedo en g;
PS-masa de suelo seco a la estufa en g;

En la Figura 40 se muestra el secado de las muestras de suelo con la cual se obtuvo la humedad gravimétrica del suelo del campo experimental.



Figura 40. Secado de muestras de suelo en la estufa Thelco scientific

4.2.10 GPS.

Para los posicionamientos y localización específica de los puntos muestreados en el campo experimental se usó un GPS 72H manual de la marca Garmin (Figura 41), realizando la combinación del GPS con el sistema de información geográfica SIG se creó el mapa de conductividad eléctrica del suelo y de la humedad, además de estos mapas se puede crear otras cosas como lo son los, mapas de rendimientos, levantamientos topográficos, muestreo de suelo, orientación de tractores, exploración de cultivos, aplicación de tasas de variable y, planificación de cultivos, etc. (Bragachini *et al.*, 2010).



Figura 41. GPS 72H Garmin, utilizado para posicionamiento de los puntos muestreados.

4.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.

Para el diseño y construcción del sistema electrónico se utilizó el software Proteus 8, en donde se desarrolló y se realizó una simulación del funcionamiento del circuito propuesto, en el circuito se conectaron los sensores de conductividad eléctrica del suelo y los sensores de temperatura.

El sistema electrónico desarrollado es capaz de almacenar los datos para posteriormente poder generar un mapa de CE del suelo en el software ArGis.

La funcionalidad del sistema eléctrico, es asegurar el buen contacto entre el suelo y los electrodos cilíndricos de acero inoxidable esto para tener una buena toma de lecturas; las funciones que realiza el sistema en la parcela son:

- ❖ Penetra el suelo a una profundidad determinada
- ❖ Toma la lectura de la resistividad del suelo
- ❖ Transforma las lecturas en conductividad eléctrica
- ❖ Guardar los datos en una memoria SD-card.

4.3.1 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN ARDUINO MEGA 2560.

En el capítulo anterior se describe las características de cada componente eléctrico a utilizar para la construcción del equipo propuesto. Las señales que se obtiene con el equipo son analógicas, al igual que los sensores de humedad, y los sensores de temperatura digital.

Para la programación del Arduino Mega, se utilizaron las librerías que a continuación se describen.

- ❖ `#include <DallasTemperature.h>` contiene la librería para el funcionamiento de los sensores de temperatura DS18B20.
- ❖ `#include <Wire.h>` se carga la librería Wire OneWire `oneWire (8);` se asigna el pin de entrada de datos de los sensores de temperatura conectados.
- ❖ `DallasTemperature sensores (&oneWire)` inicia la librería de DallasTemperature.
- ❖ `#include "RTCLib.h"` Incluye la librería RTC para el reloj de tiempo real.
- ❖ `RTC_DS1307 RTC;` Crea la comunicación con el RTC.
- ❖ `#include <SPI.h>` inicia el funcionamiento del RTC.
- ❖ `#include <SD.h>`, librería para la memoria SD card,
- ❖ `#include <LiquidCrystal.h>` librería para la pantalla de cristal líquido, `LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);` designación de los pines de entrada para el funcionamiento de la LCD para Arduino Mega.
- ❖ `#include <math.h>`
librería para las operaciones matemáticas en el programa. (Arduino, 2015).

El proceso seguido para la programación en el microcontrolador Arduino es el que se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 42.

El programa con el cual fue programado equipo de CE del suelo se encuentra en el anexo 7, en donde se hace mención de la ecuación del arreglo Wenner.

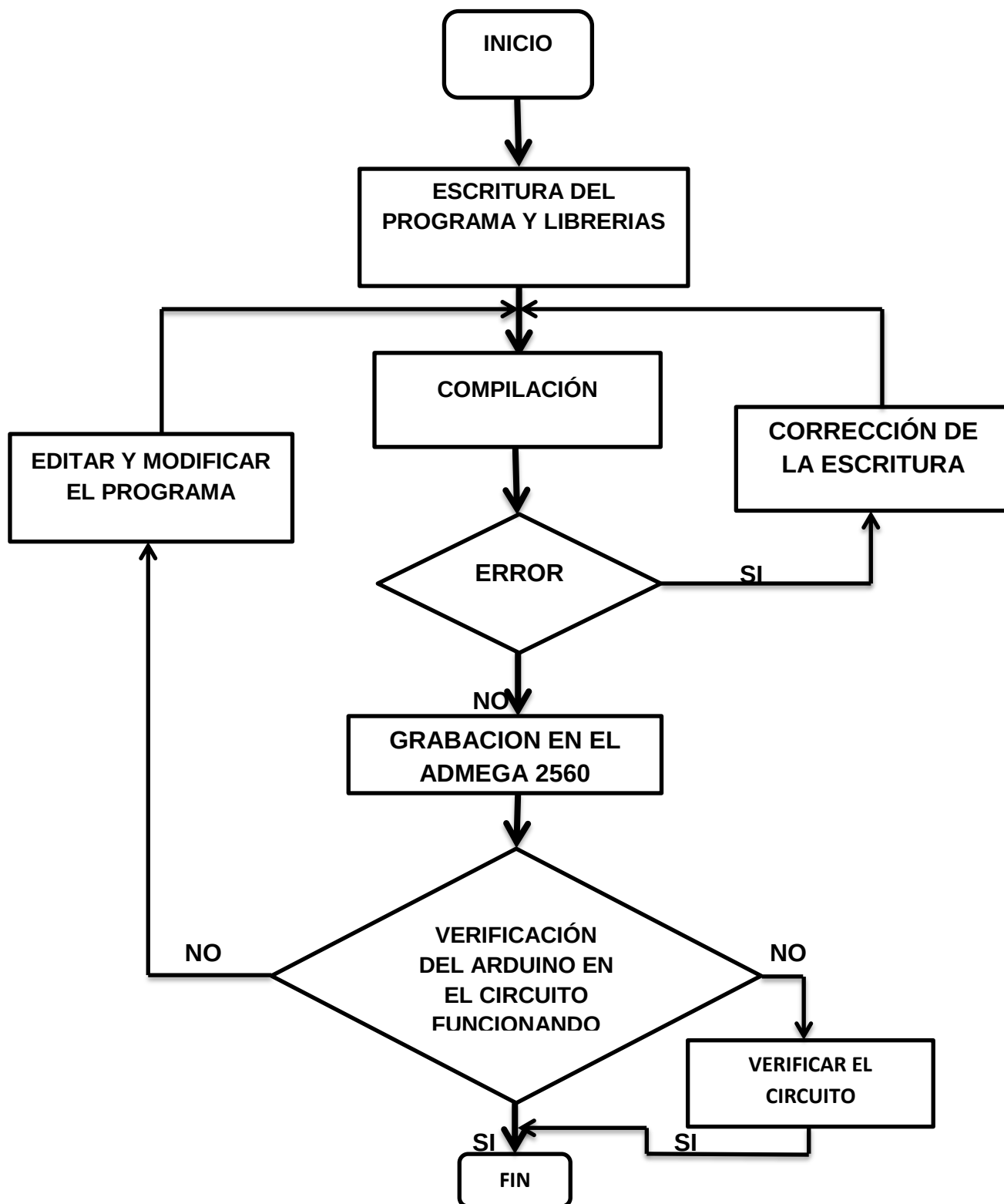


Figura 42. Proceso en la programación del microcontrolador Admega 2560.

4.3.2 VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados se pueden presentar de dos formas (Figura 43), una de las primeras formas de visualización es por medio de una pantalla de cristal líquido (LCD) y la segundo forma es por el puerto serial conectado a la PC. De las dos formas se genera un archivo el cual es guardado en una memoria SD card, los datos guardados en la memoria tiene una extensión txt.

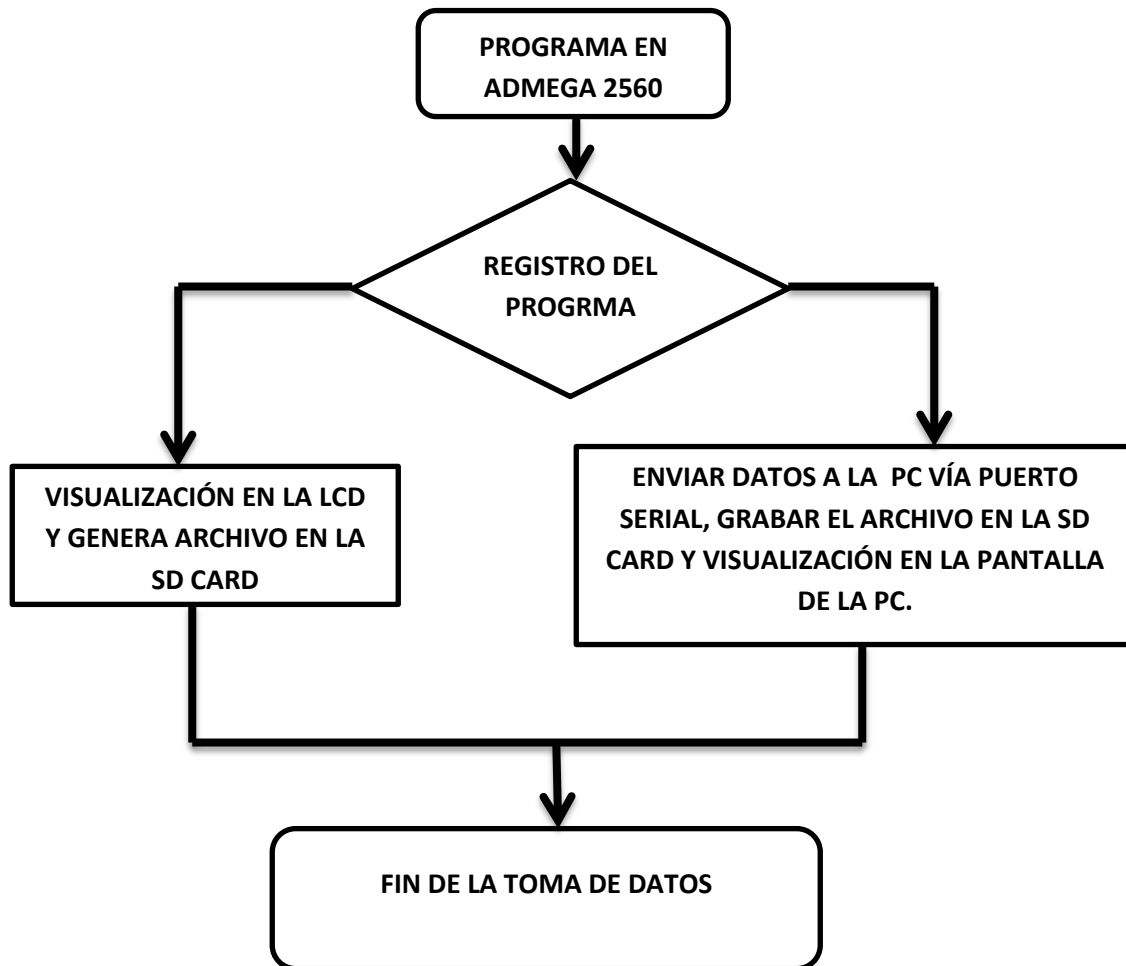


Figura 43. Esquema de las posibles formas de visualizar los resultados.

La inicialización del equipo se tiene representada en el diagrama de flujo que se observa en la Figura 44. En el cual se inicializa las partes fundamentales para su funcionamiento adecuado del equipo.

