



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



***Evaluación de un sensor de permisividad eléctrica  
para agricultura de precisión***

**POR:**

**Juan Antonio López López**

**TESIS**

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

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Mayo del 2012**

---

---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

*Evaluación de un sensor de permisividad eléctrica para agricultura de precisión*

POR:

Juan Antonio López López

TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobado por el comité de tesis

Asesor Principal

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal

Dr. Martin Cadena Zapata

Sinodal

Dr. Jesús R. Valenzuela García  
“ANTONIO NARRO”

Coordinador de la división de ingeniería

M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Coordinación de  
Ingeniería



## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS PADRE**

*Por darme la oportunidad de estar en esta vida y tener el deseo de superarme, porque a pesar de todos los obstáculos estoy concluyendo esta etapa de mi vida. Y más aún por la hermosa familia que me has dado.*

### **A MI ALMA TERRA MATER Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”**

*Por brindarme la oportunidad de formar parte de esta honorable institución, lo cual considero un privilegio y me siento orgulloso.*

### **A MI ASESOR Dr. Santos Gabriel Campos Magaña**

*Por brindarme su confianza y su apoyo, gracias a su experiencia y conocimientos compartidos, he aprendido a manejar nuevas herramientas que han sido parte fundamental y me seguirán siendo útiles en el proceso de mi vida laboral.*

### **A MIS MAESTROS**

|   |   |
|---|---|
| <b>M.C. Juan Antonio Guerrero Hdez.</b> | <b>DR. Martín Cadena Zapata</b>         |
| <b>M.C. Héctor Uriel Serna Fdez.</b>    | <b>DR. Jesús R. Valenzuela</b>          |
| <b>M.C. Juan Arredondo Valdez</b>       | <b>M.C. Tomas Gaytan Muñiz</b>          |
| <b>M.C. Mario Alberto Méndez</b>        | <b>M.C. Blanca Elizabeth de la Peña</b> |
| <b>Ing. Rosendo González Garza</b>      |   |

*Por ser excelentes maestros, buenos amigos y brindarme su amistad, sus conocimientos y su confianza, ya que gracias a sus consejos he tomado decisiones correctas en el transcurso de mi formación académica y de mi vida.*

### **A MIS AMIGOS**

|                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Joel Avidam Hernández Pérez</b> | <b>Lucio Gonzalo Calvo Aguilar</b> |
| <b>Obed Isai Hernández Pérez</b>   | <b>Víctor Hugo Avendaño abarca</b> |
| <b>Jesús Gutiérrez Mariscal</b>    | <b>Juan Carlos Rodríguez Núñez</b> |
| <b>Luis Santiago Hernández</b>     |                                    |

*Que me han sabido comprender a pesar de todo y me han acompañado en mi formación, sin ellos esta etapa de mi vida no hubiera sido la misma, gracias por la gran amistad que me brindaron y por los momentos que compartimos juntos, nunca los olvidare.*

### **A**

*Toda la familia “LOPEZ” que siempre fue la fuente de inspiración para superarme día a día.*

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES**

**René López C.**                      **Águeda E. López López**

*Gracias **mamita** primero que nada por darme la vida, por apoyarme en lo que he decidido emprender, por tus consejos que me ha servido muchísimo para enfrentar todos los obstáculos, por aquellas palabras de ánimo, muchas gracias recuerda que te quiero muchísimo.*

*Gracias **papito**, por la decisión de que un día yo naciera. Por creer en mí, por tu apoyo incondicional, por la confianza; quiero decirte que te admiro y te quiero mucho porque has trabajado muchísimo para sacarnos adelante, eres un gran ejemplo de superación.*

### **A MIS HERMANITAS**

**Sandra Araceli López López**                      **Jovana del Carmen López López**  
**Reyna Fabiola López López**

***Jovanita** gracias por demostrarme tu apoyo de manera incondicional en todos los aspectos, **Sandi eres** una gran mama te deseo lo mejor y gracias por tus palabras y mi **reinita** tienes todo mi apoyo en lo que decidas emprender hermanita. Mis mejores deseos a ustedes.*

### **A MI NOVIA**

**Yesenia Elizabeth López Rodríguez.**

*Gracias amor por apoyarme en todos los momentos difíciles de mi vida, por ser la primera opinión al tomar una decisión, por ser la compañera que siempre está conmigo y por hacerme muy feliz. Te deseo lo mejor...que Dios te bendiga siempre...te amo yessi.*

### **A MIS PADRINOS**

**Joaquín López C.**                      **Ma. Irene López Cano**

*Gracias a ustedes por sus consejos. Por demostrarme que a diario se debe luchar para alcanzar lo máximo. Por estar ahí siempre a mi lado los quiero mucho. Gracias padrino Joaquín por ser parte de este logro. Me siento muy feliz de tener a unos segundos padres como ustedes. Que dios los bendiga siempre.*

## **A MIS ABUELITOS**

**Reyna Calvo Figueroa (†)**  
**Caralampio López López**

**Trinidad López Altuzar (†)**  
**Ernesto López Morales (†)**

***Abuelita Reyna** te dedico este trabajo de culminación de mis estudios se que no estás físicamente conmigo, pero sé que estás iluminándome en todo momento desde el cielo. Gracias abuelita por formar esta gran familia que me distes, te quiero mucho.....*

***Abuelito Ernesto y Trinidad** gracias a ustedes por sus consejos. Y por iluminarme siempre a seguir el camino hacia lo bueno.*

***Abuelito Caralampio** gracias por demostrarme que a diario se debe luchar para alcanzar nuestros sueños, por ser un gran ejemplo a seguir, Por estar ahí siempre a mi lado te quiero mucho. Que Dios te bendiga abuelito.*

## INDICE DE CONTENIDO

|   |            |
|---|------------|
| <b>INDICE DE FIGURAS .....</b>  | <b>I</b>   |
| <b>INDICE DE CUADROS .....</b>  | <b>III</b> |
| <b>RESUMEN .....</b>  | <b>IV</b>  |
| <br>  |            |
| <b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 <i>Objetivos específicos .....</i>  | 3          |
| 1.2 <i>Hipótesis .....</i>  | 3          |
| <br>  |            |
| <b>II. REVISION DE LITERATURA .....</b>   | <b>4</b>   |
| 2.1 <i>Agricultura de precisión.....</i>  | 4          |
| 2.2 <i>Calidad de Suelos.....</i>   | 6          |
| 2.3 <i>Conductividad Eléctrica.....</i>   | 15         |
| 2.3.1 <i>Conductividad Eléctrica de un Suelo .....</i>  | 18         |
| 2.3.2 <i>Conductividad Eléctrica a Granel del Suelo (CEG).....</i>  | 19         |
| 2.4 <i>Medida de la resistividad eléctrica del suelo .....</i>  | 24         |
| 2.5 <i>Determinación de humedad .....</i>   | 31         |
| 2.6 <i>Eficacia de un Sensor de Capacitancia para Medir Simultáneamente Salinidad y Contenido Hídrico.....</i>                  | 32         |
| 2.7 <i>PUENTE DE IMPEDANCIA DE AUTO BALANCE, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica .....</i> | 33         |
| 2.8 <i>Variabilidad en suelos .....</i>   | 37         |
| 2.8.1 <i>Medición de la Variabilidad .....</i>  | 39         |
| 2.8.2 <i>Mapa de Rendimiento.....</i>   | 41         |
| <br>  |            |
| <b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>   | <b>43</b>  |
| 3.1 <i>Determinación de la Conductividad Eléctrica -C.E y humedad del suelo.</i>  | 43         |
| 3.2 <i>Método de medición de la conductividad eléctrica. ....</i>   | 45         |
| 3.3 <i>Método de determinación de humedad.....</i>  | 45         |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 3.4        | <i>Acondicionamiento de carro porta sensores para la determinación de humedad y conductividad .....</i>                    | 46        |
| 3.5        | <i>Acondicionamiento de tractor.....</i>   | 49        |
| 3.6        | <i>Realización del mapeo.....</i>  | 50        |
| 3.7        | <i>Características del campo experimental donde se hizo la evaluación ....</i>   | 51        |
| <b>IV.</b> | <b>RESULTADOS.....</b>   | <b>52</b> |
| 4.1        | <i>Resultados de pruebas realizadas en el campo para humedad del suelo. ....</i>   | 53        |
| 4.2        | <i>Resultado de pruebas realizadas en el campo para conductividad eléctrica.....</i>                                       | 64        |
| <b>V.</b>  | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>69</b> |
| 5.1        | <i>Conclusiones.....</i>   | 69        |
| 5.2        | <i>Recomendaciones.....</i>  | 70        |
| <b>VI.</b> | <b>LITERATURA CITADA.....</b>  | <b>72</b> |
| <b>VII</b> | <b>ANEXOS.....</b>   | <b>77</b> |
| 7.1        | <i>Dibujos en PRO-ENGINEER de los elementos del carro-portasensores.....</i>   | 78        |
| 7.2        | <i>Hojas de datos del CIRCUITO INTEGRADO XR-2206.....</i>  | 80        |
| 7.3        | <i>Hojas de datos del CIRCUITO INTEGRADO LM2907 .....</i>  | 83        |
| 7.4        | <i>Secuencia para realización del mapeo en el programa Gs+ Versión 9 para % de Humedad y conductividad eléctrica. ....</i> | 86        |

## INDICE DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2.1 Principales componentes de la calidad de suelo.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2.2 Triángulo Moebius para las tres dimensiones implícitas en el Concepto sostenibilidad.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2.3 Enfoque para la definición de indicadores de calidad de suelo.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>2.4 Principio físico de la conductividad eléctrica.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2.5 Resistividad y conductividad granel –ceg- del suelo Vs humedad.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>2.6 Conductividad granel-ceg- y resistividad de un suelo Vs. % de sales en la solución del mismo. Para una humedad constante del 15%.....</b>      | <b>20</b> |
| <b>2.7 Relación entre resistividad, conductividad y temperatura de un suelo con una humedad del 15.2%.....</b>  | <b>20</b> |
| <b>2.8 Activímetro de HANNA Instruments (HI993310): para medir la conductividad eléctrica de una disolución (W) ó la actividad del suelo (S).....</b> | <b>23</b> |
| <b>2.9 Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo.....</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.10 Método Schlumberger para medir la conductividad eléctrica del suelo.....</b>  | <b>25</b> |
| <b>2.11 Primera prueba del desarrollo del circuito de un Conductímetro.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.12 Comprobación de electrodos.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.13 Frecuencia de Conductímetro Beckman Solubridge.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>2.14 El Conductímetro Beckman Solubridge utiliza onda cuadrada completamente simétrica.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>2.15 Diagrama de bloques de cómo puede quedar conformado un Conductímetro.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>2.16 Diagrama Electrónico de Conductímetro Propuesto por Calderón F.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>2.17 Comportamiento eléctrico de electrodos inmersos en un material.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>2.18 Circuitos de Impedancias.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>2.19 Mapa de reproducción.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>2.20 Mapas de rendimientos de diferentes años.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>2.21 Variabilidad de la estimación del rendimiento.....</b>  | <b>40</b> |
| <b>2.22 A la izquierda, representación de los datos de posición y rendimiento.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>2.23 Sistema de adquisición de datos para obtención de mapas de rendimiento.....</b>   | <b>42</b> |