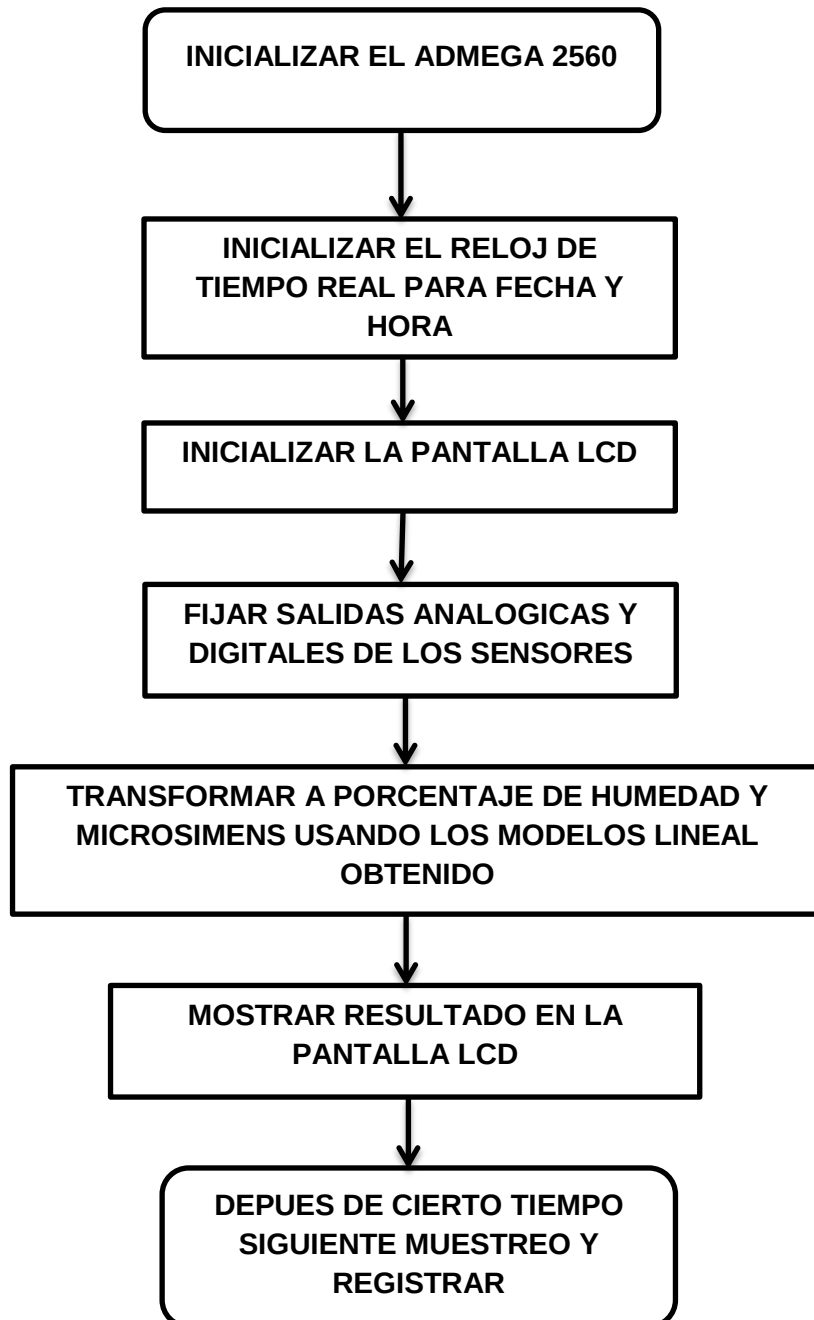


Figura 44 Diagrama general del sistema de adquisición de datos.

4.3.3 EVALUACIÓN DEL EQUIPO.

La evaluación del equipo se realizó comparando con un equipo TDR300 contra el equipo construido siguiendo el criterio estadístico, Para la evaluación cuantitativa se utilizaron los siguientes estadígrafos: error relativo, error estándar, desviación absoluta y desviación de la media. Estos parámetros son indicativos de la dispersión entre los valores obtenidos en campo de la humedad y conductividad eléctrica del suelo, también se aplicó una estadística de distribución normal, para verificar si el error es cercano a cero.

El Error relativo (Er) es calculado como:

$$Er = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{Y_m - Y_p}{Y_m} \right) * 100 \quad (17)$$

El Error estándar (SE) es calculado de la siguiente manera:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (18)$$

La desviación absoluta (AD) se calcula como:

$$AD = \frac{\sum |Y_m - Y_p|}{n} \quad (19)$$

La desviación de la media (Md) es calculada como:

$$Md = \frac{\sum (Y_m - Y_p)}{n} \quad (20)$$

Dónde: Y_m -valor calculado por gravimetría (%), Y_p - valor medido con el equipo (%) y n - número de muestras.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El desarrollo del programa se basó en la programación en Arduino, el cual permite enviar datos a la PC vía puerto USB, los valores recibidos en microcontrolador Admega 2560 es en forma analógica, los envía al puerto serial de la PC y a la pantalla LCD, como es la humedad, temperatura y conductividad eléctrica del suelo.

Anteriormente se describieron las características de la placa de Arduino misma que tiene 54 pines de conexiones, 16 analógicos y el resto son digitales, como los sensores de humedad trabajan con señal analógica, se conectaron al pin A4 y A5 que son los diálogos que presenta la placa. Los sensores de temperatura ds18b20 trabajan con señal digital, estos se conectaron al pin 22 con una resistencia de 4.7 K Ω en el pin de datos. En las letras (S) del sensor se conectaron los electrodos de conductividad eléctrica del suelo. Los sensores de humedad se conectaron en los mismos pines que el de CE, para realizar las mediciones es estos parámetros con los mismos electrodos. El microcontrolador lee la variación del voltaje y después la convierte en un valor numérico (señal analógica). En la Figura 45 se muestra el circuito, las resistencias que se utilizaron en el puente de Wheatstone fueron de 10 K Ω y los capacitores de 0.1microfaradio.

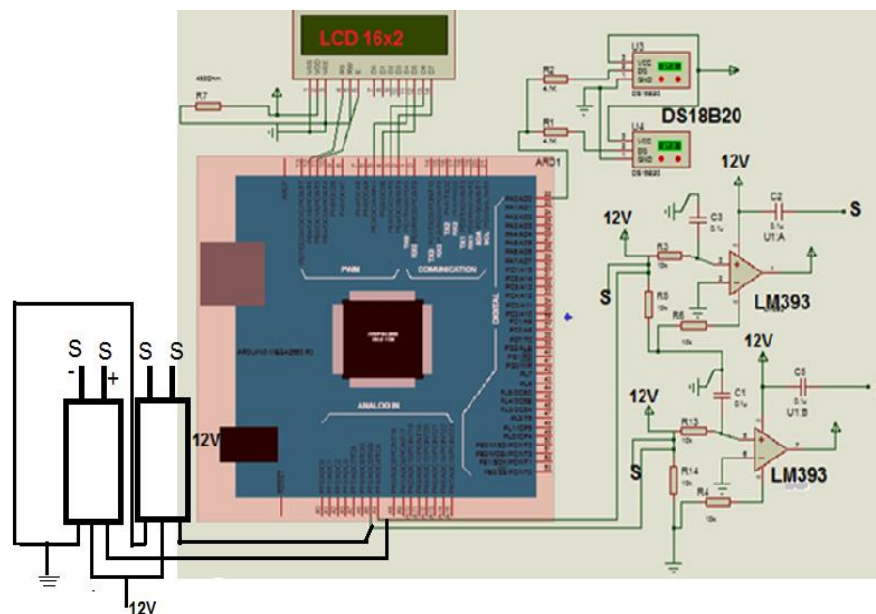


Figura 45. Circuito para obtener y visualizar los datos en la LCD y para tomar las lecturas de CE.

En la Figura 46 se presenta el circuito general que conecta todos los componentes electrónicos para el funcionamiento del dispositivo propuesto en forma portátil. El circuito se imprimió en una placa fenólica para su fácil acoplamiento de todos los componentes para ello, se utilizó el programa Fritzing.

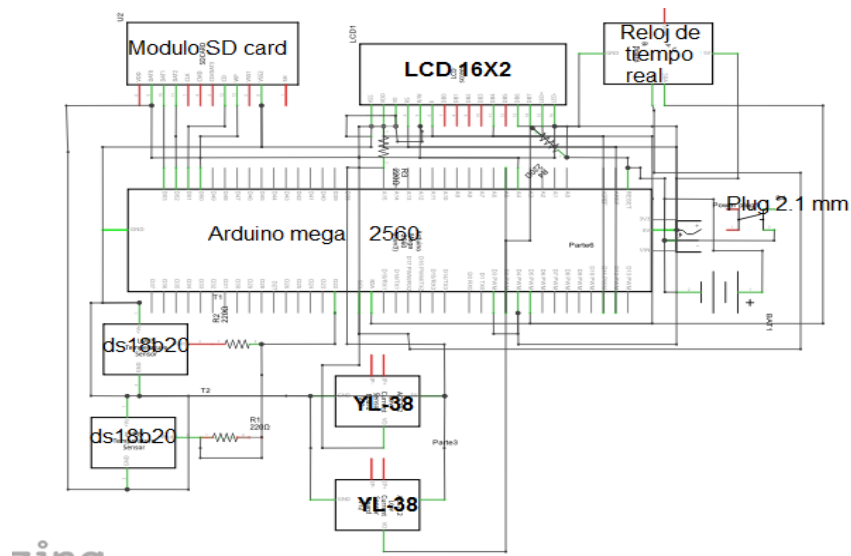


Figura 46. Diagrama de conexión de todos los componentes electrónicos del dispositivo

5.2 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

Para el ensamble de todas los elementos que componen el equipo de medición de conductividad eléctrica (CE), se tuilizó el software Fritzing (software libreEn la Figura 47 se muestra una representación gráfica de como quedaron las partes ensambladas al equipo construido.

En una placa fenólica de dimensiones de 8 X 25 cm se soldaron todos los componentes del circuito eléctrico, como son los sensores de humedad del suelo (modelo YL-38), pantalla LCD (liquid Cristal), módulo de reloj de tiempo real (módulo RTC), modulo SD card, Microcontrolador Arduino mega 2560, sensores de temperatura DS18B20 y las resistencias que componen al puente de Wheatstone.

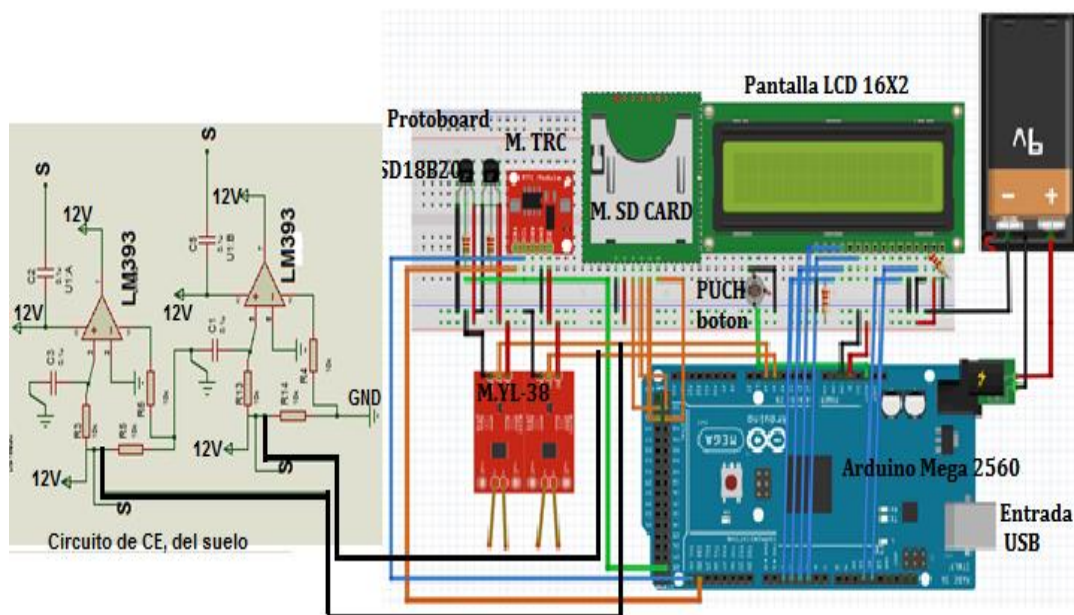


Figura 47. Ensamblaje de las piezas del circuito electrónico.

En función de los puntos anteriores todo queda plasmado en una pequeña caja de plástico, en la cual se realizaron perforaciones para la salida de los cables de los sensores temperatura y de los electodos, también se realizaron orificios para un puch botón para resetear el equipo, switch ON/OFF, orificios para la conexión del cable USB y para el cable de alimentación 12 VDC. También se realizaron ranuras para la extracción de la memoria SD y para la pantalla LCD. En la Figura 48 se puede observar el equipo construido.



Figura 48. Partes físicas importantes del equipo construido.

La alimentación de los sensores se realiza por medio del microcontrolador Arduino mega 2560 el cual tiene una salida de 5 V de corriente directa suficiente para alimentar los sensores de temperatura y los otros componentes del equipo. Los sensores de humedad y de CE, se alimentaron a 12VDC, conectándose directamente a la fuente de alimentación.

5.3 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES.

Para la calibración de los sensores de humedad, se tomaron muestras de suelo en el campo experimental “CERONA” (Figura 49) y se determinó el valor del porcentaje de humedad por el método gravimétrico. A si mismo se tomaron lecturas en milivoltios con el equipo, los datos se presentan en el anexo 1.

Con los valores de porcentaje de humedad y milivoltios medidos en cada muestra se obtuvo el modelo de calibración que se presenta a continuación, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.96$ y un error estándar de 0.90:

$$\text{humedad (\%)} = 0.512 * \text{milivolts} + 36.63 \quad (17)$$

Donde la variable milivoltios representa el valor proveniente de la resistencia del sensor en función del contenido de humedad del suelo. El sensor se conecta a uno de los puertos del Arduino (A0, A1....A15) con capacidad de conversión analógica, de tal manera que primero lee el voltaje en los sensores y después lo convierte a un valor numérico, para posteriormente en base al modelo de regresión lineal simple estima el valor de la humedad del suelo, y lo muestra en la pantalla.

La calibración del sensor de conductividad eléctrica del suelo se realizó con un equipo TDR300 (Figura 49) en donde la variable independiente fue la conductividad medida y la dependencia el voltaje obtenido con el equipo construido. Los datos utilizados para la calibración aparecen en el Anexo 2. A continuación se muestra el modelo regresión lineal simple obtenida, con el cual se programó el circuito, que tuvo un coeficiente de correlación $R^2 = 0.94$ y un error estándar de 27.33:

$$CE, (\mu S cm^{-1}) = 0.8877 \text{milivolt} + 234.97 \quad (18)$$

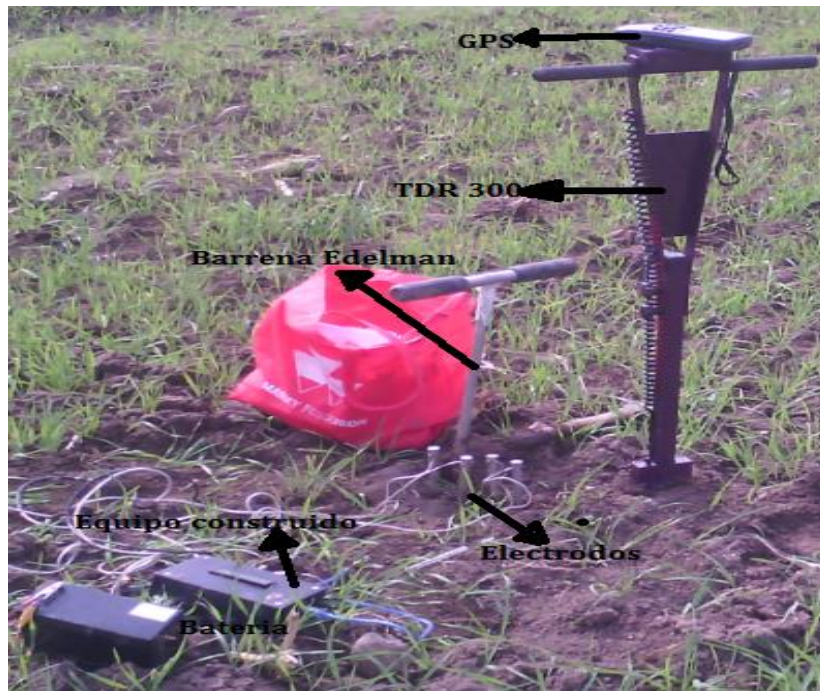


Figura 49. Toma de muestras de suelo y toma de lectura de la CE.

La variable milivolts representa el valor proveniente del sensor de CE, el cual se conecta a unos de los puertos del microcontrolador Arduino (A0, A1,...A15) con salida analógica. Primero lee la resistencia en los sensores y después lo convierte a un valor numérico, para posteriormente en base al modelo de regresión lineal simple estima el valor de la conductividad eléctrica, que se muestra en la pantalla del equipo.

Para la calibración de los sensores de temperatura DS18B20 se tomaron datos en la estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, la toma de lectura se realizó cada 20 minutos a diferentes profundidades 20 y 30 cm el 19 de septiembre de 2015 (Figura 46). La toma de datos se realizó de 8:00 am a 6:00 pm, obteniéndose el modelo siguiente, con un coeficiente de correlación de $R^2=0.98$. Los datos de calibración se pueden observar en el anexo 3.

$$Temperatura = 0.018millivolts + 19.865 \quad (19)$$

Donde la variable voltaje, representa el valor proveniente del sensor DS18B20. El valor de la temperatura medido con el sensor se muestra en la pantalla de cristal líquido.



Figura 50. Calibración de los sensores de temperatura del suelo DS18B20.

5.4 COMPROBACIÓN DEL DISPOSITIVO EN CAMPO.

Las pruebas se realizaron en el campo experimental la “CERONA” el día 25 de noviembre de 2015, donde se realizaron 30 mediciones para la humedad del suelo los datos se puede observar en el anexo 4 y 50 para la CE del suelo y la temperatura de los puntos muestreados. Las mediciones se tomaron a 20 cm de profundidad, a una distancia entre electrodos de 3.5 cm que es a la cual se encuentra las puntas del TDR 300 y de esta forma poder comprobar los resultaos obtenidos.

El comportamiento de la humedad determinada por el método gravimétrico y la humedad medida con elTDR300 y el equipo construido se representa en la Figura 51, en la cual se puede apreciar que las tres curvas tiene un comportamiento similar.

Al comparar las variaciones estadísticamente de la humedad por gravimétria y la humedad medida con el equipo construido se obtuvo una desviación absoluta de 0.43 %, un error estándar de 0.99%, un error relativo de 0.88% y una desviación de la media de -0.43. También se realizó el análisis estadístico para ver el comportamiento del equipo construido respecto al TDR300, en donde se encontró un error relativo de 0.08%, error estándar de 1.79%, desviación absoluta de 0.03% y desviación de la media de 0.03%. Como se puede apreciar, los valores de la media de los errores obtenidos se encuentran dentro del rango de 0.6 a 0.8 % de humedad reportado por Rawls et al (1982) y Sudduth (2003), demostrándose que los sensores son adecuados para realizar mediciones de humedad del suelo.

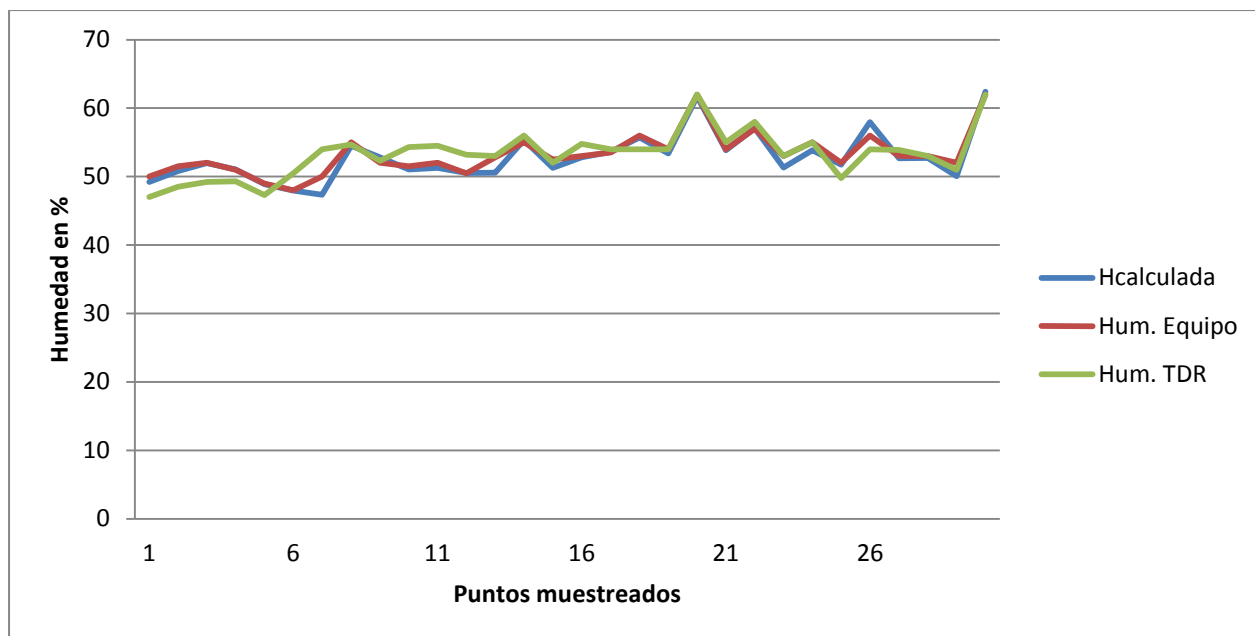


Figura 51. Comparación de las humedades (%) obtenidas por el método gravimétrico, el TDR300 y el equipo construido.

La Figura 52 muestra la distribución de las humedades del suelo por el método gravimétrico y el equipo construido, además se presenta el modelo lineal que se determinó y su respectivo coeficiente de correlación de (r^2).

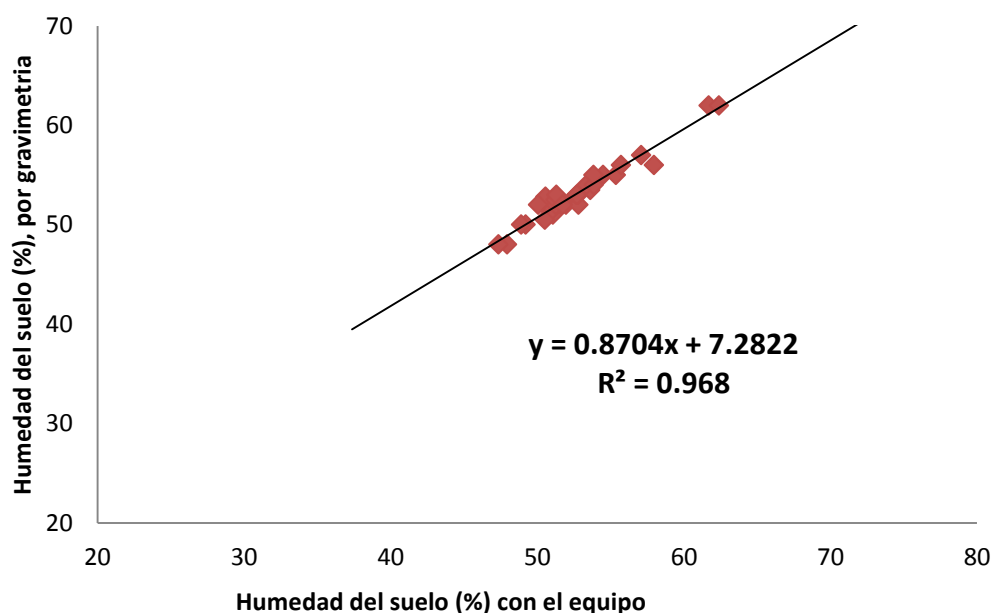


Figura 52. Grafica que relaciona la humedad del suelo por gravimetría y el equipo construido.