|             |  |    |
|-------------|--|----|
| <b>3.1</b>  | <i>Circuito para medir conductividad eléctrica</i>   | 43 |
| <b>3.2</b>  | <i>Circuito para determinar capacitancia</i>   | 44 |
| <b>3.3</b>  | <i>Diseño en Pro E de barra porta electrodos para pruebas en laboratorio</i>   | 45 |
| <b>3.4</b>  | <i>Diseño en Pro E de la barra porta electrodos para prueba de humedad</i>   | 46 |
| <b>3.5</b>  | <i>Bastidor MCC 3/5/7</i>  | 47 |
| <b>3.6</b>  | <i>Diseño en Pro-E del carroportasensores</i>  | 47 |
| <b>3.7</b>  | <i>Diseño en Pro-E del mecanismo de control de profundidad del carroportasensores</i>  | 48 |
| <b>3.8</b>  | <i>Discos cortadores de residuos</i>   | 49 |
| <b>3.9</b>  | <i>Tractor acondicionado</i>   | 49 |
| <b>3.10</b> | <i>Cuadrícula del terreno de evaluación</i>  | 50 |
| <b>3.11</b> | <i>Imagen satelital del campo experimental "NAVIDAD"</i>   | 51 |
| <b>4.1</b>  | <i>Diagramas eléctricos</i>  | 52 |
| <b>4.2</b>  | <i>Equipo utilizado para la determinación de la humedad</i>  | 53 |
| <b>4.3</b>  | <i>Aplicación de voltaje para determinar la humedad en campo</i>   | 54 |
| <b>4.4</b>  | <i>Curva de respuesta de húmeda en (mV) del capacitor 151</i>  | 55 |
| <b>4.5</b>  | <i>Mapa de % de humedad para el capacitor 151</i>  | 56 |
| <b>4.6</b>  | <i>Mapa 3D de % de humedad para el capacitor 151</i>   | 57 |
| <b>4.7</b>  | <i>Curva de respuesta de húmeda en (mV) del capacitor 102</i>  | 58 |
| <b>4.8</b>  | <i>Mapa de % de humedad para el capacitor 102</i>  | 59 |
| <b>4.9</b>  | <i>Mapa 3D de % de humedad para el capacitor 102</i>   | 60 |
| <b>4.10</b> | <i>Curva de respuesta de húmeda en (mV) del capacitor 103</i>  | 61 |
| <b>4.11</b> | <i>Mapa de % de humedad para el capacitor 103</i>  | 62 |
| <b>4.12</b> | <i>Mapa 3D de % de humedad para el capacitor 103</i>   | 63 |
| <b>4.13</b> | <i>Equipo utilizado para medir la conductividad eléctrica</i>  | 64 |
| <b>4.14</b> | <i>Curva de respuesta del comportamiento de la conductividad eléctrica</i>   | 65 |
| <b>4.15</b> | <i>Configuración de los electrodos para la determinación de la conductividad eléctrica</i>   | 66 |
| <b>4.16</b> | <i>Mapa de conductividad eléctrica</i>   | 67 |
| <b>4.17</b> | <i>Mapa 3D de conductividad eléctrica</i>  | 68 |
| <b>5.1</b>  | <i>Recomendación de la configuración de los electrodos para obtener resultados de conductividad y humedad del suelo de manera dinámica</i> | 71 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   |           |
|---|-----------|
| <i>2.1 Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo.....</i>  | <i>13</i> |
| <i>2.2 Muestra los Valores de conductividad eléctrica en Micro Siemens por centímetro (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>) de algunas muestras típicas de soluciones acuosas.....</i>   | <i>15</i> |
| <i>2.3 Parámetros para fertilizantes utilizados en fertirrigación.....</i>  | <i>23</i> |
| <i>2.4 Conductividad Eléctrica de Soluciones de KCL.....</i>  | <i>27</i> |
| <i>2.5 Frecuencias obtenidas con diferentes conductivímetros.....</i>   | <i>28</i> |
| <i>2.6 Conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita (<math>\text{mS}/\text{cm}</math> por cada <math>\text{meq}/\text{l}</math>) en disoluciones acuosas a <math>25\text{ }^\circ\text{C}</math> para los iones más usuales en agronomía.....</i> | <i>30</i> |
| <i>2.7 Diferencia de CE (<math>\text{mS}/\text{cm}</math> a <math>25^\circ\text{C}</math>) real y teórica sin considerar las fuerzas interiónicas, para cuatro aguas de riego de diferente composición.....</i>   | <i>31</i> |
| <i>2.8 Etapas de aplicación de agricultura de precisión.....</i>  | <i>38</i> |
| <i>4.1 Resultados en (<math>\text{mV}</math>) con diferentes niveles de humedad con diferentes capacitores en laboratorio.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>4.2 Análisis de varianza de humedad en (<math>\text{mV}</math>) con capacitor 151.....</i>   | <i>54</i> |
| <i>4.3 Resultados de campo en (<math>\text{mV}</math>) para el capacitor 151.....</i>   | <i>55</i> |
| <i>4.4 resultados de % de humedad para el capacitor 151.....</i>  | <i>56</i> |
| <i>4.5 Análisis de varianza de humedad en (<math>\text{mV}</math>) con capacitor 102.....</i>   | <i>57</i> |
| <i>4.6 Resultados de campo en (<math>\text{mV}</math>) para el capacitor 102.....</i>   | <i>58</i> |
| <i>4.7 resultados de % de humedad para el capacitor 102.....</i>  | <i>59</i> |
| <i>4.8 Análisis de varianza de húmeda en (<math>\text{mV}</math>) con capacitor 103.....</i>  | <i>60</i> |
| <i>4.9 Resultados de campo en (<math>\text{mV}</math>) para el capacitor 103.....</i>   | <i>58</i> |
| <i>4.10 Resultados de % de humedad para el capacitor 103.....</i>   | <i>62</i> |
| <i>4.11 Cuadro de resultados de conductividad eléctrica.....</i>  | <i>64</i> |
| <i>4.12 Análisis de varianza del comportamiento de respuesta de la prueba para conductividad eléctrica.....</i>   | <i>65</i> |
| <i>4.13 Resultados de campo en (<math>\text{mV}</math>) para conductividad eléctrica.....</i>   | <i>67</i> |
| <i>4.14 Resultados de conductividad eléctrica.....</i>  | <i>67</i> |

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en “El Departamento de Maquinaria Agrícola de la UAAAN” y forma parte del proyecto titulado: “Desarrollo de equipos, sensores e instrumentos para agricultura de precisión y labranza de conservación” que dentro de sus objetivos destaca el desarrollo de equipo para la generación de mapas de conductividad eléctrica, resistencia al corte y penetración geo-referenciados. Los objetivos que se consideraron en esta tesis, para lograr el objetivo del proyecto fueron, adecuar el tractor para la instalación del sistema de adquisición de datos, adecuar carro porta sensores para el montaje de electrodos en contacto con el suelo, para medir permisividad eléctrica, desarrollo de circuitos electrónicos para la determinación de la humedad y conductividad eléctrica (C.E.). La adecuación del tractor, John Deere 6403, se consideró que recibiera el sistema de adquisición de datos, computadoras, así como la alimentación de energía (110v) para las mismas. Se adecuó el marco del equipo MCC 3/5/7 de la empresa TECNOMECA AGRÍCOLA S.A de C.V como carro porta sensores incorporándole un sistema con gato hidráulico para controlar la profundidad de los discos cortadores de residuos de 15 a 20cm. Los Circuitos electrónicos desarrollados y evaluados fueron el LM2709, XR2206 para humedad y C.E del suelo respectivamente. En la medición de la humedad en campo obtuvimos mejor respuesta con el capacitor 102 pf el cual presenta una excelente curva de respuesta con una correlación superior del 95%. Obteniendo un mapa con un % de humedad entre 9 y 13% en el terreno de evaluación. Para el de conductividad eléctrica tenemos un análisis de comportamiento respecto a la humedad del suelo teniendo una correlación superior al 90% y representando un mapa para conductividad eléctrica del comportamiento sobre el terreno. Se requiere que los datos obtenidos durante las evaluaciones en campo sean registrados en forma dinámica a través del daqbook 200.

**Palabras claves:** conductividad eléctrica, humedad de suelo, sensores.

## I. INTRODUCCIÓN

La Agricultura de precisión o manejo de sitio específico es la utilización de herramientas que permiten la obtención y análisis de datos geo-referenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos; así como, una disminución sustantiva en la contaminación. A nivel mundial las oportunidades y riesgos actuales en la producción de alimentos está vinculada con: alta demanda mundial de alimentos (granos, carne, aceite, proteína, bioenergía); alta demanda y costo de petróleo y gas natural en todo el mundo (el gas natural es 90% del costo de la producción de amoníaco); aumento del área fertilizada en el mundo; deficiencias de nutrientes que limitan la producción de cultivos y forrajes; así como, altos índices de contaminación ambiental entre otros.

Una forma de contrarrestar estos efectos y corregir algunas de sus causas es mediante el manejo óptimo en la aplicación de insumos en la agricultura. Para la aplicación de esta tecnología se requiere de una fase de diagnóstico previo de rendimiento, combinado con muestreo de ambientes a nivel de predio para determinar los factores limitantes de la producción; así como, su localización precisa para poder de ahí realizar las prescripciones en tiempo real y sitio específico de insumos. Se requiere para lo anterior contar con sistemas que se integren entre otros por Geo posicionador Diferencial con Aplicación en la Agricultura (AgDGPS), Sensores de ambientes, sistemas de Información Geográfica (SIG), así como equipos de dosificación variables de insumos.

A nivel mundial como un indicador existen alrededor de 20 países que han incorporado estos sistemas inteligentes y automatizados en la aplicación de insumos agrícolas, entre los que destacan Estados Unidos con 30 000 unidades de producción, Argentina con 1200, Brasil con 250, Reino Unido con 400, Paraguay con 4 y México con Cero unidades. Actualmente en la “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro” no se cuenta con maquinaria ni equipos e instrumentos automatizados para docencia e investigación en mecanización para la agricultura de precisión. Por tal motivo durante la convocatoria interna 2009, para proyectos de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro fue presentado y autorizado un proyecto de investigación denominado:

***“DESARROLLO DE EQUIPOS, SENSORES E INSTRUMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISION Y LABRANZA DE CONSERVACION”.***

Cuyos objetivos planteados fueron:

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

El presente trabajo de tesis se circunscribe en el objetivo número 5, con los siguientes objetivos específicos:

### **1.1 Objetivos específicos**

- A) Evaluar un sensor que permita en forma dinámica registrar la conductividad eléctrica (CE) y humedad del suelo.
  
- B) Integración de circuitos eléctricos para medir permisividad eléctrica de suelos agrícolas.
  
- C) Acoplamiento de sistema de sensores en contacto con el suelo para el registro en tiempo real.
  
- D) Evaluación de sensores bajo condiciones de campo y elaboración de mapas de prescripción.

### **1.2 Hipótesis**

Es factible desarrollar un sensor que nos permita determinar la Conductividad Eléctrica (CE) y la humedad del suelo en forma dinámica bajo condiciones de campo sin que exista una diferencia mayor del 10% con respecto a los instrumentos de laboratorio.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### **2.1 Agricultura de precisión**

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

Los datos son transmitidos por medio de señales de radio. Uno de los códigos está reservado para los militares y no puede ser captado por los receptores GPS civiles. El otro código, (de uso civil) transmite dos series de datos conocidas como ALMANAQUE y EFEMERIDES. Los datos ofrecidos por el almanaque y las efemérides informan sobre el estado operativo de funcionamiento del satélite, su situación orbital, la fecha, hora. [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_Informaci%C3%B3n\\_Geogr%C3%](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%BA)

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

En la página <http://www.soildoctor.com/Abrate.PDF> Se describe un sistema de monitoreo de la conductividad eléctrica denominado “soil doctor” que al principio fue utilizado para dirigir el manejo de nitrógeno solo en maíz elaborando los datos así obtenidos en combinación con una serie de parámetros prefijados en la

configuración introducida al sistema por el operador, según la estrategia de aplicación o siembra que decida los datos pueden ser guardados en una tarjeta y ya después pueden ser relacionados con un GPS para posteriormente mapear y así estudiar los lotes. El equipo está integrado por un sistema de Adquisición y procesamiento de datos y determinación de dosis.

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

En el Handbook of Chemistry and Physics (1992), se menciona que en general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones. Según la forma de llevarse a cabo este transporte, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos. La conductividad eléctrica (CE) de una disolución puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio.

En la página, <http://usuarios.lycos.es/zandoli/web3/Capacidad%20de%20intercambio%20cationico.html> se describe que los sitios de intercambio de cationes, son encontrados principalmente sobre la superficie de la arcilla y la Materia Orgánica (MO). El rango normal de CE en suelos debería ser desde < 3 miliequivalentes (meq)/100g, para suelos arenosos, bajos en MO, a > 25 meq/100g para suelos con alto contenido en ciertos tipos de arcilla y MO. La MO desarrollará una mayor CE en suelos con pH cercano al neutro, que en condiciones ácidas. Adiciones de un material orgánico, incrementarán ligeramente



la CE en suelo. La CE del suelo puede disminuir con el tiempo, a través de la descomposición de la MO y la acidificación.

## **2.2 Calidad de Suelos**

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos Doran y Parkin, (1994). La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo Carter *et al.*, (1997). El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo Romig *et al.*, (1995).

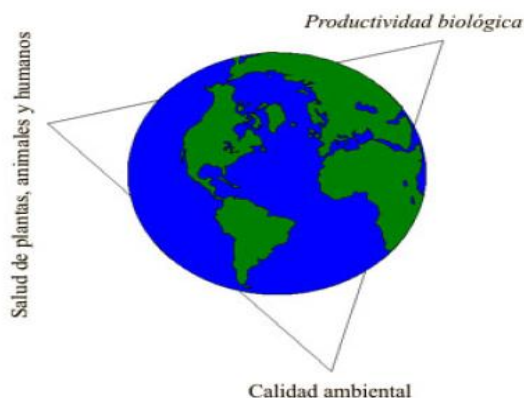
La preocupación por la calidad del suelo no es nueva Lowdermilk, 1953; Doran *et al.*, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Singer y Ewing, (2000). En el pasado, este concepto fue equiparado con el de productividad agrícola por la poca diferenciación que se hacía entre tierras y suelo. Tierras de buena calidad eran aquéllas que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión. Para clasificarlas se generaron sistemas basados en esas ideas Doran y Parkin, (1994). Ellos incluían términos como tierras agrícolas de primera calidad.

El concepto de calidad del suelo ha estado asociado con el de sostenibilidad, pero éste último tiene varias acepciones. Para Budd (1992), es el número de individuos que se pueden mantener en un área dada en cambio, para Buol (1995), el uso del suelo se debe basar en la capacidad de éste para proporcionar elementos esenciales, pues éstos son finitos y limitan, por ende, la productividad.

La calidad del suelo, ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en la década de los 80's Karlen *et al.*, (1997) y se le ha relacionado con la capacidad del suelo para funcionar, incluye atributos como

fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental. Simultáneamente, calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso. El término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo: (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenuar Contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos Doran y Parkin, (1994); Karlen *et al.*, (1997) como se muestra en la Fig. (2.1).

Al desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el substrato básico para las plantas; capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo Larson y Pierce, (1991); Buol, (1995). En consecuencia, este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa Parr *et al.*, (1992).



**Fig. 2.1 Principales componentes de la calidad de suelo Doran y Parkin, (1994).**

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

Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico, pero este concepto continúa evolucionando. Singer y Ewing, (2000). Estas definiciones fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of América Karlen *et al.*, (1997) como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

Según Sojka y Upchurch (1999), las definiciones de calidad del suelo son contextuales y subjetivas. Estos autores consideran necesaria la unificación de criterios sobre su significado, importancia y medición, como lo hacen Singer y Ewing (2000). Su principal objeción es que ninguna evaluación de la calidad edáfica considera, de manera objetiva y simultánea, los resultados potenciales, positivos o negativos, de todos los indicadores empleados en la evaluación de los elementos de la multifuncionalidad (producción, sostenibilidad y calidad ambiental, etc.).

A menudo, se reconocen sólo los resultados positivos de ciertos indicadores, tales como el contenido de materia orgánica y la cantidad de lombrices, o sólo los negativos de aspectos como la salinidad o la compactación Sojka y Upchurch, (1999). Así, la materia orgánica proporciona muchos beneficios al suelo, pero también puede tener impactos negativos ambientales y agrícolas, rara vez considerados en la evaluación de la calidad edáfica. Al incrementarse la materia orgánica se deben aumentar las dosis de aplicación de muchos pesticidas, lo que conlleva obvias repercusiones negativas económicas, ambientales y de salud. Otro ejemplo de efectos negativos, escasamente reconocidos en el contexto de la calidad edáfica, es la cantidad de lombrices.

Por una parte, estos invertebrados benefician de manera importante la producción agrícola, pero por otra, incrementan el flujo y movimiento rápido de contaminantes aplicados superficialmente hacia el subsuelo y actúan como vectores de enfermedades vegetales Sojka y Upchurch, (1999).