Como bien se puede observar en la Figura 52, la distribución que tiene es una normal, ya que las mediciones siguen una línea recta, y que el cuadrado medio del error es muy próximo a uno, indicando que las mediciones son congruentes en ambas mediciones.

Basado en el supuesto de que los errores tienen distribución normal sabiendo que el 96 % del área bajo la curva de la normal está comprendida entre la media de los errores y ± 0.906 veces la desviación estándar de la muestra.

Para obtener un intervalo de confianza para la media de los errores del 95% basado en la estadística obtenida, donde el error medio obtenido $\bar{r} = 0.433$, y aplicando la siguiente expresión Montgomery (2005) se tiene:

$$\bar{r} - \left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right) * t_{\frac{\alpha}{2}, (n-1)} < \mu < \bar{r} + \left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right) * t_{\frac{\alpha}{2}, (n-1)} \quad (21)$$

Dónde: n-es el número de muestras; S-es la desviación estándar de la muestra; $\bar{r}$ media del error.

$t_{\alpha/2}, (n-1) = 2.045$, valor obtenido de las tablas (Infante y Zàrate 2005).

En la Figura 53 se muestran los residuos de la humedad del suelo contra la humedad obtenida con el equipo construido.

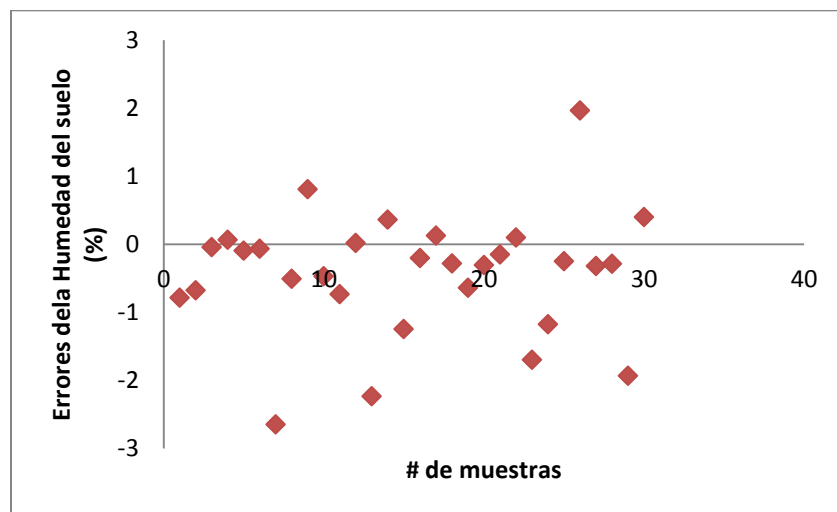


Figura 53. Residuos del modelo lineal obtenido por gravimetría.

Para obtener el intervalo de confianza para la media de los errores del 95%, de la expresión 18 se obtuvo que μ (la media del error) se encuentra en el intervalo siguiente

($0.095 < \mu < 0.771$) y efectuando una prueba de hipótesis para verificar si la media de los errores es cero, se tiene lo siguiente

Donde $\alpha = 0.05$ es el nivel de significancia de la prueba (probabilidad de cometer el error tipo I).

Por lo cual se calculó lo siguiente; $t_0 = \left(\frac{\sqrt{n}(\bar{r}-0)}{s} \right) = t_0 = \left(\frac{\sqrt{30}(0.433)}{0.906} \right) = 2.022$ y el valor de la tabla fue de $t_{\alpha/2(n-1)} = 2.045$, resulto ser que la prueba de hipótesis nula se rechaza, que se obtuvo un valor de 2.022, en conclusión la media poblacional de los errores del modelo de regresión lineal es cero con un $\alpha = 0.05$

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar el siguiente juego de hipótesis donde se prueba, en la hipótesis nula, que el valor de los parámetros del modelo de regresión lineal simple son iguales a cero y en la alterna que son diferentes de cero, dado por la siguiente expresión $H_0: \beta_i = 0$ vs. $H_a: \beta_i \neq 0$ (Infante y Zàrate 2005).

El intervalo de confianza para los parámetros de modelo está dado por la siguiente expresión, donde $\alpha = 0.05$ representa el nivel de confianza y está dado por la expresión siguiente.

$$L = \hat{\beta}_i \pm S_{\hat{\beta}_i} * t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2), i = (0,1,2,3 \dots n) \quad (21)$$

Al sustituir los resultados obtenidos en la distribución de t-Student, de la prueba de hipótesis, se tiene los límites del intervalo para β_1 al 95% con $t_{\alpha/2(30-2)} = 2.048$, esta dado por; $L = 0.8704 \pm 0.053 * 2.048$ por lo que los parámetros son $[0.762, 0.978]$ % de humedad se demuestra que no incluye al cero, con lo cual se refuerza el resultado obtenido en las pruebas de hipótesis previamente planteadas.

Lo que significa que el valor del parámetro β_1 con un 95% de probabilidad se encuentra en el rango de $[0.762, 0.978]$ demostrado que no incluye al cero, con lo cual se refuerza el resultado obtenido en a prueba de hipótesis previamente planteada.

5.5 EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.

Para la validación del equipo de medición de conductividad eléctrica, se realizó el mismo procedimiento estadístico que se utilizó para el parámetro de humedad de suelo.

Para poder llevar acabo la evaluación, se tomaron lecturas de medición de la conductividad eléctrica del suelo con el equipo construido y el TDR 300, en el campo agrícola experimental la “CERONA”, muestreándose 50 puntos en un área aproximada de 4 hectáreas, los datos se pueden observar en el Anexo 5. En la Figura 54, se representa los datos obtenidos entre ambos equipos, en el cual se puede ver que las líneas tienen la misma tendencia.

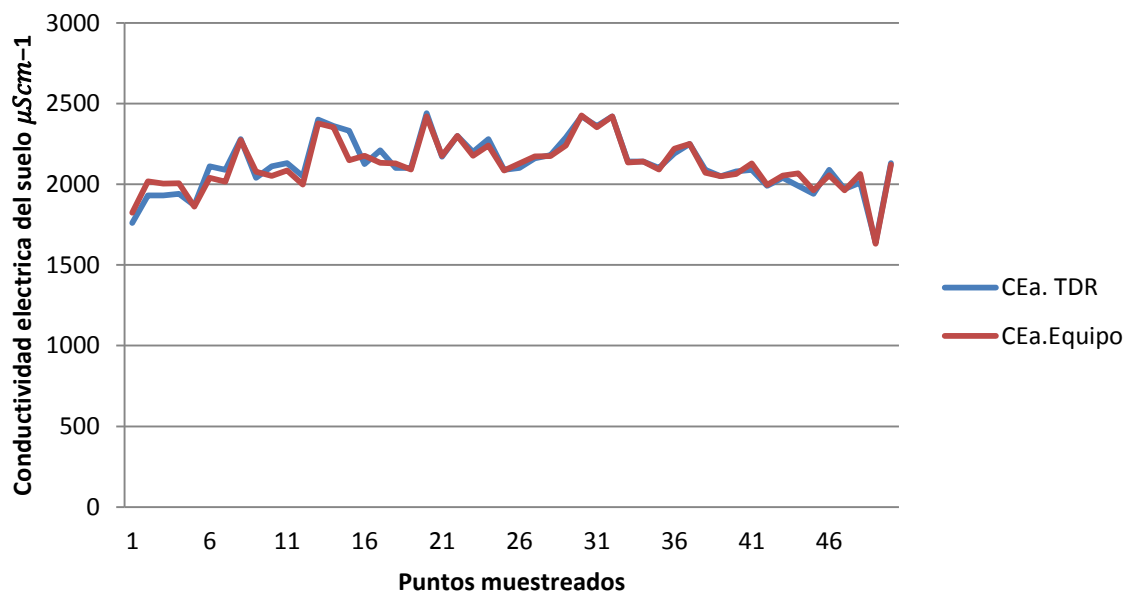


Figura 54. Grafica comparativa TDR300 y el construido.

Al comparar las variaciones de la CE del suelo estadísticamente, la calculada con el TDR300 y la medida con el equipo construido se obtuvo un Error relativo de 0.10%, una desviación absoluta de $3.66 \mu S cm^{-1}$ y un error estándar de $33.42 \mu S cm^{-1}$. Los valores anteriores, se encuentran dentro del rango de error que debe tener un equipo de medición de conductividad eléctrica del suelo, entre $13 \mu S cm^{-1}$ a $25 \mu S cm^{-1}$, obtenidos por Araujo et al, (1979), Johnson et al, (2001), lo que indica que el equipo funcionamiento correctamente y puede ser utilizado para medir la CE in situ.

Con los datos de conductividad eléctrica del suelo obtenidos en campo se realizó la Figuras 55, observándose que tiene un comportamiento lineal, con un coeficiente de determinación (r^2) DE 0.97, lo que demuestra que los datos tienen una distribución normal.

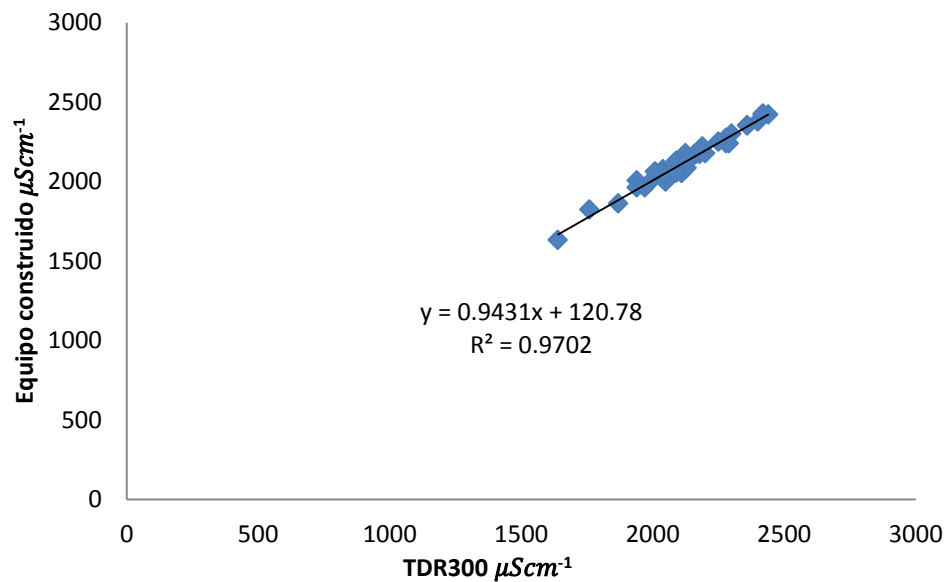


Figura 55. Conductividad eléctrica del suelo con el equipo TDR 300 contra el equipo construido.

En la Figura 56 se muestra el comportamiento de los residuos, observándose que los errores tiene un comportamiento aleatorio.