A pesar de la preocupación creciente acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo Arshad y Coen, (1992). Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, pues representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición Dumanski *et al.*, (1998). Según Adriaanse (1993) los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos.

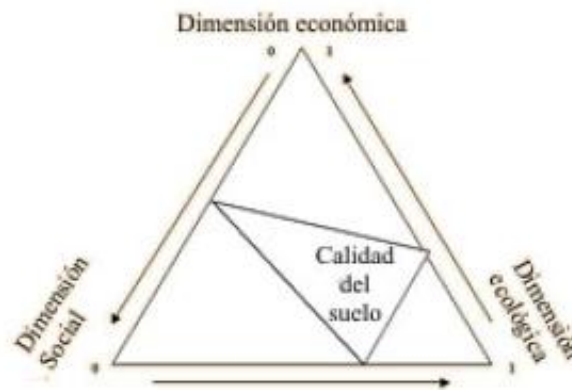
Tales indicadores se aplican en muchos campos del conocimiento (economía, salud, recursos naturales, etc.). Los indicadores de calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él SQI, (1996). Para Dumanski *et al.* (1998) dichos indicadores, no podrían ser un grupo seleccionado *ad hoc* para cada situación particular, sino que deben ser los mismos en todos los casos, con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones a nivel nacional e internacional.

Algunos autores sostienen que los indicadores que se empleen deben reflejar las principales restricciones del suelo, en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúan, como lo ha sugerido Astier *et al.* (2002). Hünne Meyer *et al.* (1997) que establecieron que los indicadores deberían permitir:

- Analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible

- Analizar los posibles impactos antes de una intervención
- Monitorear el impacto de las intervenciones entrópicas
- Ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Hay tres elementos implícitos en el concepto sostenibilidad: la dimensión económica, la social y la ecológica Goodland y Daly, 1996; Hünne Meyer *et al.*, (1997) Fig. (2.2).



**Fig. 2.2 Triángulo Moebius para las tres dimensiones implícitas en el concepto sostenibilidad. (Hünne Meyer *et al.* 1997).**

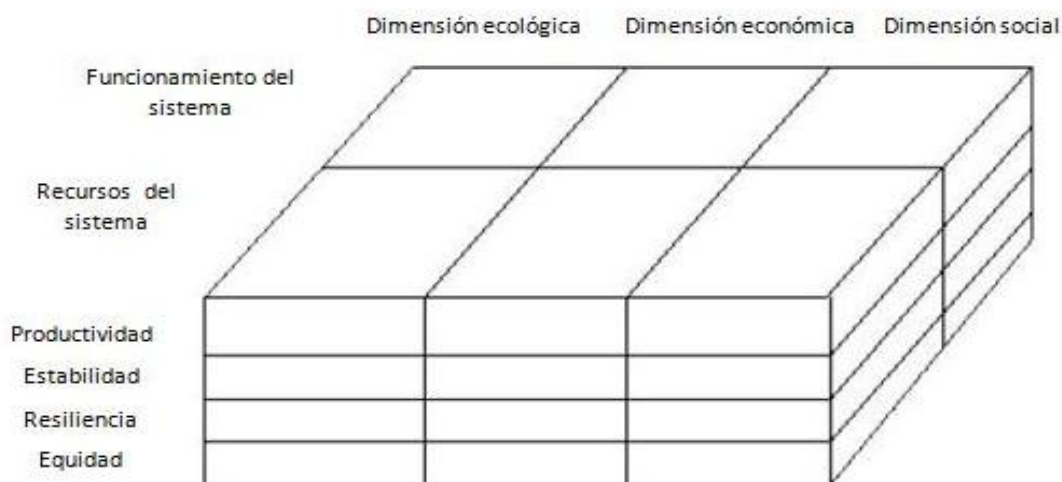
La sostenibilidad ecológica se refiere a las características fundamentales para la supervivencia que deben mantener los ecosistemas a través del tiempo en cuanto a componentes e interacciones.

La sostenibilidad económica implica la producción a una rentabilidad razonable y estable a través del tiempo, lo cual haga atractivo continuar con dicho manejo. Y, la sostenibilidad social aspira a que la forma de manejo permita a la organización social un grado aceptable de satisfacción de sus necesidades. El manejo sostenible puede, por lo tanto, significar distintas cosas según la función principal del recurso o del momento histórico en que se hace una evaluación.

El desarrollo agrícola sostenible abarca las tres vertientes. No parece posible optimizar simultáneamente cada uno de los tres componentes de la definición anterior, lo más conveniente es definir ciertos límites aceptables para cada uno de

ellos y optimizar primero uno, procurando que la intensidad de los otros dos se ubique en el límite aceptable para ese momento y condición particulares. Con el transcurso del tiempo, los tres objetivos deberían ir acercándose a los óptimos ideales para cada uno de los tres componentes.

La Fig. (2.3) muestra un enfoque para la definición de indicadores propuesto por Hünne Meyer *et al.* (1997). Este enfoque hace que los indicadores de calidad del suelo puedan considerarse dinámicos en el tiempo. Por lo que para cada momento histórico o situación particular habría que buscar un equilibrio entre los tres objetivos del desarrollo sostenible.



**Fig. 2.3 Enfoque para la definición de indicadores de calidad de suelo Hünne Meyer *et al.* (1997).**

Condiciones que deben cumplir los indicadores de calidad del suelo para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones Doran y Parkin, (1994):

- a) Describir los procesos del ecosistema
- b) Integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo
- c) Reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir
- d) Ser sensitivas a variaciones de clima y manejo
- e) Ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo
- f) Ser reproducibles
- g) Ser fáciles de entender
- h) Ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica
- i) Cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

En virtud de que existen muchas propiedades alternativas para evaluar la calidad del suelo, Larson y Pierce (1991); Doran y Parkin (1994) y Seybold *et al.* (1997) plantearon un conjunto mínimo de propiedades del suelo para ser usadas como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo (**Cuadro 2.1**).

**Cuadro 2.1** Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold et al., 1997).

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



Los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación del suelo Arshad y Coen, (1992). La identificación efectiva de indicadores apropiados para evaluar la calidad del suelo depende del objetivo, que debe considerar los múltiples componentes de la función del suelo, en particular, el productivo y el ambiental. La identificación es compleja por la multiplicidad de factores químicos, físicos y biológicos que controlan los procesos biogeoquímicos y su variación en intensidad con respecto al tiempo y espacio Doran *et al.*, (1996).

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

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

Los indicadores químicos mostrados en el **Cuadro (2.1)** se refieren a condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos SQI, (1996).

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

### 2.3 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de un medio, se define como la capacidad que tienen el medio (que por lo general contiene las sales inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad. (**Cuadro 2.2**)

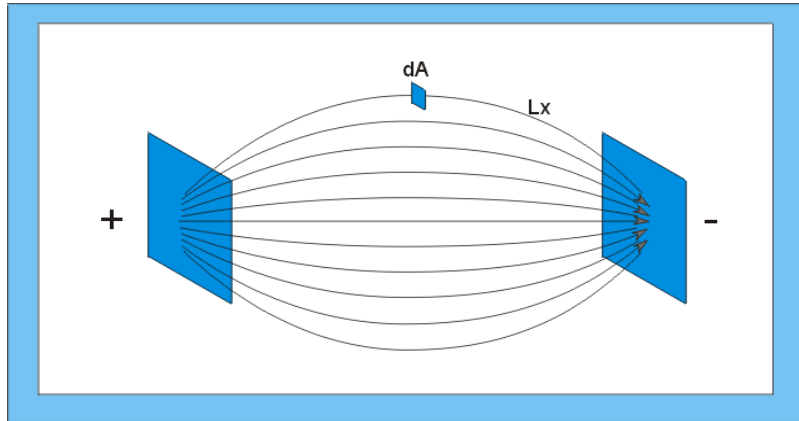
**Cuadro 2.2** Muestra los Valores de conductividad eléctrica en micro Siemens por centímetro ( $\mu\text{S/cm}$ ) de algunas muestras típicas de soluciones acuosas. Calderón Sáenz. F. 2005

|                                 | Conductividad a 25°C      |
|---------------------------------|---------------------------|
| Agua Ultra-pura                 | 0.05 $\mu\text{S/cm}$     |
| Agua de alimentación a calderas | 1 a 5 $\mu\text{S/cm}$    |
| Agua potable                    | 50 a 100 $\mu\text{S/cm}$ |
| Solución de suelo               | 0.5 -2.5 $\text{mS/cm}$   |
| Agua potable                    | 53.0 $\text{mS/cm}$       |
| 5% NaOH                         | 223.0 $\text{mS/cm}$      |

La conductividad eléctrica es el recíproco de la resistencia CA en ohms, medida entre las caras opuestas de un cubo de 1.0 cm de una solución acuosa a una temperatura especificada. Esta solución se comporta como un conductor eléctrico donde se pueden aplicar las leyes físicas de la resistencia eléctrica. Las unidades de la conductividad eléctrica son el Siemens/cm (las unidades antiguas, eran los mhos/cm que son numéricamente equivalentes al S/cm).

En la práctica no se mide la conductividad entre electrodos de 1  $\text{cm}^3$  sino con electrodos de diferente tamaño, rectangulares, cilíndricos o de diversa forma, por lo cual, al hacer la medición, en lugar de la conductividad, se mide la

conductancia, ( $I_t/V_t$ ), la cual al ser multiplicada por una constante ( $k$ ) de cada celda en particular, se transforma en la conductividad en S/cm. En la Fig. (2.4), se muestra el principio físico de la conductividad eléctrica.



**Fig. 2.4 Principio físico de la conductividad eléctrica. Calderón Sáenz. F. 2005.**

Donde:

$dA$  = Diferencial de Área.

$L_x$  = Camino o ruta de cada filamento de Corriente Eléctrica.

$R_x$  = Resistencia Eléctrica de cada ruta.

$R_t$  = Resistencia global de todas las rutas.

$r$  = Resistividad del Material

**C.E.** = Conductividad del material

$I_t$  = Conducción; Intensidad total de corriente que pasa de una placa a la otra.

$V_t$  = Diferencia de Potencial entre las placas.

$I_t/V_t$  = Conductancia, la cual es el inverso de la Resistencia o sea  $1/R_t$

**Ecuación 2.1**      
$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} + \frac{1}{R_{x_3}} \dots + \frac{1}{R_{x_n}}$$

**Ecuación 2.2**      
$$R_x = \frac{r l x}{dA}$$

De donde:

$$\text{Ecuación 2.3} \quad \frac{1}{Rt} = \frac{dA}{r} \left( \frac{1}{lx_1} + \frac{1}{lx_2} + \frac{1}{lx_3} \dots + \frac{1}{lx_n} \right)$$

$$\text{Ecuación 2.4} \quad \frac{It}{Vt} = \frac{1}{Rt} = \frac{1}{r} \int \left( \frac{dA}{Lx} \right)$$

Por definición

$$\text{Ecuación 2.5} \quad C.E. = \frac{1}{r}$$

Donde:

$$\text{Ecuación 2.6} \quad C.E. = \frac{1}{Rt_x} \left( \int \left\{ \frac{dA}{Lx} \right\} \right)^{-1} = \frac{It}{Vt_x} \left( \int \left\{ \frac{dA}{Lx} \right\} \right)^{-1}$$

En esta última ecuación,  $I_t$  es la Conductancia eléctrica,  $I_t / V_t$  es la Conductancia y la ecuación completa es la Conductividad. El último término de la ecuación se denomina Constante de Celda y depende únicamente de la geometría de la celda y del espacio circundante. Cuando hay alguna pared o barrera que interrumpa el paso de la corriente por el espacio circundante, esta afectará también la Constante de Celda. Las unidades de la Constante de Celda son usualmente  $\text{cm}^{-1}$ . En general, mientras más separados se encuentren los electrodos, menor será el guarismo de la constante de celda.

En la práctica, la conductividad eléctrica de una solución se mide mediante el uso de una corriente alterna (CA) con el fin de evitar los efectos de la polarización. Cuando se usa una corriente continua (CD) los iones vecinos al electrodo emigran hacia este, produciendo un empobrecimiento de electrolitos en el medio. Esto hace que la conductividad se altere como consecuencia de la variación en la concentración. Este fenómeno se llama polarización de los electrodos y hace imposible medir la conductividad por medio de corriente CD. Por tal motivo los Conductímetro utilizan una corriente CA, cuya frecuencia varía desde 60 Hz

hasta 3000 Hz. En la práctica se recomienda utilizar una corriente alterna con una frecuencia alrededor de 1000 Hz. La forma de señal más utilizada es la onda cuadrada aunque la eficiencia de esta es más baja que la onda sinusoidal y más susceptible a interferencias y/o ruido.