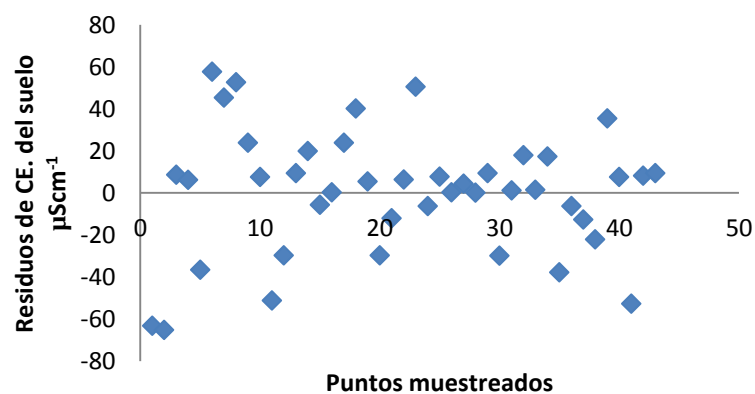


Figura 56. Comportamiento de los residuos de CE.

Para obtener el intervalo de confianza para la media de los errores del 95% basado en la estadística obtenida donde el error medio obtenido $\bar{r} = 20.06$, y aplicando la misma

estadística que el los sensores de húmedas del suelo se encontró que el intervalo de confianza para la media de los errores del 95%, de la expresión 21 se obtuvo que μ (la media del error) se encuentra en el intervalo siguiente $(-15.35 < \mu < 24.77) \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y efectuando una prueba de hipótesis para verificar si la media de los errores es cero, se aplica un juego de hipótesis y utilizando el criterio de rechazar H_0 .

Por lo cual se calculó lo siguiente; $t_0 = \left(\frac{\sqrt{n}(\bar{r}-0)}{s} \right) = t_0 = \left(\frac{\sqrt{43}(20.06)}{5.42} \right) = 24.26$ y el valor de la tabla fue de $t_{\alpha/2(n-1)} = 2.0181$, resulto ser que la prueba de hipótesis nula se rechaza, se obtuvo un valor de 0.499, en conclusión la media poblacional de los errores del modelo de regresión lineal es cero con un $\alpha = 0.05$

Al sustituir los resultados obtenidos en la distribución de t-Student, de la prueba de hipótesis, se obtuvo el intervalo para β_1 al 95% con $t_{\alpha/2(43-2)} = 2.019$, esta dado por la expresión 22; $L = 0.943 \pm 10.47 * 2.019$ por lo que los parámetros son $[-8.08, 9.96]$ se demuestra que no incluye al cero, con lo cual se refuerza el resultado obtenido en las pruebas de hipótesis previamente planteadas.

Lo que significa que el valor del parámetro β_1 con un 95% de probabilidad se encuentra en el rango de $[-8.08, 9.96]$ demostrado que no incluye al cero, con lo cual se refuerza el resultado obtenido en a prueba de hipótesis previamente planteada.

La temperatura con la cual se midió los parámetros de la humedad y de CE del suelo fueron de 22.2 a 27.7 °C, con un promedio de 23.68 °C, los datos se puede observar en anexo 6.

5.6 REPRESENTACIÓN GEOESPACIAL DE LOS DATOS OBTENDIOS EN CAMPO.

A partir de la información espacial de los puntos de muestreo se elaboró el mapa de CE del suelo utilizando el sistema de información geográfico Arcgis. Para ello, se creo una capa puntual que posteriormente mediante el método de interpolación Spline, permitio obtener zonas con características similares, es decir zonas con similares valores de CE.

En la Figura 57 se puede observar el mapa de CE resultante, en donde se puede ver claramente las zonas bien definidas de acuerdo con los valores obtenidos en campo. Para tomar decisiones respecto a la variabilidad presente en la parcela y sus

características, Adamchuk *et al.* (2002) señalan que debe integrarse otras capas de información como es el mapa de rendimiento de la cosecha o un mapa regional de suelo para el mismo campo. Lo anterior permite recomendar prácticas de manejo de la parcela, que permitan optimizar recursos minimizando el impacto ambiental.

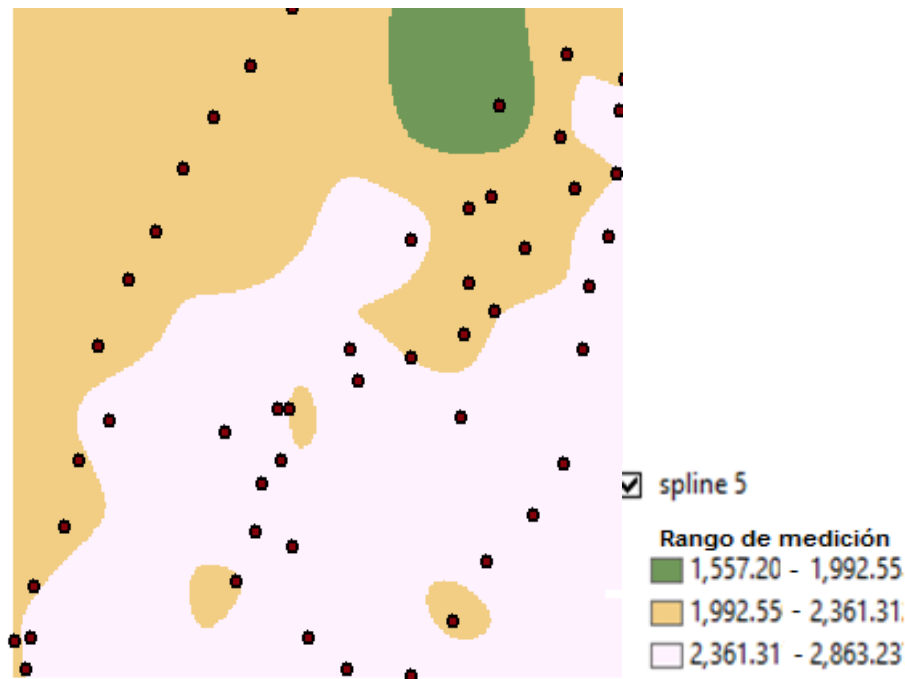


Figura 57. Mapa georreferenciado de la conductividad eléctrica del suelo.

De igual manera, se siguió el procedimiento anterior para los datos de humedad del suelo medidos en el campo experimental, obteniéndose el mapa de humedad que se muestra en la Figura 58. En el mismo, se puede observar que la estructura espacial del contenido de humedad del suelo tiene cierta similitud con los resultados de CE mostrados en la Figura 57.

Lo anterior se debe a que en el suelo la corriente eléctrica es conducida por la fase líquida, la cual depende directamente del contenido de agua del suelo. Estas variaciones del contenido hídrico en el suelo según Friedman (2005) y McCutcheon *et al.* (2006) son debidas a la variación en la distribución del tamaño de partículas.

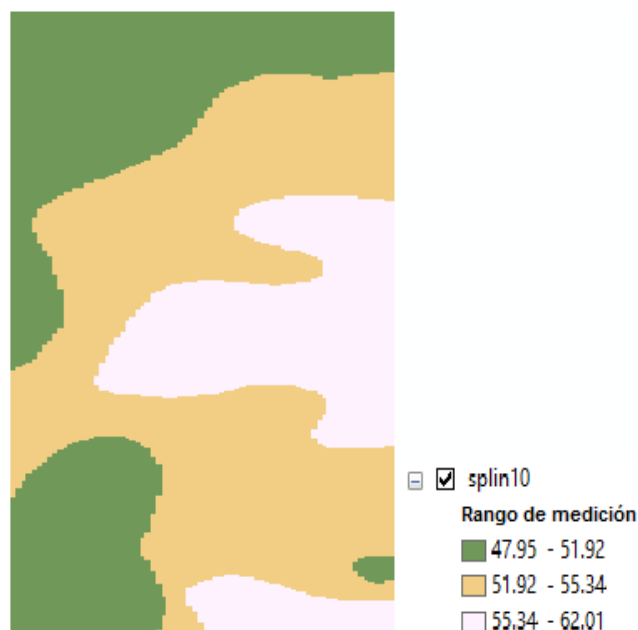


Figura 58. Mapa georreferenciado de la humedad del suelo.

Las Figuras 57 y 58 muestran los resultados de medir la CE y la humedad con el equipo construido, sin embargo es necesario realizar estudios que permitan determinar la relación espacial de estos parámetros en diferentes tipos de suelos para definir la cantidad de puntos y la separación entre estos para garantizar la calidad de los métodos de interpolación espacial.

5.7 ANÁLISIS DE COSTO.

Para el equipo construido en el Cuadro 6, se especifica el precio en pesos mexicanos, de cada uno de los componentes usados para medir la conductividad eléctrica del suelo.

Cuadro 6. Precio de los componentes del equipo construido.

ARTICULOS	CANTIDAD	COSTO
Arduino mega 2560	1 pieza	\$290.00
2 Modulo para medir la humedad	2 piezas	\$70.00
2 sensores ds18b20	2 piezas	\$55.00
Pantalla de cristal líquido LCD 16x2	1 pieza	\$60.00
Reloj de tiempo real RTC I2C	1 pieza	\$115.00
Batería 12 V	1 pieza	\$120.00
Módulo de SD Card	1 pieza	\$130.00
Swich	1 pieza	\$3.00
Puch botón	1 pieza	\$2.50
Capacitor 0.1uF	1 pieza	\$12.00

4 Resistencia de 10K, ¼ watt	4 piezas	\$10.00
2 Resistencia de 4.7K, ¼ watt	2 piezas	\$6.00
Amplificador operacional U393	1 pieza	\$60.00
Varilla de acero inoxidable 343, ½ pulga.	1 pieza 2 metros	\$200.00
Cable	1 pieza	\$30.00
Soldadura	1 pieza	\$28.00
Plug 2.1 mm.	1 pieza	\$15.00
Placa fenólica	1 pieza	\$45.00
Caja de plástico	1 pieza	\$55.00
Total		\$1431.00

En el Cuadro 6, se especifica el costo de todos los componentes utilizados, pero es necesaria la ayuda de un técnico en electrónica para el ensamble del prototipo, considerando los salarios actuales de \$190.00 pesos por mano de obra. También es necesaria la participación de un especialista en ingeniería para la programación del microcontrolador, con un salario de \$700.00 pesos. Por lo cual el costo de la mano de obra es de 1680.00 pesos, que sumando al costo de los materiales de un valor total de 3111.00 pesos.

Los equipos que se encuentran en el mercado para medir conductividad eléctrica del suelo de forma portátil, como lo es el equipo TDR300 tiene un costo de \$20 500.00, según Spectrum Technologies (2015). Este costo puede incrementarse si se incluye los accesorios adicionales, demostrándose que el costo del equipo diseñado y construido es casi 7 veces menor en comparación con el TDR300.

6 CONCLUSIONES.

- ✚ Se diseñó el circuito electrónico para medir la conductividad eléctrica del suelo en $\mu S cm^{-1}$, considerando la humedad % y temperatura en grados Celsius, en el diseño fue necesario poner una pantalla LCD para la visualización de los datos, una tarjeta Sd card para guardar los datos obtenidos en formato txt, y un módulo de reloj de tiempo real para identificar las fechas de toma de datos.
- ✚ Se realizó un programa en Arduino para la medición de conductividad eléctrica del suelo utilizando el arreglo tipo Wenner.
- ✚ Se construyó un equipo para determinar la conductividad eléctrica, la humedad y la temperatura del suelo en tiempo real.
- ✚ En la evaluación del equipo se encontró que para conductividad eléctrica el error relativo, el error estándar y la desviación absoluta fueron de, 0.10 %, de 33.42, $3.66 \mu S cm^{-1}$, respectivamente
- ✚ En la evaluación del equipo se obtuvo que para la humedad comparado con el método gravimétrico, el error relativo, el error estándar y la desviación absoluta fueron de 0.88, 0.99 y 0.43 % de humedad, respectivamente
- ✚ En la evaluación del desempeño del equipo de conductividad eléctrica, se obtuvo el intervalo de confianza del error $(-15.35 < \mu < 24.77) \mu S \cdot cm^{-1}$ con una probabilidad del 95%. y en la humedad $(0.095 < \mu < 0.771)$ con una probabilidad del 95%.