### **2.3.1 Conductividad Eléctrica de un Suelo**

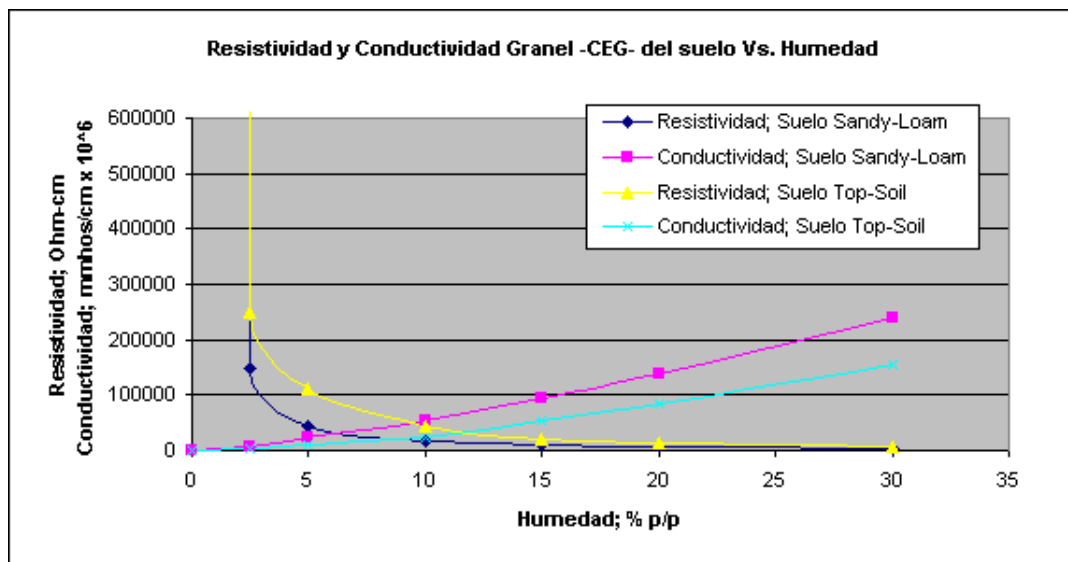
Cuando se habla de Conductividad Eléctrica de un suelo, usualmente se hace referencia a la Conductividad Eléctrica de su extracto de saturación. Y la Conductividad Eléctrica, como tal, es determinada en un medio líquido. Se supone, aunque esto aun no ha sido demostrado, que dicha conductividad corresponde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

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

### 2.3.2 Conductividad Eléctrica a Granel del Suelo (CEG)

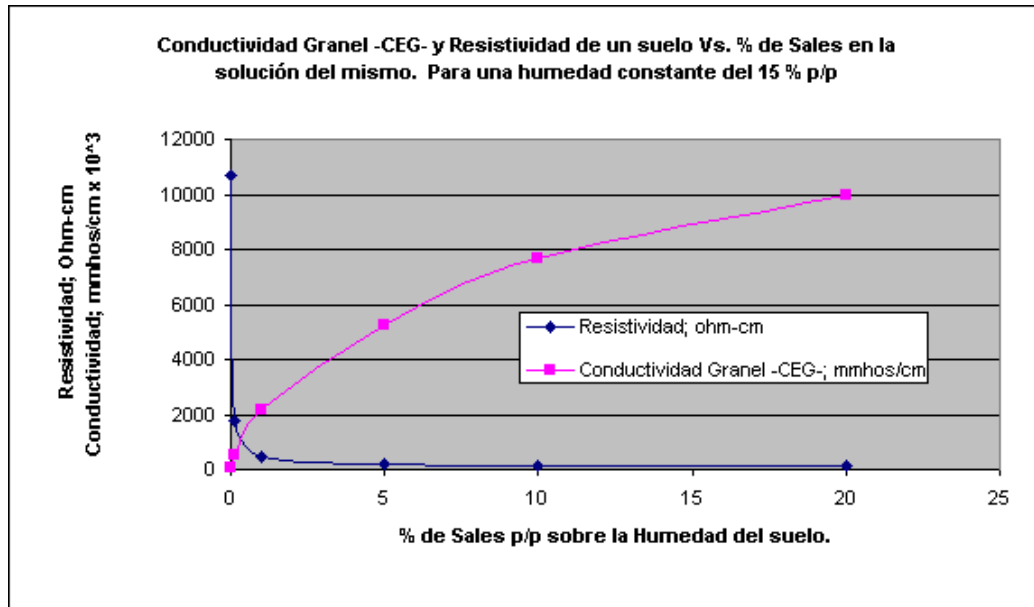
Hasta aquí hemos hablado de la Conductividad Eléctrica del suelo medida en algún tipo de extracto líquido. Ahora vamos a hablar de la Conductividad Eléctrica medida directamente en el suelo, considerado este, como un medio poroso parcialmente saturado con agua y con algún contenido de sales disueltas. Esta es la Conductividad que se denomina Conductividad Eléctrica a Granel (Bulk Conductivity), en lo sucesivo C.E.G.

La ecuación que define la CEG, es exactamente la misma que define la CE general de cualquier medio. En este caso el medio es directamente el suelo. Como la conducción eléctrica de un suelo se realiza a través de la fase líquida ya que los poros llenos de aire no conducen la corriente eléctrica, entonces la conducción dependerá del volumen de los poros llenos de fase líquida. A medida que se agota la fase líquida se hacen menores los caminos por donde puede ser conducida la corriente eléctrica, entonces la conducción dependerá del contenido de humedad del suelo. La siguiente grafica ilustra esta relación.



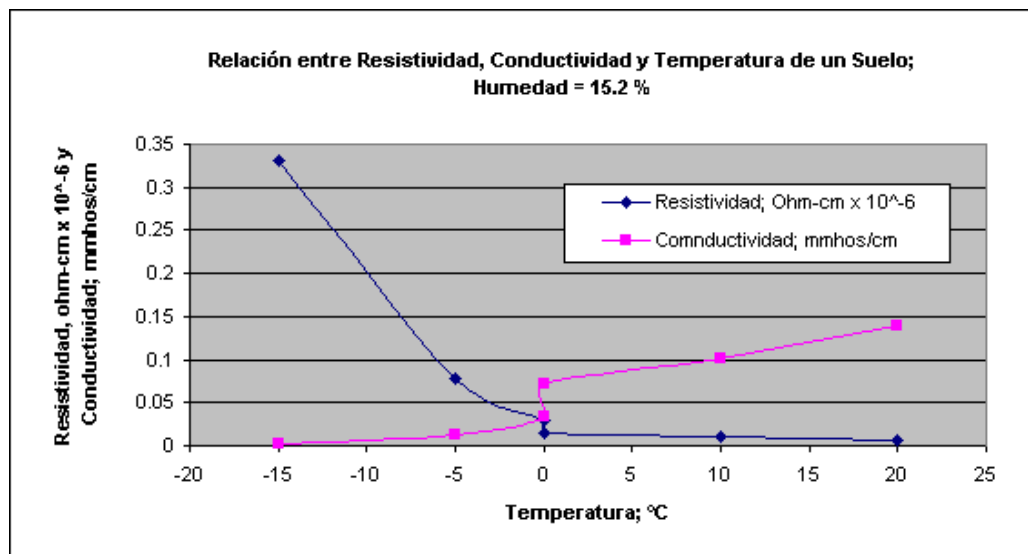
**Fig. 2.5 Resistividad y conductividad grane –ceg- del suelo Vs humedad. Calderón Sáenz, F. (2005).**

Por otro lado, mientras más conductiva sea la fase líquida, mayor será la Conductividad Granel del suelo. Para un cierto contenido de humedad, la conductividad granel dependerá del contenido de sales en la solución intersticial.



**Fig. 2.6 Conductividad granel-ceg- y resistividad de un suelo Vs. % de sales en la solución del mismo. Para una humedad constante del 15% p/p Calderón Sáenz F. 2005.**

Adicionalmente a lo anterior, es sabido que la Conductividad Eléctrica de cualquier medio aumenta con la temperatura. Esto es debido a la mayor movilidad iónica. Este efecto puede verse en la gráfica siguiente:



**Fig. 2.7 Relación entre resistividad, conductividad y temperatura de un suelo con una humedad del 15.2%. Calderón Sáenz F. 2005**

Este efecto sin embargo es menor que el efecto de la humedad. Como puede verse en las anteriores gráficas, la variación de la Conductividad entre 10 y 20 % de Humedad, es casi del 300 %, mientras que la variación de la Conductividad cuando la temperatura del suelo varía entre 10 °C y 20 °C es tan solo del 40 %. Usualmente la diferencia entre la T. máxima y la T. mínima a 10 cm de profundidad es inferior a 10 °C. <http://www.sws.uiuc.edu/warm> , <http://climate.umn.edu/>

De lo anterior se desprende que la CEG es una medida que depende fundamentalmente del contenido de humedad del suelo y del contenido de sales disueltas en dicha humedad. También depende secundariamente de otros factores tales como Temperatura, tipo de suelo, cantidad y clase de arcillas, porcentaje de saturación de bases del complejo de cambio etc.

De los anteriores factores, los únicos que varían en el corto plazo son la Humedad y la Conductividad de la Solución Intersticial, permaneciendo los demás relativamente constantes.

En la mayoría de los cultivos intensivos, el proceso de disminución de humedad del suelo o sustrato, se debe a la absorción activa de agua por las raíces de las plantas y concomitantemente de iones disueltos, así que la conductividad de la solución intersticial no varía demasiado durante este proceso.

Cuando la Conductividad de la solución intersticial se hace permanecer lo mas constante posible, como es el caso de los cultivos tecnificados, en los cuales se controla dicha conductividad mediante el uso de sondas de succión, la CEG se convierte en un parámetro que en el corto plazo solamente depende de la Humedad, así que:

$$\text{CEG} = K_s \times f (\% \text{ volumétrico de Humedad}) \times f (\text{C.E. Intersticial}) \times K_c$$

En donde:



**Kc** = Constante de celda.

**Ks** = Constante que depende del tipo de suelo o sustrato.

**C.E. Intersticial** = Aproximadamente Constante.

En la anterior ecuación, el término  $K_s \times f$  (% volumétrico de Humedad)  $\times f$  (C.E. Intersticial) es la Conductancia del Suelo comprendido entre los electrodos de medida y es igual a  $l_t/v_t$ .

Aunque es frecuente ver expresada la conductividad de una disolución en  $S \cdot m^{-1}$  o sus derivados ( $dS \cdot m^{-1}$ ,  $mS \cdot cm^{-1}$  ó  $\mu S \cdot cm^{-1}$ ), porque los equipos de medida la muestran como la magnitud que han hallado, en trabajos científicos suelen aparecer dos conceptos nuevos: la conductividad molar y la conductividad equivalente. En las variables anteriormente citadas, la conductividad se relaciona con la concentración molar o equivalente (equivalente gramo) del electrolito que participa en la disolución; en este caso, la conductividad molar se expresa como:

$$\text{Ecuación 2.7} \quad \lambda = \frac{K}{C}$$

Donde:

$\lambda$  = Conductividad molar ( $S \cdot m^{-2} \cdot mol^{-1}$ ).

**K** = Conductividad específica ( $S \cdot m^{-1}$ ).

**C** = Concentración ( $moles \cdot m^{-3}$ ).

Continuando con el mismo razonamiento, la conductividad equivalente-gramo se expresa como:

$$\text{Ecuación 2.8} \quad \lambda_{eq} = \frac{1000 * K}{C_{eq}}$$

Donde:

$\lambda_{eq}$  = Conductividad equivalente molar ( $S \cdot cm^{-1} \cdot eq \cdot g^{-1} \cdot L^{-1}$ ).

**K** = Conductividad específica ( $S \cdot cm^{-1}$ ).

$C_{eq}$  = Concentración (equivalentes-gramo  $\cdot L^{-1}$ ).

Desde el punto de vista práctico, resulta interesante estimar la concentración de un determinado electrolito fuerte, en una disolución acuosa, a partir de su conductividad eléctrica. **El cuadro 2.3** muestra algunos parámetros que para los fertilizantes inorgánicos y orgánicos más comúnmente utilizados en fertirrigación.

**Cuadro 2.3** *Parámetros (a, b) y coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de la ecuación lineal ( $y = a + b \cdot x$ ) que relaciona la concentración (y, mM) de una disolución acuosa de fertilizantes comúnmente utilizados en fertirrigación, con su conductividad eléctrica (x,  $mS \cdot cm^{-1}$ ).*

| FERTILIZANTE <sup>(1)</sup>                           | $y = a + b \cdot x$ |        |        | CE <sub>25</sub><br>( $mS \cdot cm^{-1}$ ) |
|---|---------------------|--------|--------|--|
|   | a                   | b      | $r^2$  |  |
| KNO <sub>3</sub>                                      | 0.1117              | 0.0493 | 0.9992 | 26.4                                       |
| Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                     | 0.1782              | 0.1020 | 0.9992 | 16.3                                       |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                       | 0.1260              | 0.0515 | 0.9997 | 23.4                                       |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O | 0.1813              | 0.1303 | 0.9980 | 15.8                                       |
| KCl   | 0.1256              | 0.0255 | 0.9999 | 23.7                                       |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                        | 0.1191              | 0.0512 | 0.9995 | 24.7                                       |
| MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O                 | 0.1288              | 0.1853 | 0.9946 | 21.8                                       |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                        | 0.0703              | 0.1010 | 0.9909 | -  |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                        | 0.2896              | 0.2335 | 0.9982 | 9.6  |

HANNA Instruments (HI) ha desarrollado un equipo (HI993310) que, a partir de un circuito electrónico común, permite medir tanto la conductividad eléctrica (CE<sub>25</sub>) de una disolución, como la actividad eléctrica del suelo (A). La Fig. (2.8) muestra el aspecto que adopta el equipo cuando tiene conectada la sonda para medir la actividad eléctrica del suelo.



**Fig. 2.8** *Activímetro de HANNA Instruments (HI993310): para medir la conductividad eléctrica de una disolución (W) ó la actividad del suelo (S).*

## 2.4 Medida de la resistividad eléctrica del suelo

### 2.4.1 Método de Frank Wenner

Este método, se basa en la aplicación del principio de caída potencial, donde se toman cuatro electrodos (A, P1, P2, B), ubicados en una línea recta, separados a una distancia "a" entre ellos Fig. (2.9)

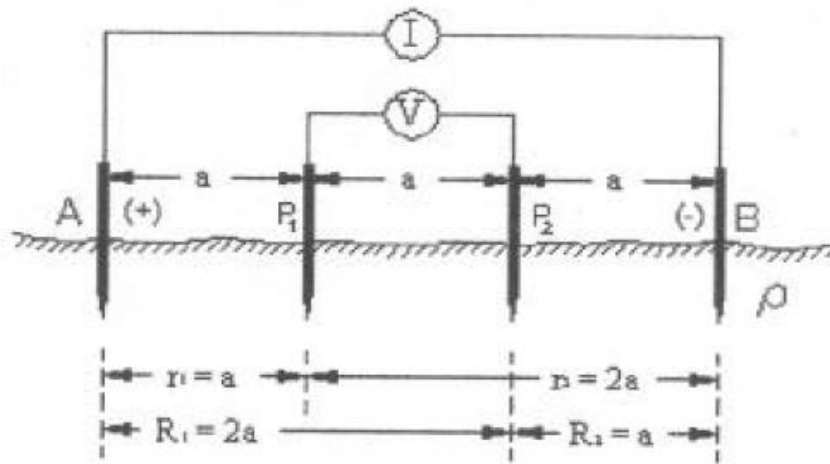


Fig. 2.9 Método de Wenner para medir la conductividad eléctrica del suelo. Cancha Q.R.W, (2005)

Siendo su resistividad:

**Ecuación 2.9**

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

### 2.4.2 Método de Schlumberger

En este método los cuatro electrodos se ubican en una línea recta y la distancia de los electrodos detectores de potencia P1 y P2 que permanecen fijos, es mucho menor que los electrodos inyectoros de corriente A y B, que son los que se trasladan Fig. 2.10.

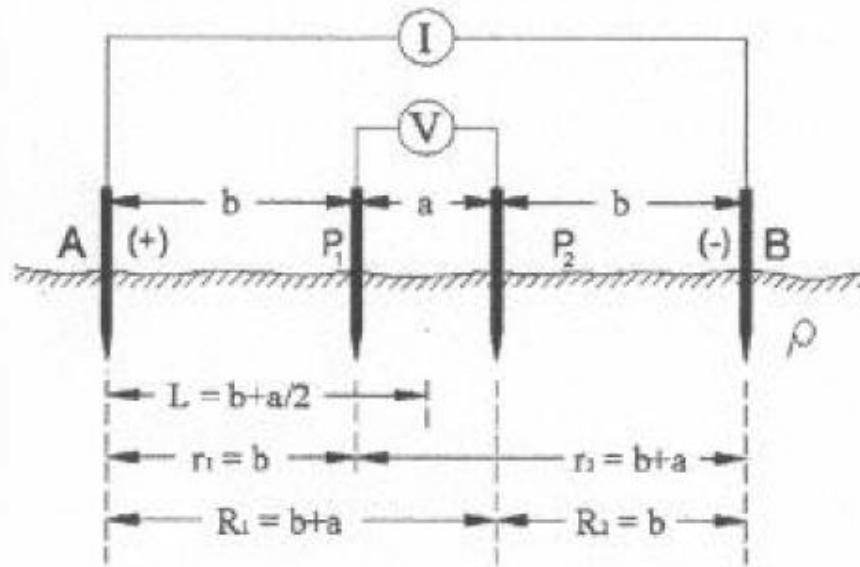


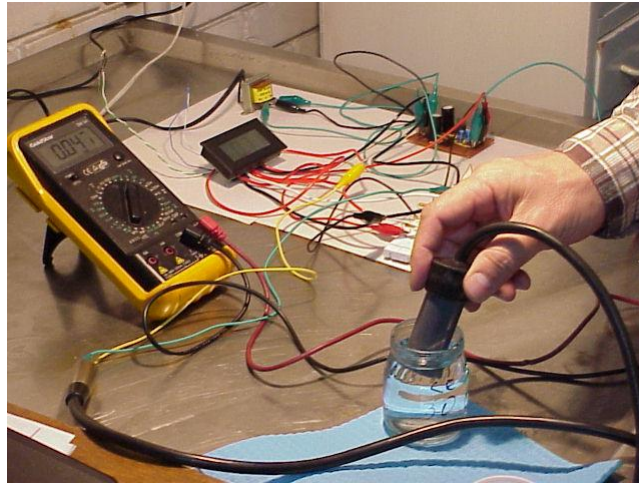
Fig. 2.10 Método Schlumberger para medir la conductividad eléctrica del suelo (Cancha. Q.R.W. 2005)

Siendo su resistividad:

$$\text{Ecuación 2.10} \quad \rho = 2\pi \frac{V}{I} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{b+a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 4\pi Rb \left\{ \frac{b+a}{a} \right\}$$

Calderón (2005) describe el proceso de la construcción de un Conductímetro para lo cual fue necesario una investigación previa con el fin de determinar la naturaleza de la variable a medir, con que se va a medir, donde se va a visualizar la medida, en que rango va a trabajar nuestro aparato y todas aquellas variables que van a afectar nuestro entorno de medición. Se debe luego establecer la idea

de un circuito de medición y realizar las primeras verificaciones como se muestra en la fig. 2.11, con el fin de comprobar la idea inicial



**Fig. 2.11 Primera prueba del desarrollo del circuito de un Conductivímetro. Calderón Sáenz F, (2005)**

El pulimento de los electrodos debe ser perfecto para evitar variaciones en su superficie y que esta sea de tamaño constante y predecible. Esto permite construir electrodos con una constante de Celda verdaderamente constante. fig. 2.12



**Fig. 2.12 Comprobación de electrodos**

Preparación de Soluciones de Calibración Standard. Se prepara una serie de patrones o soluciones Standard de Conductividad Eléctrica conocidas partiendo de Cloruro de Potasio (ClK). Esto es necesario con el fin de verificar la linealidad del instrumento y obtener a su vez la curva (recta) de calibración.

**Cuadro 2.4** Conductividad Eléctrica de Soluciones de KCL

| mg/lit de KCl | C.E. uS/cm<br>a 25°C | Fórmula<br>Exponencial | Desviación de la Fórmula<br>con respecto a la Tabla; % |
|---------------|----------------------|------------------------|--|
| 7.455         | 14.94                | 17.1                   | 13.7   |
| 37.28         | 73.9                 | 79.7                   | 7.8  |
| 74.55         | 147                  | 154.9                  | 5.4  |
| 372.75        | 717.8                | 726.6                  | 1.2  |
| 745.5         | 1413                 | 1413.3                 | 0.0  |
| 1491          | 2767                 | 2749.4                 | -0.6   |
| 3727.5        | 6668                 | 6626.1                 | -0.6   |
| 7455          | 12900                | 12889.8                | -0.1   |
| 37275         | 58640                | 60430.7                | 3.1  |
| 74550         | 111900               | 117556.5               | 5.1  |

**Cuadro AOAC Official Method 973.40 and Table 973.40B**

Los valores resaltados dentro de las dos primeras columnas del **cuadro 2.4** corresponden a los valores originales declarados en la tabla de la AOAC. Los otros valores fueron obtenidos por el autor mediante interpolación de dicha tabla. La tercera columna fue obtenida por el autor mediante la fórmula empírica:

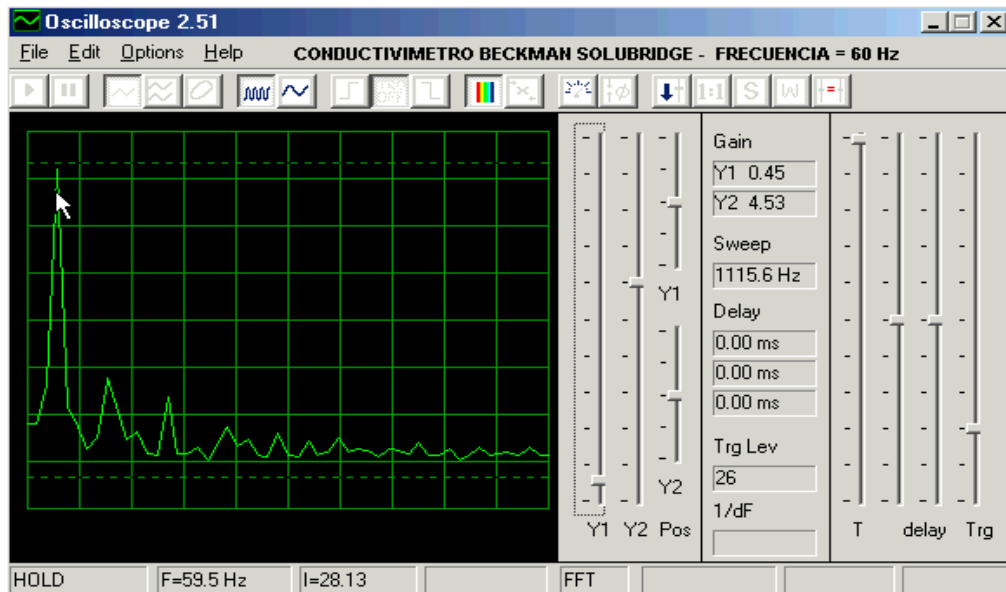
$$\text{Ecuación 2.11} \quad CE = 2.47 \times \text{conc.KCl}^{0.96@25^\circ\text{C}}$$

La última columna muestra el grado de ajuste en porcentaje de los valores obtenidos con dicha fórmula con respecto a los valores originales de la Tabla. Como puede observarse, para Conductividades comprendidas entre 0.666 y 12.9 mmhos/cm la desviación es menor de  $\pm 1.3\%$

Con el fin de decidir cuál debía ser la frecuencia de operación estudió la frecuencia de oscilación de varios conductivímetros comerciales:

Para estudiar esta frecuencia se utilizó el programa Winscope 2.51 diseñado por Konstantin Zeldovich, el cual permite utilizar como entrada la tarjeta de sonido del computador y además hace la Transformada Rápida de Fourier y nos indica la frecuencia de la Onda.

Algunas de las frecuencias obtenidas fueron las siguientes:



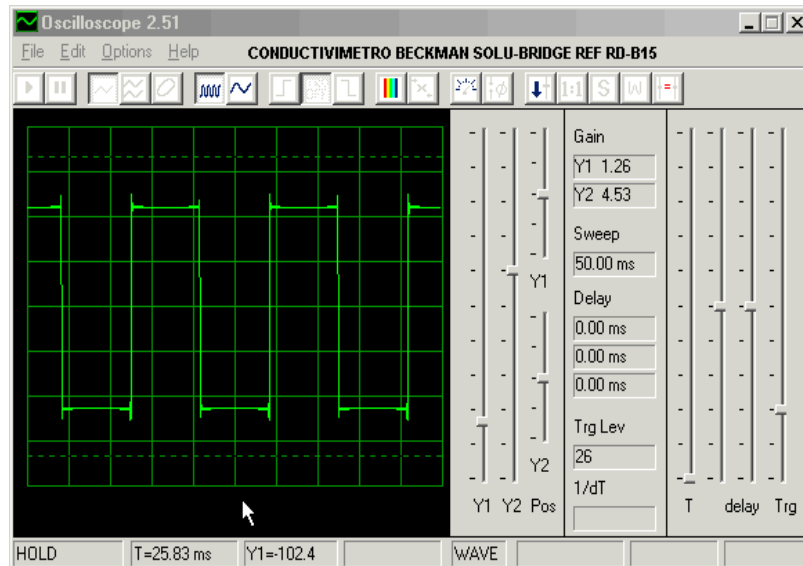
**Fig. 2.13 Frecuencia de Conductímetro Beckman Solubridge**

En conclusión la muestra de conductímetros ensayados arrojó las siguientes frecuencias dominantes, algunos con señales sinusoidales relativamente puras otros con señales cuadradas algo ruidosas.

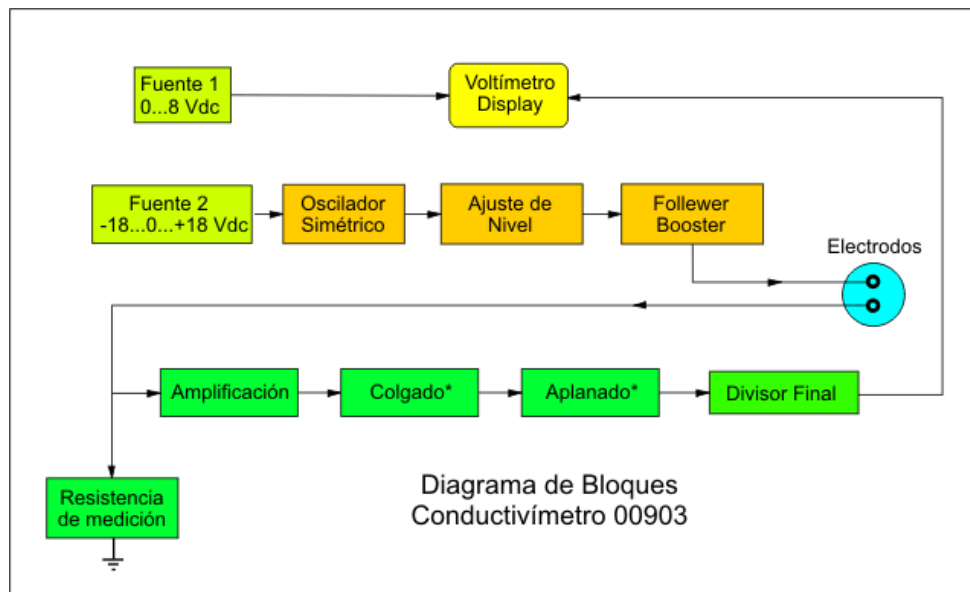
**Cuadro 2.5 Frecuencias obtenidas con diferentes Conductímetros**

|  | <b>Frecuencia Nominal; Hz</b> | <b>Frecuencia Observada; Hz</b> |
|--|-------------------------------|---------------------------------|
| <b>Conductímetro Beckman Solubridge</b>        | 60                            | 59.5                            |
| <b>Conductímetro Beckman Solubridge RD-B15</b> | 60                            | 61                              |
| <b>Conductímetro DIST WP-4</b>                 | N.D                           | 2696.1                          |
| <b>Conductímetro TDS-1</b>                     | N.D.                          | 7680.8                          |
| <b>Conductímetro TDS Test-4</b>                | N.D.                          | 3197.2                          |
| <b>Conductímetro Metrohm 660 a 2 kHz</b>       | 2000                          | 1866.9                          |
| <b>Conductímetro Metrohm 660 a 300 Hz</b>      | 300                           | 316.1                           |
| <b>Conductímetro Schott Gerate CG-857</b>      | N.D.                          | 941.9                           |

La forma de la onda fue necesario investigar con el fin de conocer como es en la mayoría de los conductímetro comerciales (fig.2.14)