6.1 RECOMENDACIONES.

Se recomienda realizar las mediciones en verano, ya que en esa época se encuentra el suelo a una temperatura constante y la humedad es favorable para las mediciones.

Limpiar los electrodos cuando tengan residuos de suelo adheridos, y para ello debe utilizarse agua destilada o en dado caso con agua simple y secarlo muy bien.

Utilizar corriente alterna para evitar la polarización de los electrodos, y de esa manera evitar errores en las mediciones, la corriente que se usa es de 18 v.

No se deben realizar mediciones cuando se tengan equipos próximos al área de muestreo, y su funcionamiento pueda afectar las lecturas.

En nuevos desarrollo del equipo debe incluirse el uso de gps para que además de los parámetros de ce, humedad, temperatura se obtenga información georeferenciada.

8 BIBLIOGRAFÍA.

ABDU H., ROBINSON D.A., JONES S. B. 2007 Comparing Bulk Soil Electrical Conductivity Determination Using the DUALEM-1S and EM38-DD Electromagnetic Induction Instruments. Soil Science Society of American Journal, 71: 189-196.

ACUÑA J., IGLESIAS M., JARA J. 2011. Medida de Resistividad de Terreno. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Eléctrica. Laboratorio de Ingeniería Eléctrica. EL3003. 12-16 Pp.

ADAMCHUK V.I., JASA P.J. 2002 Precision Agriculture: On-the-Go Vehicle-Based Soil Sensors, Extension Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln, University of Nebraska – Lincoln, EC02-178, 4 p.

ALONSO SARRÍA FRANCISCO. 2006. Sistema de Información Geográfica (SIG), Universidad de Murcia Departamento de Geografía Física. ISSN-e 1989, N° 29, 2 Pp.

ARAUJO R.L., ASSUMPCAO H.G., TRIGINELLI W.A.C., M.A. 1979. "Behavior of High Resistivity Soils in a Tropical Area", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Almeida Vol. PAS-98, N°6, 2076-2081 pp.

BARRY J.A., EHSANI M.R., DANIELS J.J., 2008 Handbook of Agricultural Geophysics, CRC Press.

BLATTA S.L., TERRALIA. 2014 Revista No. 16, Agricultura de Precisión. Pp, 18.

BOHN H.L., MCNEAL B.L., O'CONNOR G.A., 1979. Soil Chemistry, John Wiley and Sons. New York.

BRAGACHINI M., VON M., A., MÉNDEZ A., TULA M. 2010. Comparación entre GPS Autnómo y con Corrección Diferencial. Proyecto Cosecha y Poscosecha de granos INTA.

CALLEGARY J.B., LEENHOUTSA J.M., PARETTIA N.V., JONESA C.A. 2007. Rapid Estimation of Recharge Potential in Ophemeral-Stream Channels Using Electromagnetic methods, and measurements of channel and vegetation characteristics. Journal of Hydrology, 344: 17-31.

CHELOTTI L., ACOSTA N. FASTER M. 2010. Método Electromagnético y de Polarización Inducida Geofísica Aplicada U.N.P.S.J.B. Chubut. Argentina 1-24 pp.

CORWIN D.L., LESCH S.M. 2005, Characterizing Soil Spatial Variability with Apparent Soil Electrical Conductivity: Survey Protocols

CORWIN D.L., LESCH S.M., FARAHANI H.J., 2008 Theoretical Insight on the Measurement of Soil Electrical Conductivity, Handbook of Agricultural Geophysics, CRC Press.

DOERGE T., KITCHEN N.R., LUND E.D. 2010. Mapeo de Conductividad Eléctrica del Suelo. Guías para el Manejo del Suelo Adecuado en Cada sitio. SSMG-30. Traducido y Adaptado para Colombia por Alberto Lobo, Sanz Guerrero. LOGEMIN S.A.

EDWARDS L.S. 1977. A Modified Pseudosection for Resistivity and Induced-Polarization, *Geophysics* 42, 1020-1036.

ENRIQUE B. F., DROSDOFF M. 1967. Manual de Riego y Avenamiento. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A. Sona Andina. Turrialba, Costa Rica. Pp. 336-339.

ENRÍQUEZ H. R. 2009. Guía de Usuario de Arduino. I.T.I. Sistemas Universidad de Córdoba. Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 3.0 San Francisco California, 94105, USA.

FRIEDMAN S.P. 2005. Soil Properties Influencing Apparent electrical Conductivity, a Review. *Computers and Electronics in Agriculture* 45-70 pp.

GEBBERS R., LÜCK E. 2005. Comparison of Geoelectrical Methods for Soil mapping. In *Precision Agriculture '05*.

GEREMÌA A., CESARI C., ABRATE R., GHERARDI E.H. 2010. Proyecto Agricultura de Precisión INTA. Soil Doctor: Crop Technology, inc. Manfredi

GRISSE R. B., A. W. G. MARK, D. HOLSHOUSER, W. THOMASON. 2007. Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity. Virginia Cooperative Extension. Pp 442-508.

HENDRICKX J., KACHANOSKI R.G. 2002. Indirect Measurement of Solute Concentration: Nonintrusive Electromagnetic Induction. In Dane, JH & GC Topp (ed.). *Methods of soil Analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.* pp. 1297-1306.

HOLGUIN Q.S.M., VEGA F.F.V. 1988. Fundamento de Electroquímica. Instituto Politécnico Nacional.

INSTITUTO VALENCIANO DE INVESTIGACION AGRARIA (IVIA). 2011, Como se evalúa la Salinidad del agua de riego y del suelo agrícola. . ISSN-e 1945, N° 32, 2011. Pp 2.

ISAAKS E.H., SRIVASTAVA R.M. 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, NY.

JOHNSON C.K., DARON J.W., WIENHOLB.J. SHANAHAN J.F. 2001 Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition, *Soil Science Society of America, Journal.* 65, 1829-1837.

KRAVCHENKO A.N., BULLOCK D.G. 1999. A comparative Study of Interpolation Methods for Mapping Soil Properties. *Agron. J.* 91, 393-400.

KITCHEN N.R., DRUMMOND S.T., LUND E.D., SUDDUTH K.A., BUCHLEITER K.A.2003. Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil-Crop System. Agron. J. 483-495 pp.

LASLETT G.M., MCBRATNEY A.B., PAHL, P.J., HUTCHINSON M.F.1987. Comparison of Several Spatial Prediction Methods for Soil pH. J. Soil Sci. 38, 325– 341.

LEENAERS H., OKX, J.P., BURROUGH P.A. 1990 Comparison of Spatial Prediction Methods for Mapping Floodplain Soil Pollution. Catena 17, 535–550.

LOKE M.H. 2010. Tutorial; 2-D and 3-D Electrical Imagen Surveys 29-37pp.

LUTERS A., SALAZAR J. C. 1999. USDA Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola Servicio de Conservación de Recursos Naturales Instituto de Calidad de Suelos.14-15, 33,59-67 pp.

MACHADO S. G. 2009. Medida de la Conductividad Eléctrica Aparente del Suelo por Inducción Electromagnética y Variabilidad Espacial de Propiedades Físicas y Química del Suelo. Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Agroforestal. Pp 20-33.

McNEILL, J.D. 1980. Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Technical Note,TN5, Geonics Ltda, Ontario, 22p.

MARONI J. R., GARGICEVICH A. 1996. Mapeo de Rendimientos, Precisión para Detectar Variables Inducidas en el Cultivo. Revista Agromensaje de la Facultad de Ciencias Agrarias 23/12/2007. Universidad Nacional de Rosario. ISSS 16698584.

ROMERO M. P., SANTAMARÍA D. M., ZAFRA C. A. 2009. Bioingeniería y Suelo: Abundancia Microbiológica, pH y Conductividad Eléctrica Bajo Tres Sustrato de Erosión. Universidad Manuela Beltrán Colombia. ISSN: 1692-3375, Umbral Científico, núm. 15, pp. 67-74.

MCCUTCHEON M.C.FARHANI H.J., STEDNICK J.D.,BUCHLEITER G.W., GREEN T.R. 2006. Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity and Texture Relation Ships in a Dryl and Field. Biosystems Engineering 19-32 pp.

MUÑOZ I. D. J., MENDOZA C. A., LÓPEZ G. F., SOLER A. A., HERNÁNDEZ M., M. M. 2000 Manual de Análisis de Suelo. Edafología. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM, México.

ORELLANA E. 1982. Prospección Geoelectrica en Corriente Continua Ed. Paraninfo. 2da, Madrid España 569 pp.

OSCAR L., ISRAEL M. 2014 La Salinidad y su Influencia en Suelos y Plantas. Autoridad Nacional del Agua.

OVALLES V., FRANCISCO A. 2006. Introducción a la Agricultura de precisión. Revista Digital CENIAP HOY N° 12 septiembre-diciembre, 2006. INIA-CENIAP, Maracay Venezuela.

PAGGI M., PERALTA N., CALANDRONI M., CABRIA F., COSTA J. L., APARICIO V.. 2013. Identificación de Series de Suelos Mediante el Uso de Sensores de Conductividad Eléctrica Aparente en el Sudeste Bonaerense. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Agronomía (UNMdP- FCA), Estación Experimental INTA-Balcarce, C.C. 276 (7620) Balcarce, Argentina. Ciencia del Suelo, versión On-line ISBN 1850-2067, vol.31 no.2 Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

PERALTA N., CASTRO F. M, COSTA J.L., CALANDRINI M. 2012. Delimitación de Zonas de Manejo Mediante la Relación entre Conductividad Eléctrica Aparente del Suelo y Mapas de Rendimientos. Ciencias Agrarias-UNMdP. CONICET. INTA Balcarce.

QUESHUAYLLO C., WILBERT R. 2005. Diseño y Ejecución de una Puesta a Tierra de Baja Resistencia. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (UNMSM). Facultad de Ciencias Físicas. EAP. pp 18-25.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L. (1990) Soil electrical conductivity: effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. Communications in Soil, Science Plant Analysis. 21: 837-860.

RAWLS, W., D. BRAKENSIEK, K. SAXTON. 1982. Estimation of Soil Water Properties. Trans. of the ASAE 25: 1316-1321.

RUIZ JOSE R. Agosto 2011. Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala ATAGUA.

SAMOUËLIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A., RICHARD G. (2005). Electrical Resistivity Survey in Soil Science: A Review. INRA, Unité de Science du Sol, BP 20619, 45166 Ardon, France. Universität Heidelberg, Institut Für Umweltpysik INF 229, 69120 Heidelberg Germany. UMR 7619 SISYPHE Case 105, 4 Place Jussien 75005 Paris, France. ISTO, UMR 6113 CNRS-UO Université d'Orleans, Geosciences, BP 6759, 450067 Orleans Cedex 2, France. INRA Uninete d' Agronomie, Rue Fernand Christ, 02007 Laon, France. Science Direc, Elservier, soil and Tillage Research 83 (2005) 173-193.

SANTOVENIA D. J., TERRAGÓ M. C. 2009. Sistema de Información Geográfica para la Gestión de Información. ACIMED-SciELO, V. 20. N°. 5. ISSN. 1024-9435. Pp 3.