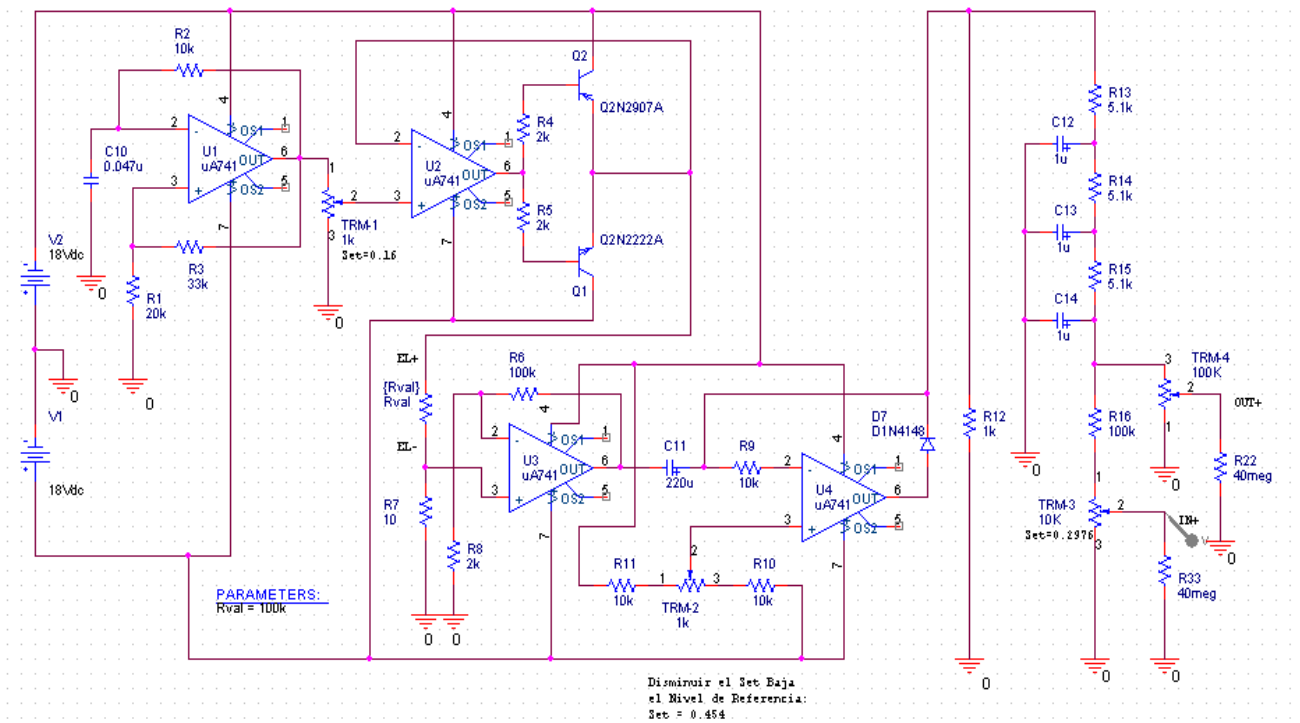


**Fig. 2.14 El Conductímetro Beckman Solubridge utiliza onda Cuadrada completamente simétrica.**



**Fig. 2.15 Diagrama de bloques de cómo puede quedar conformado un Conductímetro**





**Fig. 2.16 Diagrama Electrónico de Conductímetro Propuesto por Calderón Sáenz F (2005)**

**Cuadro 2.6** Conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita (mS/cm por cada meq/l) en disoluciones acuosas a 25 °C para los iones más usuales en agronomía.

| Cationes                          | I <sup>o+</sup> | Aniones                          | I <sup>o-</sup> |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| <b>H+</b>                         | 349.7           | OH-                              | 198.0           |
| <b>Na+</b>                        | 50.1            | Cl-                              | 76.3            |
| <b>K+</b>                         | 73.5            | NO <sub>3</sub> -                | 71.4            |
| <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b> | 73.5            | HCO <sub>3</sub>                 | 44.5            |
| <b>Mg<sup>+2</sup></b>            | 53.0            | CO <sub>3</sub> -2               | 69.3            |
| <b>Ca<sup>+2</sup></b>            | 59.5            | SO <sub>4</sub> -2               | 80.0            |
|                                   |                 | HPO <sub>4</sub> -               | 33              |
|                                   |                 | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> - | 33              |

Handbook of Chemistry and Physics. (Lide. D.R 1992)

**Cuadro 2.7** Diferencia de CE (mS/cm a 25°C) real y teórica sin considerar las fuerzas interiónicas, para cuatro aguas de riego de diferente composición.

| Iones (meq/l)     | Agua 1 | Agua 2 | Agua 3 | Agua 4 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Ca+2</b>       | 1.55   | 5.50   | 6.17   | 31.60  |
| <b>Mg+2</b>       | 0.07   | 4.72   | 9.97   | 24.82  |
| <b>Na+</b>        | 1.04   | 4.12   | 42.99  | 10.34  |
| <b>K+</b>         | 0.34   | 0.13   | 1.59   | 0.32   |
| <b>HCO3-</b>      | 1.34   | 2.76   | 4.62   | 8.64   |
| <b>Cl-</b>        | 0.83   | 4.18   | 46.90  | 10.46  |
| <b>SO4-2</b>      | 0.82   | 7.58   | 9.30   | 48.28  |
| <b>CE teórica</b> | 362    | 1842   | 7694   | 9057   |
| <b>CE real</b>    | 323    | 1310   | 5960   | 4360   |

Dpto. Producción Agraria (Área Edafología y Química Agrícola) - ETSIA. Universidad Politécnica de Cartagena.(Alarcón)

## 2.5 Determinación de humedad

La determinación del contenido de agua en el suelo o cualquier otro sustrato es de gran importancia en muchas aplicaciones científicas e industriales tales como la agricultura, medio ambiente, construcción, industria alimentaria, ecología, hidrología y meteorología, entre otras. Con el objeto de conocer los procesos de humectación desecación en relación con otros parámetros geo-ecológicos tales como presencia-ausencia de piedras superficiales, vegetación anual y/o perenne, etc. Este dispositivo debía ser una sonda de fácil instalación, coste moderado y volumen de medida reducido con el fin de obtener una resolución espacial óptima (por ejemplo, medición de humedad en raíces de plantas).

Además el sensor debía permitir su utilización en suelos con un alto contenido en sales tales como los oasis de los desiertos o los suelos enarenados de cultivos bajo plástico. Presentamos un método alternativo al TDR (Time Domain

Reflectometry) para la determinación de la humedad volumétrica en el suelo. La técnica del Self Balance Impedance Bridge (SBIB) permite separar parte real e imaginaria de la constante dieléctrica para la determinación de la humedad volumétrica y conductividad eléctrica, respectivamente. De esta manera es posible su utilización en suelos muy salinos donde el TDR suele acarrear problemas. Presenta otras ventajas adicionales tales como la corrección de la medida de humedad frente a la temperatura del suelo y un costo reducido.

### ***2.6 Eficacia de un Sensor de Capacitancia para Medir Simultáneamente Salinidad y Contenido Hídrico***

Ritter y Regalado(2007) Describen un proceso de medición de humedad a través de los sensores dieléctricos de capacitancia constituyen un método alternativo para determinar el contenido hídrico en la zona no saturada, por ser instrumentos no contaminantes, de fácil manejo y de coste relativamente bajo que proporcionan medidas instantáneas y de forma poco destructiva.

Algunos de estos sensores comerciales han sido adaptados para realizar lecturas simultáneas del contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) y de la conductividad eléctrica aparente del suelo ( $\sigma$ ) en el mismo volumen de muestra. Sin embargo, como consecuencia de la baja frecuencia de trabajo que usan estos sensores, se plantean dudas sobre la exactitud con la que estas variables pueden determinarse simultáneamente. Estudios previos han evaluado la eficacia del sensor comercial WET Sensor (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Gran Bretaña) en suelos forestales de origen volcánico, encontrando que mientras que el WET Sensor estima de forma correcta la conductividad eléctrica del medio, la lectura de permitividad relativa, y por tanto del contenido de humedad se ve alterada por  $\sigma$  de forma importante.

La estimación de la conductividad eléctrica de la solución ( $\sigma_w$ ) a partir  $\theta$  y  $\sigma$  según el modelo que utiliza el fabricante, tampoco es satisfactoria. En el trabajo desarrollado por Regalado (2007) se estudia si estos resultados obtenidos para

suelos volcánicos, para los cuales es conocido su carácter dieléctrico atípico, se producen también en un medio homogéneo tal como una arena gruesa.

Los resultados indican que además de en los suelos volcánicos estudiados, en la arena, la estimación de  $\theta$  y  $\sigma_w$ , a partir de las lecturas del WET Sensor y de los modelos que propone el fabricante, no es exacta. Sin embargo, en la arena estos errores son inferiores a los que se observan en los suelos volcánicos. Tanto para la arena, como para los suelos volcánicos estudiados, se proponen modelos alternativos a los que utiliza el fabricante para la determinación de  $\theta$  y  $\sigma_w$ : uno para la estimación de  $\sigma_w$  y otro para determinar  $\theta$  teniendo en cuenta la influencia de  $\sigma$  sobre la medida de permitividad que se obtiene con el WET Sensor.

### ***2.7 PUENTE DE IMPEDANCIA DE AUTO BALANCE, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica***

La constante dieléctrica global de un material está determinada por el conjunto de constantes dieléctricas de cada uno de sus componentes a través de la ecuación de Hasted (1973):

$$\text{Ecuación 2.12} \quad \epsilon_m = \left[ \epsilon_h^{L/3} + p \left( \epsilon_{inc}^{L/3} - \epsilon_h^{L/3} \right) \right]^3$$

Donde

$\epsilon_m$  = es la constante o permisividad dieléctrica global

$\epsilon_h$  = la del substrato

$\epsilon_{inc}$  = la del material añadido en una proporción  $p$ .

Dado que la constante dieléctrica del suelo es baja (entre 2 y 4) y la del agua es muy alta ( $\approx 78.5$ ), la constante dieléctrica de un suelo húmedo estará muy condicionada por el contenido de agua de dicho suelo. Conocidas las constantes dieléctricas del material añadido y del substrato, si somos capaces de medir la

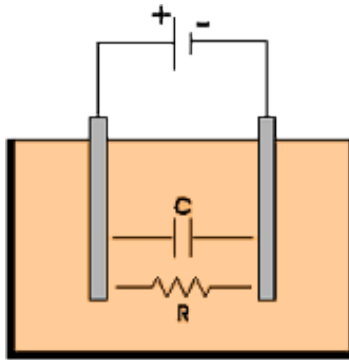
constante dieléctrica global  $\epsilon_m$ , seremos capaces de determinar la proporción del material añadido, agua en nuestro caso.

Entre las diferentes técnicas para la medición de la constante dieléctrica del un medio se encuentran los sensores capacitivos y las sondas *TDR*. Los primeros consisten en un oscilador controlado por la capacidad equivalente que presentan los electrodos introducidos en el medio a medir. La frecuencia del oscilador será proporcional al contenido de agua del suelo. El principal inconveniente que puede presentar este tipo de dispositivos es la estabilidad del oscilador frente a cambios de temperatura y el efecto parásito de la conductividad del suelo sobre la frecuencia de oscilación. La principal ventaja de este tipo de sensores es su precio moderado.

El funcionamiento de las sondas *TDR* se basa en la relación que hay entre la velocidad de propagación de una onda electromagnética y la constante dieléctrica del medio. Para ello se excita la sonda mediante un pulso de corta duración y se mide el tiempo transcurrido hasta que se recibe el eco de la onda reflejada en el extremo final de la sonda. Conociendo la longitud real de la sonda podremos calcular la velocidad de propagación. El principal inconveniente de esta técnica es la necesidad de resolver tiempos extremadamente cortos lo cual encarece la electrónica del dispositivo. Además su uso está restringido a suelos de baja conductividad eléctrica ya que en suelos con un alto contenido salino la atenuación de la señal es tal que apenas puede distinguirse el pulso reflejado. Esto obliga al uso de sondas excesivamente cortas donde la resolución temporal se hace inalcanzable. Por último, las sondas deben tener una longitud mínima que permita resolver con suficiente precisión los intervalos de tiempo de tránsito, obligando a volúmenes de sonda excesivamente grandes para determinadas aplicaciones.

La constante dieléctrica de un medio puede ser entendida como una magnitud compleja, es decir, tiene una parte real y otra imaginaria. La parte real de la constante dieléctrica está asociada a las propiedades dieléctricas del material. La

parte imaginaria está asociada a pérdidas en el material debidas a la conductividad y a fenómenos de relajación tal y como podemos observar en la Ecuación 2.12 (Hastead 1973).



**Figura 2.17 Comportamiento eléctrico de electrodos inmersos en un material**

**Ecuación 2.13**  $Z = \sqrt{\mu / \epsilon^\alpha}$

Dado que la constante dieléctrica es una magnitud compleja, la impedancia y la admitancia ( $Y=1/Z$ ) también lo serán. Expresando la admitancia en forma compleja ( $Y=a+jb$ ) obtenemos una expresión equivalente al circuito de la **Figura 2.17**, que formarían un condensador en paralelo con una resistencia (**ecuación 2.14**)

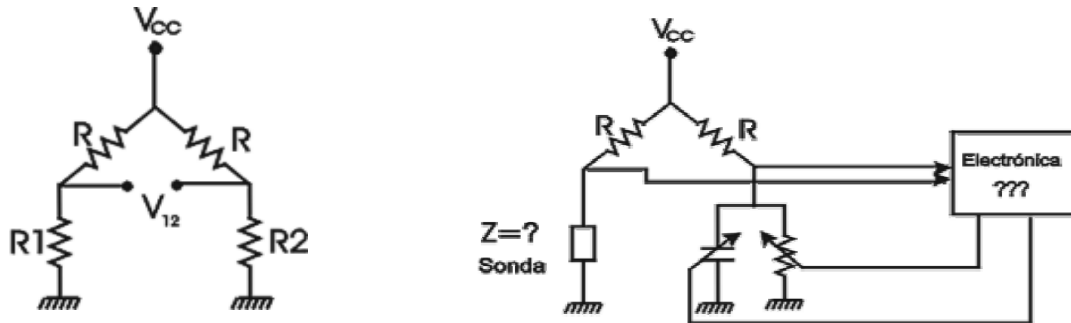
**Ecuación 2.14**  $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C$

La resistencia está asociada a la conductividad del suelo, es decir, a la parte imaginaria de la constante dieléctrica. La capacidad está asociada a las propiedades dieléctricas del material, la parte real de la constante dieléctrica y por tanto a la humedad del suelo. Así, si medimos la impedancia como parte real e imaginaria podemos separar perfectamente las medidas de humedad y conductividad del suelo, Para medir dicha impedancia el SBIB utiliza un puente de impedancias.

El funcionamiento de este circuito se muestra en la Fig. (2.18) (a) este es equivalente al de una balanza y se utiliza para detectar desequilibrios entre las impedancias  $R1$  y  $R2$ . Cuando  $R1=R2$  se dice que el puente está equilibrado (la señal de desequilibrio del puente  $V_{12}$  es 0).

a) Resistivo

b) De impedancia



**Fig. 2.18 Puentes de Impedancias**

En la Fig. 2.18 (b) se observa cómo se utiliza el puente de impedancias en el *SBIB* para medir la impedancia ( $Z$ ) de la sonda. Un circuito electrónico se encarga de medir la señal de desequilibrio del puente ( $V_{12}$ ) y de actuar sobre un condensador y una resistencia variable. Cuando  $V_{12}=0$ , es decir, el puente está en equilibrio, las señales de control del condensador y resistencia variables nos indican el valor de la conductividad y la capacidad equivalente. La frecuencia de funcionamiento del *SBIB* es de 50MHz.

De acuerdo con autor Esta frecuencia es lo suficientemente alta como para que la parte reactiva y la resistiva de la impedancia tengan valores similares y se alcance el equilibrio del puente con facilidad. Además, es lo suficientemente baja como para no tener pérdidas en el dieléctrico debidas a fenómenos de relajación, correspondiendo la parte resistiva de la constante dieléctrica únicamente a la conductividad del suelo.

Para minimizar efectos parásitos como variaciones con la temperatura u otros efectos como la degradación de los electrodos, el circuito se complementa con un sistema de *chopping* o conexión y desconexión de los electrodos a una frecuencia de 300Hz. De esta manera la señal de desequilibrio del puente es amplificada diferencialmente entre el estado de sonda conectada y desconectada. Al realizar una medida diferencial las variaciones debidas a derivas térmicas o envejecimiento se minimizan.

El *SBIB* está dotado con un sensor de temperatura para corregir las variaciones de la constante dieléctrica del agua con la temperatura. Cualquier método basado en la medición de la constante dieléctrica debería realizar una corrección con la temperatura si quiere alcanzar precisiones por debajo del 1%.

## **2.8 Variabilidad en suelos**

La caracterización de los patrones espaciales de variabilidad es de creciente interés para determinar los niveles de precisión con los cuales pueden predecirse los atributos de suelo a diferentes escalas. La asociación espacial entre estos atributos y rendimiento de cultivos es necesaria en la aplicación de insumos en forma variable o tecnología manejo sitio-específico (MSE). Esta tecnología se fundamenta en la capacidad de reconocer la heterogeneidad dentro del lote de producción y adecuar el uso de insumos para cada unidad reconocida (Khosla *et al.*, 2002; Ruffo *et al.*, 2006; Urricariet & Zubillaga, 2007).

Tres tipos de variabilidades han sido identificados. El primer tipo es la variabilidad espacial, la cual puede ser vista como los cambios a través del lote. La segunda variabilidad es la temporal que se refiere a cuando los parámetros cambian a través del tiempo y El tercer tipo es la variabilidad predictiva.

En el **cuadro (2.8)**, se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP (Agricultura de Precisión), las tecnologías involucradas y las actividades realizadas.



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

**CUADRO 2.8** *Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (Adaptado de USDA, 1998).*

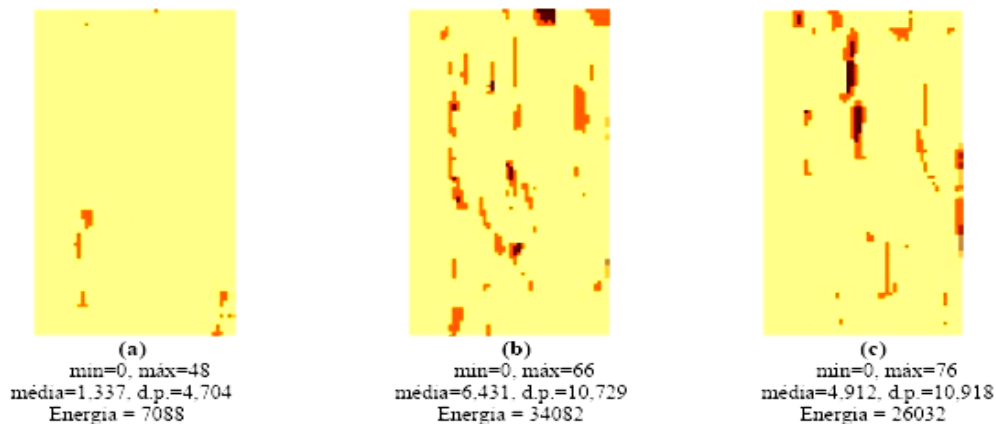
| <b>ETAPA</b>   | <b>TECNOLOGIA INVOLUCRADA</b>   | <b>ACTIVIDADES</b>   |
|--|---|--|
| <b>Recolección e ingreso De datos.</b>                             | Sistemas de posicionamiento global (GPS).<br>Sistemas de información geográfica (SIG).<br>Instrumentos topográficos.<br>Sensores remotos.<br>Sensores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

### 2.8.1 Medición de la Variabilidad

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

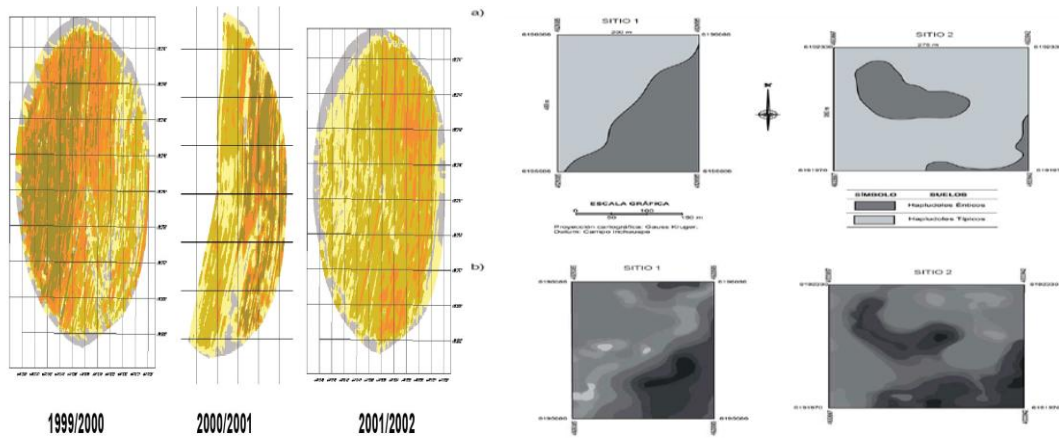
Un DGPS (GPS Diferencial) se utiliza para obtener la localización de la posición de los rendimientos que se están obteniendo. Un sistema similar se utiliza para el muestreo del suelo, excepto si las muestras se recogen a mano, y se envían posteriormente al laboratorio para su análisis, en este último caso se utiliza un GPS para el posicionamiento del lugar de la toma de muestras ( figura 2.19).

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



**Fig. 2.19 Mapa de preproducción.**

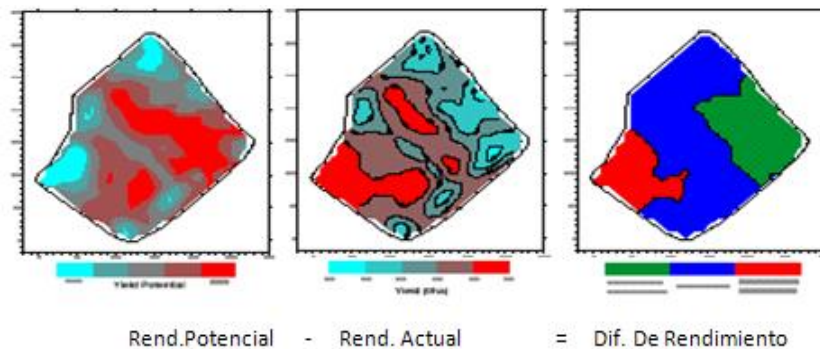
La variabilidad temporal se obtiene mediante la información y comparación de mapas que han sido obtenidos a lo largo del tiempo. (Fig. 2.20).



**Fig. 2.20 Mapas de rendimientos de diferentes años.**

La variabilidad en la estimación esta variabilidad se obtiene midiendo la diferencia entre los valores para el cultivo, y los valores conseguidos. Los valores que más se utilizan son los de área de producción, el rendimiento y calidad. La calidad es difícil de predecir, hasta los estudios tardíos de la producción, mediante la medida de la clorofila, y la realización de un mapa de clorofila. (Figura 2.21).

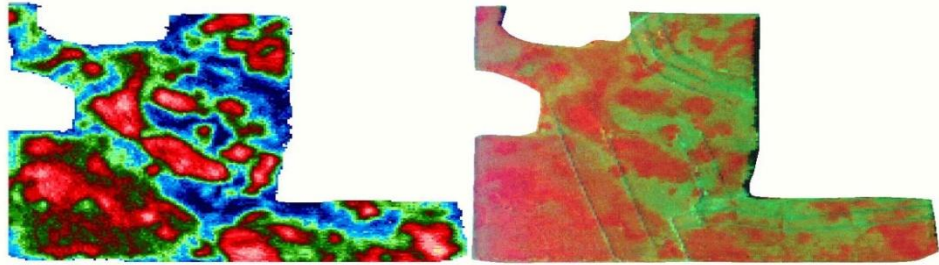
La mayoría de los trabajos publicados relacionados a sistemas de determinación de producción de productos agrícolas para la elaboración de mapas de rendimiento están en el área de granos, donde empresas como JOHN DEERE (1998), CASE (1999) y AGCO (1999), desarrollaron sensores de flujo de masa específicos, para determinar la producción y la humedad de granos y software para manejar estos datos y generar los mapas de rendimiento.



**Figura 2.21 Variabilidad de la estimación del rendimiento.**

### 2.8.2 Mapa de Rendimiento

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



**Fig. 2.22** A la izquierda, representación de los datos de posición y rendimiento, sin tratamiento con SIG. A la derecha, la misma parcela tras tratar los datos con un SIG.

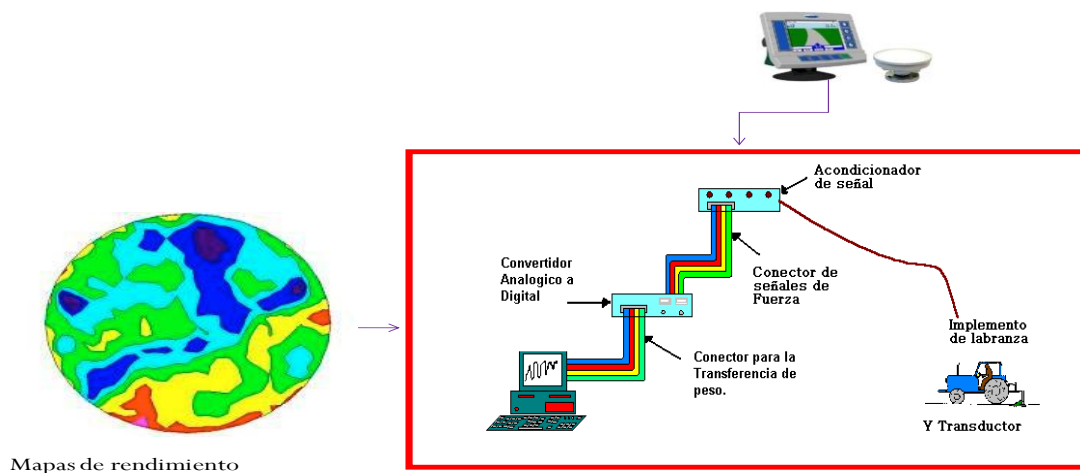
Será necesario un receptor GPS montado sobre la cosechadora, el cual obtendrá segundo a segundo la información de la posición en el campo, a medida de que la cosechadora avanza por el campo. Además, esta cosechadora debe tener dos sensores, uno para medir el flujo de grano, y otro para medir la humedad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

Normalmente la información se almacena en memoria PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) la cual puede extraerse de este ordenador, y pasar su información posteriormente al ordenador de la oficina.

Si se realizase una representación de esta información, se obtendría la parte izquierda de la figura 2.22, la cual como se ve es difícil de interpretar. Por lo tanto es necesario un software que permita una mejor lectura o interpretación de los datos, estos programas informáticos son los SIG (Sistemas de Información Geográfica). Así la figura antes mencionada, aparecerá suavizada, como en la parte derecha de la figura 2.22.

Norton y Swinton, (2001), describe una metodología de manejo integral utilizando herramientas de obtención de datos geo-referenciados de rendimiento como se muestra en la fig. 2.23. (mapas anteriores de trigo y maíz del lote), muestreos de suelo dirigidos, análisis y siembra de maíz con densidad y fertilización variable de acuerdo a prescripciones geo-referenciadas.

Que incluye la Identificación de zonas de rendimientos diferentes dentro del lote a través de mapas anteriores, maíz y trigo; Realización de un muestreo representativo de cada una de las zonas, con muestras compuestas geo-referenciadas con sub muestras de cada uno de los lugares seleccionados; Análisis de la correlación rendimiento/característica química-físicas de suelo; Priorización de los datos de rendimiento de los mapas anteriores, como dato de peso en la estimación de rendimiento sitio específico del maíz del presente año; Definición de 4 ambientes de rendimiento en maíz (- de 90 qq/ha), (90 a 105), (105 – 120) y (+ de 120), como dato para el cálculo de fertilización. Teniendo como criterio que donde más rindió en los mapas anteriores se estima que se expresará con un mayor potencial de rendimiento y por ende serán necesario mayor necesidad de nutrientes; Análisis de respuestas variables de cada dosis de fertilizante en cada ambiente para luego realizar un análisis económico para determinar la conveniencia o no del uso de este tipo de tecnología de siembra variable con sembradora inteligente donde los ambientes lo justifiquen.



**Fig. 2.23 Sistema de adquisición de datos para obtención de mapas de rendimiento**

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Determinación de la Conductividad Eléctrica -C.E y humedad del suelo.