SCANTERRA CONSULTORA 2014, Agricultura de Precisión, Capital Federal, Argentina. http://www.scanterra.com.ar/agricultura_precision_inf.html.

SUDDUTH K.A., DRUMMOND S.T., KITCHEN N.R. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 31: 239-264.

SUDDUTH K.A., KITCHEN N.R., BOLLERO G.A., BULLOCK D.G., WIEBOLD W.J. 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity, Agronomy Journal 95, 472-482.

VALERO UBIERNA CONSTANTINO. 2013, Agricultura de Precisión Conceptos y Situación Actual. Departamento de Ingeniería Rural, Universidad Autónoma de Madrid.

WARRICK A.W., ZHANG R., EL-HARRIS M.K., MYERS D.E. 1988 Direct Comparisons Between Kriging and other Interpolators. In: Wierenga, P.J., Bachelet, D. (Eds.), Proceedings of the Conference on Validation of Flow and Transport Models for the Unsaturated Zone. New Mexico State University, Las Cruces, NM, USA.

YANQUE T., YANNICK I. 2003, Medida de resistividad del suelo, resistencia de puesta a tierra y potenciales de toque y paso. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de ingeniería Mecánica. Lima, Peru. pp. 21-27.

Páginas de internet consultadas.

<http://www.terralia.com/revista16/pagina18.htm>

<http://www.geocarta.net/html/Agriculture.html>.

<http://www.veristech.com/the-sensors/q2800#p326>

<http://www.veristech.com/images/home/Quad1000.pdf>

<http://www.veristech.com/the-sensors/q1000#question1>

<http://www.veristech.com/the-sensors/v3100>

<http://www.geonics.com/html/conductivitymeters.html>

http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&cont=cmd_ov

http://www.geophex.com/GEM2_handheld_HowToSurvey.htm

<https://www.grdc.com.au/Research-and-Development/GRDC-Update-Papers/2013/03/A-how-to-for-getting-soil-water-from-your-EM38-field-measurements>.

<http://www.arduino.cc/en/Main/software>.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de la humedad del suelo por el método gravimétrico y el equipo construido para la calibración.

1%humedad milivolts			
35.59322034	50	29.08093278	57
50.00	51.5	28.96678967	53
24.08293461	52	31.93069307	55
33.37236534	51	30.09985735	52
34.18079096	49	28.94333844	56
37.16931217	48	30.76923077	53
32.86516854	50	28.23164426	53
37.56845564	55	31.74250832	52
34.01639344	52	31.77142857	62
35.63106796	51.5		
34.39000961	52		
16.95906433	50.5		
35.32388664	52.8		
33.86637459	55		
35.14376997	52.5		
34.05483405	53		
36.55555556	53.5		
36.25	56		
30.38516405	54		
31.04956268	62		
40.93959732	54		

Anexo 2

Se presenta los datos de calibración del sensor de conductividad eléctrica del suelo.

CEa. TDR	milivolts
1760	1823.1
1930	2018.4
1930	2003
1940	2005.1
1870	1861.4
2110	2038.9
2090	2016.4
2280	2273.8
2040	2076.5
2110	2052.3
2130	2084.7
2050	1997.4
2400	2376.2
2360	2352.4
2330	2148.5
2125	2176.2
2210	2132.1
2100	2129.7
2100	2090.6
2440	2420.1
2170	2175.6
2300	2299.7
2200	2176.2

2280	2239.8
2090	2084.5
2100	2129.7
2160	2172.1
2180	2173.6
2290	2239.5
2420	2426.2
2360	2352.3
2420	2419.7
2140	2135.6
2140	2139.9
2100	2090.6
2190	2219.8
2250	2248.8
2090	2072.1
2050	2048.5
2080	2062.7
2090	2127.8
1990	1996.3
2040	2052.6
1990	2067.4
1940	1962.1
2090	2054.6
1970	1962.4
2010	2062.6
1640	1631.8
2130	2120.6

Anexo 3. Se presentan los datos de calibración de los sensores de temperatura tomados cada 20 minutos en la estación meteorológica de la UACH.

Datos de calibración del sensor de temperatura.

T calculada	T medida		
18.25	19.87	19.69	19.94
18.25	19.87	19.69	19.93
18.5	19.87	19.69	19.94
18.62	19.87	19.69	19.94
18.75	19.87	19.75	19.92
19.33	19.87	19.75	19.9
19.39	19.87	19.75	19.89
19.49	19.88	19.75	19.88
19.51	19.88	19.75	19.88
19.5	19.88	19.75	19.87
19.56	19.88	19.75	19.87
19.62	19.88	19.81	19.87
19.62	19.88	19.81	19.87
19.62	19.88	19.83	19.87
19.65	19.9		

Anexo 4. Se muestran los datos obtenidos en campo y los obtenidos en laboratorio igual los errores los percentiles de normalidad de la humedad.

Resultados obtenidos de la humedad del suelo por el método gravimétrico y el equipo construido.

Fecha	Números de sitios	Humedad del Suelo (%) Gravimetría	Humedad (%) Equipo construido	Residuos Gravimetría y equipo	Residuos ordenados	p	Z
25-11-2015	1	49.2109039	50	-0.78909613	-2.64797508	0.017	-2.12
25-11-2015	2	50.8223684	51.5	-0.67763158	-2.23693694	0.05	-1.645
25-11-2015	3	51.953125	52	-0.046875	-1.93678887	0.083	-1.385
25-11-2015	4	51.061008	51	0.06100796	-1.7012987	0.117	-1.19
25-11-2015	5	48.9028213	49	-0.09717868	-1.24851013	0.15	-1.036
25-11-2015	6	47.9315264	48	-0.06847361	-1.17604618	0.183	-0.904
25-11-2015	7	47.3520249	50	-2.64797508	-0.78909613	0.217	-0.782
25-11-2015	8	54.4895449	55	-0.5104551	-0.73864783	0.25	-0.674
25-11-2015	9	52.8037383	52	0.80373832	-0.67763158	0.283	-0.574
25-11-2015	10	51.027027	51.5	-0.47297297	-0.6442953	0.317	-0.476
25-11-2015	11	51.2613522	52	-0.73864783	-0.5104551	0.35	-0.385
25-11-2015	12	50.5174036	50.5	0.01740357	-0.47297297	0.383	-0.271
25-11-2015	13	50.5630631	52.8	-2.23693694	-0.32297064	0.417	-0.209
25-11-2015	14	55.3593947	55	0.3593947	-0.30935252	0.45	-0.125
25-11-2015	15	51.2514899	52.5	-1.24851013	-0.29064039	0.483	-0.0425
25-11-2015	16	52.7960526	53	-0.20394737	-0.28571429	0.517	0.0425
25-11-2015	17	53.625	53.5	0.125	-0.25291181	0.55	0.125
25-11-2015	18	55.7142857	56	-0.28571429	-0.20394737	0.583	0.209
25-11-2015	19	53.3557047	54	-0.6442953	-0.15384615	0.617	0.271
25-11-2015	20	61.6906475	62	-0.30935252	-0.09717868	0.65	0.385
25-11-2015	21	53.8461538	54	-0.15384615	-0.06847361	0.683	0.476
25-11-2015	22	57.0951586	57	0.0951586	-0.046875	0.717	0.574
25-11-2015	23	51.2987013	53	-1.7012987	0.01740357	0.75	0.674
25-11-2015	24	53.8239538	55	-1.17604618	0.06100796	0.783	0.782
25-11-2015	25	51.7470882	52	-0.25291181	0.0951586	0.817	0.904
25-11-2015	26	57.9617834	56	1.96178344	0.125	0.85	1.036
25-11-2015	27	52.6770294	53	-0.32297064	0.3593947	0.883	1.19
25-11-2015	28	52.7093596	53	-0.29064039	0.3943662	0.917	1.385
25-11-2015	29	50.0632111	52	-1.93678887	0.80373832	0.95	1.645
25-11-2015	30	62.3943662	62	0.3943662	1.96178344	0.983	2.12
Media		52.8435096	52.2766667		0.433		
Varianza					0.8208		
Desv.esta					0.906		

Anexo 5. SE presenta el análisis de residuos, en donde se muestra los valores de la conductividad eléctrica medida en campo con ambos equipos, TDR 300 y el equipo construido, así como los residuales ordenados de menor a mayor y los percentiles de la distribución normal.

Datos de la conductividad eléctrica del suelo obtenidos en campo, con los residuos y los porcentuales de distribución normal.

Fecha	# de datos	CE. TDR	CE.Equipo	Residuos	R. ordenados	P	Z
25/11/2015	1	1760	1823.1	-63.1	-65.1	0.011	-2.29
25/11/2015	2	1940	2005.1	-65.1	-63.1	0.034	-1.82
25/11/2015	3	1870	1861.4	8.6	-52.6	0.058	-1.57
25/11/2015	4	2280	2273.8	6.2	-51.2	0.081	-1.49
25/11/2015	5	2040	2076.5	-36.5	-37.8	0.104	-1.25
25/11/2015	6	2110	2052.3	57.7	-36.5	0.127	-1.14
25/11/2015	7	2130	2084.7	45.3	-29.8	0.151	-1.03
25/11/2015	8	2050	1997.4	52.6	-29.7	0.174	-0.937
25/11/2015	9	2400	2376.2	23.8	-29.7	0.197	-0.852
25/11/2015	10	2360	2352.4	7.6	-22.1	0.22	-0.77
25/11/2015	11	2125	2176.2	-51.2	-12.6	0.244	-0.758
25/11/2015	12	2100	2129.7	-29.7	-12.1	0.267	-0.621
25/11/2015	13	2100	2090.6	9.4	-6.3	0.290	-0.553
25/11/2015	14	2440	2420.1	19.9	-6.2	0.313	-0.486
25/11/2015	15	2170	2175.6	-5.6	-5.6	0.337	-0.419
25/11/2015	16	2300	2299.7	0.3	0.1	0.360	-0.352
25/11/2015	17	2200	2176.2	23.8	0.3	0.383	-0.322
25/11/2015	18	2280	2239.8	40.2	0.3	0.406	-0.237
25/11/2015	19	2090	2084.5	5.5	1.2	0.430	-0.175
25/11/2015	20	2100	2129.7	-29.7	1.5	0.453	-0.118
25/11/2015	21	2160	2172.1	-12.1	4.4	0.476	-0.06
25/11/2015	22	2180	2173.6	6.4	5.5	0.5	0.0
25/11/2015	23	2290	2239.5	50.5	6.2	0.523	0.06
25/11/2015	24	2420	2426.2	-6.2	6.4	0.546	0.118
25/11/2015	25	2360	2352.3	7.7	7.6	0.569	0.174
25/11/2015	26	2420	2419.7	0.3	7.6	0.593	0.236
25/11/2015	27	2140	2135.6	4.4	7.7	0.616	0.321
25/11/2015	28	2140	2139.9	0.1	8.2	0.639	0.352
25/11/2015	29	2100	2090.6	9.4	8.6	0.662	0.418

25/11/2015	30	2190	2219.8	-29.8	9.4	0.686	0.485
25/11/2015	31	2250	2248.8	1.2	9.4	0.709	0.552
25/11/2015	32	2090	2072.1	17.9	9.4	0.732	0.621
25/11/2015	33	2050	2048.5	1.5	17.3	0.755	0.757
25/11/2015	34	2080	2062.7	17.3	17.9	0.779	0.77
25/11/2015	35	2090	2127.8	-37.8	19.9	0.802	0.852
25/11/2015	36	1990	1996.3	-6.3	23.8	0.825	0.936
25/11/2015	37	2040	2052.6	-12.6	23.8	0.848	1.03
25/11/2015	38	1940	1962.1	-22.1	35.4	0.872	1.13
25/11/2015	39	2090	2054.6	35.4	40.2	0.895	1.24
25/11/2015	40	1970	1962.4	7.6	45.3	0.918	1.48
25/11/2015	41	2010	2062.6	-52.6	50.5	0.941	1.56
25/11/2015	42	1640	1631.8	8.2	52.6	0.965	1.81
25/11/2015	43	2130	2120.6	9.4	57.7	0.988	2.28
Media		2130.58	2130.17		0.4139		
		Desvi.					
		estan			29.417		
		Varianza			5.42		

Anexo 6. Datos de la temperatura del suelo en grados Celsius tomadas en el campo experimental, para determinar la humedad y conductividad eléctrica del suelo.

No.	Temperatura Promedio		
1	Tp=20.58	25	Tp=23.48
2	Tp=20.58	26	Tp=23.58
3	Tp=21.20	27	Tp=23.27
4	Tp=21.20	28	Tp=23.45
5	Tp=21.33	29	Tp=23.64
6	Tp=21.45	30	Tp=23.70
7	Tp=21.58	31	Tp=23.95
8	Tp=21.58	32	Tp=24.14
9	Tp=21.59	33	Tp=24.27
10	Tp=21.83	34	Tp=24.29
11	Tp=21.95	35	Tp=24.35
12	Tp=21.83	36	Tp=24.47
13	Tp=22.08	37	Tp=24.58
14	Tp=22.14	38	Tp=24.77
15	Tp=22.20	39	Tp=25.08
16	Tp=22.64	40	Tp=25.64
17	Tp=22.48	41	Tp=25.83
18	Tp=22.52	42	Tp=26.08
19	Tp=22.58	43	Tp=26.52
20	Tp=22.70	44	Tp=26.58
21	Tp=22.89	45	Tp=26.70
22	Tp=22.39	46	Tp=27.52
23	Tp=23.27	47	Tp=27.58
24	Tp=23.45	48	Tp=27.60
		49	Tp=27.65
		50	Tp=27.70
		Promedio	23.68

Anexo 7 programa con la cual fue programado el equipo construido para determinar la conductividad eléctrica del suelo.

```
#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

#include <Wire.h> //cargamos la librería Wire

OneWire oneWire(8); // se asigna el pin de
entrada de datos de los sensores a conectar.

DallasTemperature sensores(&oneWire); //
se instancia la libreria de DallasTemperature,

#include "RTCLib.h" // Incluye la librería
RTCLib

RTC_DS1307 RTC; // Crea el objeto RTC

#include <SPI.h>

#include <SD.h>

#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); //para
arduino Mega

#include <math.h><br>

File dataFile;

File resist;

int led = 13;

Declaracion de variables

float H1;

float H2;

float Ha;

float Hb;

float Hp;

int Hp1;

float Ra;

float Ce;

float T1;

float T2;

float Tp;

float Tc=18;

float X=0.02; // micro simens/cm

char Grados = 'TEMPERATURA';

int shiftIn(int dataPin, int
clockPin, int numBits)
{
    int ret = 0;

    int i;

    for (i=0; i<numBits; ++i)
    {
        digitalWrite(clockPin, HIGH);

        delay(10); // I don't know
why I need this, but without it I don't get my 8
lsb of temp

        // ret = ret*2 +
digitalRead(dataPin);

        digitalWrite(clockPin, LOW);

    }

    return(ret);

}

void sendCommandSHT(int
command, int dataPin, int clockPin)
{
    int ack;

    pinMode(dataPin, OUTPUT);

    pinMode(clockPin, OUTPUT);

    digitalWrite(dataPin, HIGH); //
protocolo para la transmision

    digitalWrite(clockPin, HIGH);
```

```

        digitalWrite(dataPin, LOW);
        digitalWrite(clockPin, LOW);
        digitalWrite(clockPin, HIGH);
        digitalWrite(dataPin, HIGH);
        digitalWrite(clockPin, LOW);

        // The command (3 msb are
address and must be 000, and last 5 bits are
command)
        shiftOut(dataPin, clockPin,
MSBFIRST, command);

        // Verify we get the coorect ack
        digitalWrite(clockPin, HIGH);
        pinMode(dataPin, INPUT);
        ack= digitalRead(dataPin);
        if (ack != LOW)
            Serial.println("Ack Error 0");
        digitalWrite(clockPin, LOW);
        ack= digitalRead(dataPin);
        if (ack != HIGH)
            Serial.println("Ack Error 1");
    }

    void waitForResultSHT(int
dataPin)
    {
        int i;
        int ack;
        pinMode(dataPin, INPUT);
        for(i= 0; i < 100; ++i)
        {
            delay(10);
            ack= digitalRead(dataPin);
            if (ack == LOW)
                break;
        }
        if (ack == HIGH)
            Serial.println("Ack Error 2");
    }

    int getData16SHT(int dataPin, int
clockPin)
    {
        // Get the most significant bits
        pinMode(dataPin, INPUT);
        pinMode(clockPin, OUTPUT);
        // Send the required ack
        pinMode(dataPin, OUTPUT);
        digitalWrite(dataPin, HIGH);
        digitalWrite(dataPin, LOW);
        digitalWrite(clockPin, HIGH);
        digitalWrite(clockPin, LOW);
        // Get the lest significant bits
        pinMode(dataPin, INPUT);
    }

    void skipCrcSHT(int dataPin, int
clockPin)
    {
        // Skip acknowledge to end
trans (no CRC)
        pinMode(dataPin, OUTPUT);
        pinMode(clockPin, OUTPUT);

        digitalWrite(dataPin, HIGH);
        digitalWrite(clockPin, HIGH);
        digitalWrite(clockPin, LOW);

```

```

    }
    #####

    void setup() {

        Serial.begin(9600);

        DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la
        fecha y hora del RTC

        Wire.begin(); // Establece la velocidad
        de datos del bus I2C

        RTC.begin(); // Establece la velocidad
        de datos del RTC

        sensores.begin();

        pinMode(led, OUTPUT);

        lcd.begin(16, 2);

        // Print a message to the LCD.

        Serial.print("Initializing SD card...");

        lcd.setCursor(0, 0);

        pinMode(53, OUTPUT);

        if (!SD.begin(53)) {

            Serial.println("SCAR fallida o no
            presenta!");

            lcd.print("Fallo en SD");

            return;

        }

        Serial.println("initialization hecha.");

        Serial.println("Hecha!");

        lcd.print("SD CARD OK");

        lcd.setCursor(0,1);

        lcd.print(now.year(), DEC);

        lcd.setCursor(4,1);

        lcd.print('/');

        lcd.setCursor(5,1);

        lcd.print(now.month(), DEC);

```

```

        lcd.setCursor(7,1);

        lcd.print('/');

        lcd.setCursor(8,1);

        lcd.print(now.day(), DEC);

        lcd.setCursor(10,1);

        lcd.print(' ');

        lcd.setCursor(11,1);

        lcd.print(now.hour(), DEC);

        lcd.setCursor(13,1);

        lcd.print(':');

        lcd.setCursor(14,1);

        lcd.print(now.minute(), DEC);

        delay(1000);

        dataFile=SD.open("resist.txt",
        FILE_WRITE);

        dataFile.print("Hecha");

        dataFile.close();

        lcd.clear();

    }

    #####

    void loop() {

        dataFile=SD.open("resist.txt",
        FILE_WRITE);

        // se inicia las lecturas de los sensores

        sensores.requestTemperatures(); //se
        prepara los sensores para la lectura de la
        temperatura

        T1=sensores.getTempCByIndex(0)+2.0779;

        //
        T1=(.0404*(sensores.getTempCByIndex(0))+
        19.865;

        T2=sensores.getTempCByIndex(1)+2.0779;

```

```
//T2=(0.0404*(sensores.getTempCByIndex(1)
)+19.865);
```

```
H1=0.512*(analogRead(A4)/-10+102) +
36.63; //modelo de la humedad y =0.512x +
36.63
```

```
H2=0.512*(analogRead(A4)/-10+102) +
36.63;
```

```
Ha= analogRead(A4);
```

```
Hb= analogRead(A5);
```

```
// IMPRIME LOSVALORES DE LOS
SENSORES.
```

```
float Tp=(T1+T2)/2;
```

```
float Hp=(H1+H2)/2;
```

```
int Hp1=(Ha+Hb)/2;
```

```
//aplicando la fórmula de resistividad
para cuatro electrodos Weaner
p=(4*pi*A*R)/(1+(2*A/raiz(A2+4B2))-
(2*A/raiz(4A2+4B2)))
```

```
float Ra=((4*3.1416*0.035*Hp1)/1.002);//
Ohms/m; distancia entre electrodos de 3.5
cm y 20 cm de profundidad
```

```
float
CE=(1.0078)*(((1/Ra)*(1000000)+(Tp-
Tc)*(X)))-2243.962; // 1 mIS/cm=1000uS/cm;
modelo y = 0.8877x + 234.97
```

```
//imprime los valores de los sensores y
hora en el serial de la computadora.
```

```
DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la
fecha y hora del RTC
```

```
Serial.print(now.year(), DEC);
```

```
Serial.print('/');
```

```
Serial.print(now.month(), DEC);
```

```
Serial.print('/');
```

```
Serial.print(now.day(), DEC);
```

```
Serial.print(' ');
```

```
Serial.print(now.hour(), DEC);
```

```
Serial.print(':');
```

```
Serial.print(now.minute(), DEC);
```

```
Serial.print(':');
```

```
Serial.print(now.second(), DEC);
```

```
Serial.println();
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(" T1=");
```

```
Serial.print(T1);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("T2=");
```

```
Serial.print(T2);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(" Tp="); //mostrar la
temperatura en el serial
```

```
Serial.print(Tp);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("H1=");
```

```
Serial.print(H1, DEC);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("H2=");
```

```
Serial.print(H2, DEC);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(" Hp= "); //mostrar la
humedad uno en el serial del programa
```

```
Serial.print(Hp, DEC);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(" Hp1= "); //muestra la
resistividad
```

```
Serial.print(Hp1, DEC);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(" Ra= ");//mostrar la CEa
promedio en el serial del programa,
```

```
Serial.print(Ra, DEC);
```

```

Serial.print(" ");
Serial.print(" CE= ");
Serial.print(CE, DEC);
Serial.print(" uS ");
Serial.println( );
//mostrar en la pantalla LCD los datos
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Hp=");
lcd.setCursor(3,0);
lcd.print(Hp);
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print("Tp=");
lcd.setCursor(11,0);
lcd.print(Tp);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("CE=");
lcd.setCursor(3,1);
lcd.print(CE);
lcd.setCursor(8,1);
lcd.print("uS");
lcd.setCursor(11,1);
lcd.print(now.hour(), DEC);
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print(':');
lcd.setCursor(14,1);
lcd.print(now.minute(), DEC);
dataFile.print(now.year(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.month(), DEC);
dataFile.print('/');

dataFile.print(now.day(), DEC);
dataFile.print(' ');
dataFile.print(now.hour(), DEC);
dataFile.print(':');
dataFile.print(now.minute(), DEC);
dataFile.print(':');
dataFile.print(now.second(), DEC);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(" T1=");
dataFile.print(T1);
dataFile.print(" T2=");
dataFile.print(T2);
dataFile.print(" Tp=");
dataFile.print(Tp);
dataFile.print(" Hp=");
dataFile.print(Hp);
dataFile.print(" Ra=");
dataFile.print(Ra);
dataFile.print(" CEc=");
dataFile.print(CE);
dataFile.println(" uS");
dataFile.close();

digitalWrite(led, HIGH);
delay(180000);
digitalWrite(led, LOW);
}

```