Para la determinación de la conductividad eléctrica y humedad del suelo se construyeron dos dispositivos electrónicos, uno que permitió medir la humedad del suelo y otro la conductividad eléctrica. Para el primero se empleo un Circuito integrado LM2907, que permitió medir capacitancias hasta de  $10^4 \mu\text{F}$ , complementado con un circuito integrado XR2206, con el que se pudo variar tanto la frecuencia de alimentación como el tipo de onda. En circuito a diseñar y evaluar se muestra en la Fig. (3.1) y (3.2).

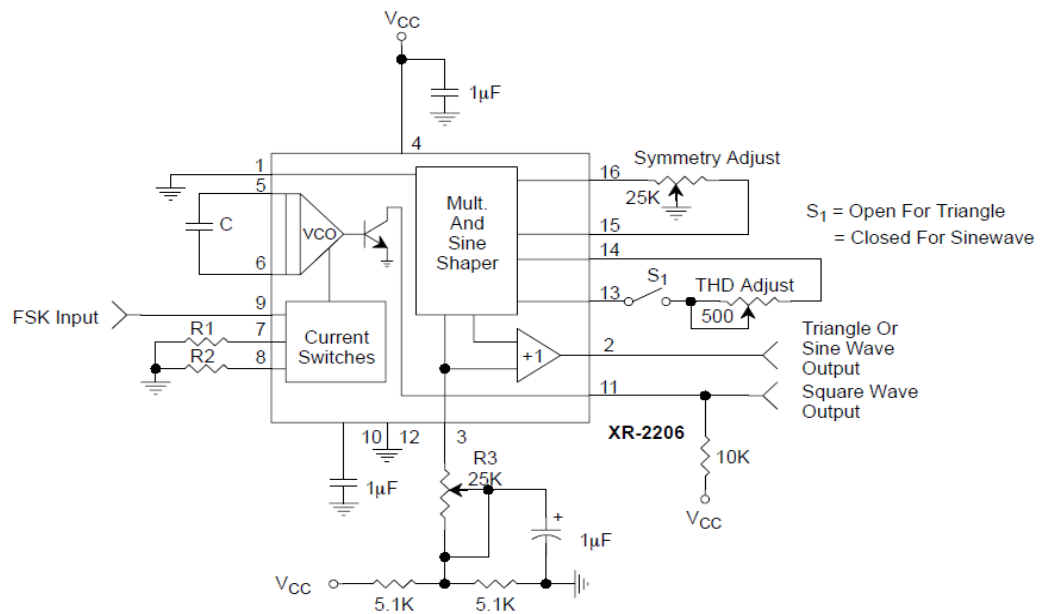
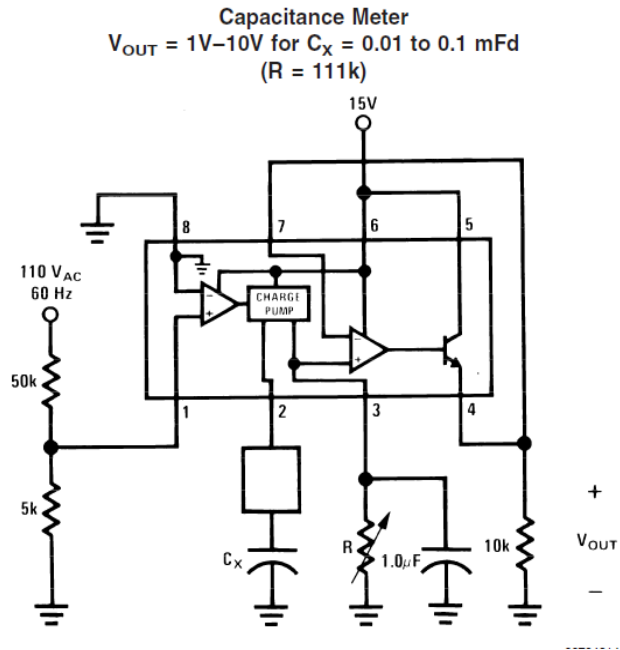


Fig. 3.1 Circuito para medir conductividad eléctrica



**Fig. 3.2 Circuito para determinar capacitancia**

Para el circuito que mida la conductividad eléctrica se ensayaron dos circuitos, el primero tomando como base el circuito diseñado por Calderón Sáenz F. (2005). Mostrado en las Fig. (2.15) y (2.16). Pero en lugar de emplear Amplificadores operacionales para la generación de la frecuencia será empleado el Circuito Integrado XR2206 manteniendo los mismos componentes de amplificación de carga y rectificación de señal. Empleando solo dos electrodos.

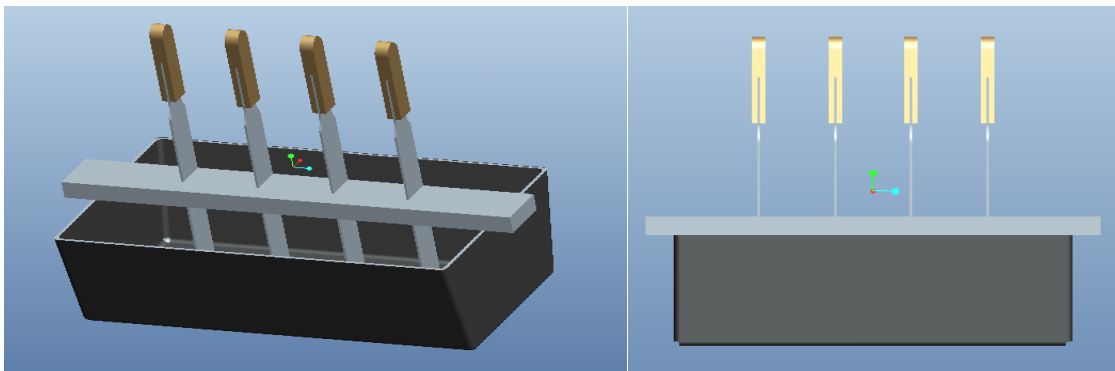
Y el segundo empleando cuatro electrodos, como el descrito en el método Wenner, Fig. (2.9). Alimentando señal atenuada a 19.55 volts y a una frecuencia de 60Hz, inyectada a los dos electrodos extremos, separada una distancia de 7 cm y recogiendo la diferencia de potencial en los electrodos centrales. La señal alterna será rectificada en un puente rectificador y ajustado su valor empleando la última fase del circuito descrito por Calderón (2005).

Para medir la Conductividad de una solución, hacemos pasar la onda de excitación por el electrodo. Este actúa como una resistencia a menor conductividad, mayor resistencia. Luego la hace pasar por una resistencia de medición y se mide el Voltaje encima de la resistencia de carga el cual es directamente proporcional a la corriente, la cual a su vez es directamente proporcional a la Conductividad Eléctrica de la solución que pretendemos medir.

### **3.2 Método de medición de la conductividad eléctrica.**

Para la medición de la CE se introdujeron los electrodos que tenían una distancia de 7 cm entre sí a una profundidad de 5 cm como se muestra en la Fig. (3.3). aplicando un voltaje de entrada de 19.55 volts con el transformador de manera directa sobre una área de 0.0753 m<sup>2</sup> con una cantidad de 2860 grs de suelo.

El mismo procedimiento se siguió para las pruebas en campo en la misma superficie de muestra para humedad tomando en cuenta que todo el suelo estuviera húmedo y se tomo la C.E.



**Fig. 3.3 Diseño en Pro E de barra porta electrodos para pruebas en laboratorio.**

### **3.3 Método de determinación de humedad**

Para la determinación de humedad primero se tuvo que sacar la capacidad de campo la cual se realizó en cuatro recipientes con la misma cantidad de agua que de suelo los cuales se dejaron drenar por 24hrs se pesaron y se metieron a la



estufa por atrás 24 hrs a (100 ° C) y se volvieron a pesar después se determino la humedad con la siguiente fórmula:

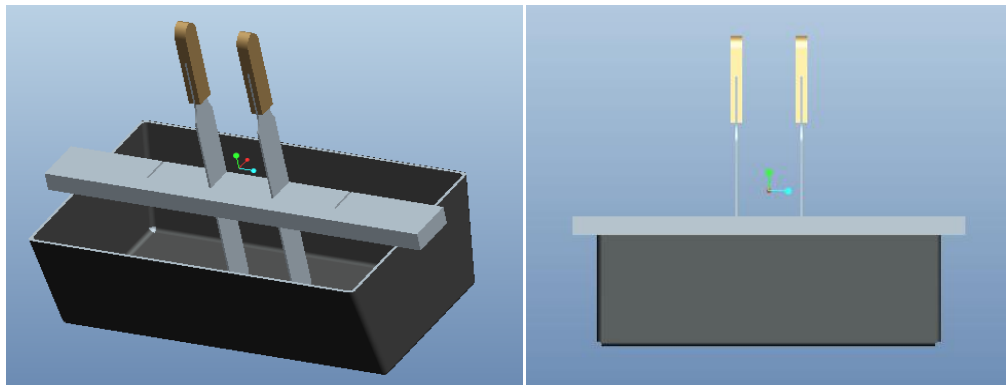
$$\text{Ecuación 3.1} \quad \% \text{Humedad} = \left( \frac{ph - ps}{ps} \right) \times 100$$

Donde

*Ph*: Peso húmedo

*ps*: Peso seco

Para medir la capacitancia del suelo, se humedeció este, con cinco niveles de Humedad tomando como límite superior capacidad de campo y como Límite inferior 5% de humedad. Cada nivel de humedad se aplico a 1500grs en una charola de plástico con una superficie de 13.5 cm x 21.5 cm, mezclando el suelo y el agua en forma uniforme. La medición de la humedad del suelo se hizo empleando electrodos con arreglos como se muestra en la Fig. (3.4).



**Fig. 3.4** Diseño en Pro E de la barra porta electrodos para prueba de humedad

### **3.4 Acondicionamiento de carro porta-sensores para la determinación de humedad y conductividad**

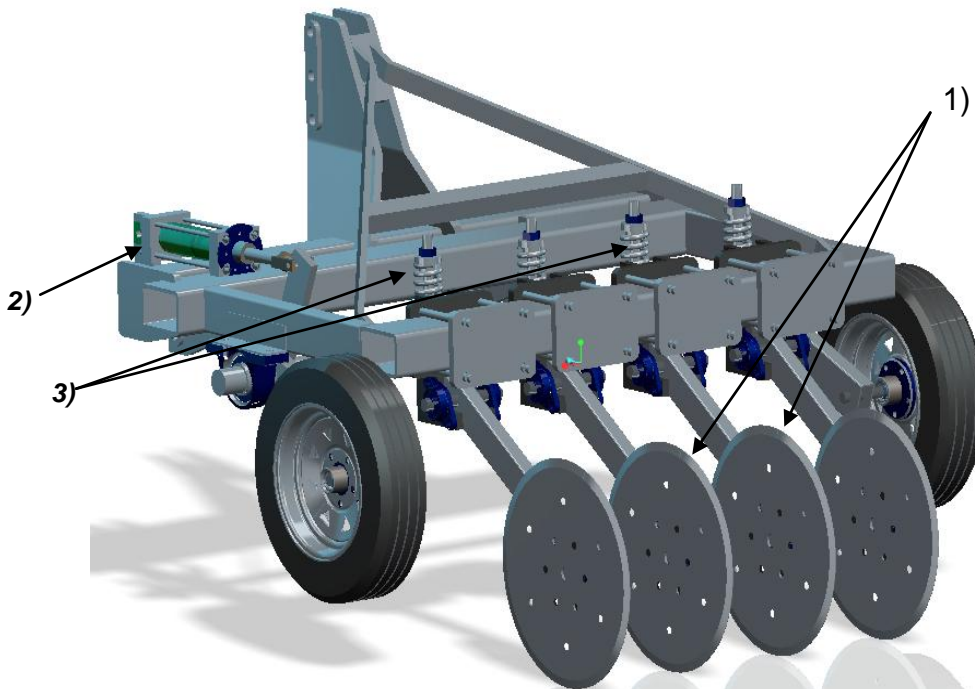
Esto se realizó mediante el empleo de 4 discos cortadores de residuos (diámetro 52 cm) como electrodos. El carro porta sensores se empleara el bastidor del Sub suelo MCC 3/ 5/ 7 donado por la compañía TECNOMEC S.A de C.V mostrado en la Fig. (3.5).



**Fig. 3.5 Bastidor MCC-3/5/7.TECNOMEC S.A de C.V**

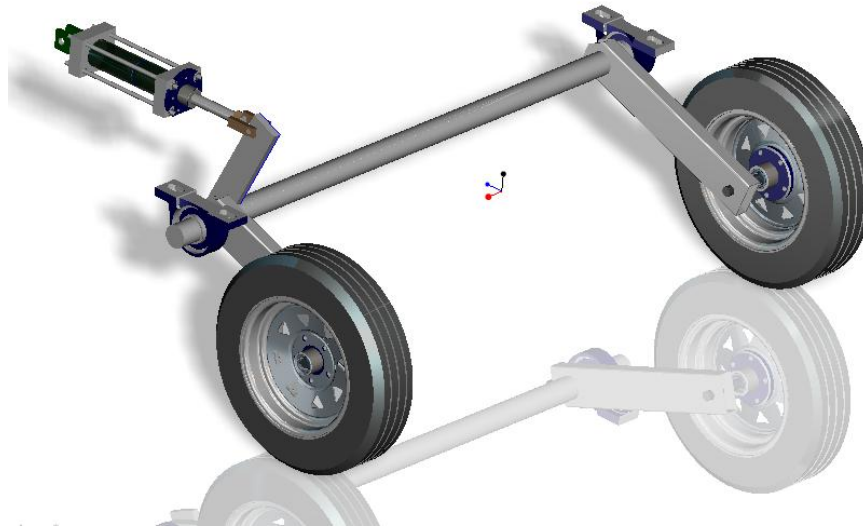
Se modificará el bastidor anterior a un tipo de carro porta sensores semi-remolcado que permita soportar momentos torsionales hasta de 10 kN-m. Como se muestra en la figura (3.6).

- 1) Electrodo para medir humedad y conductividad
- 2) Gato para control de profundidad
- 3) Mecanismo para control de pivoteo de los discos



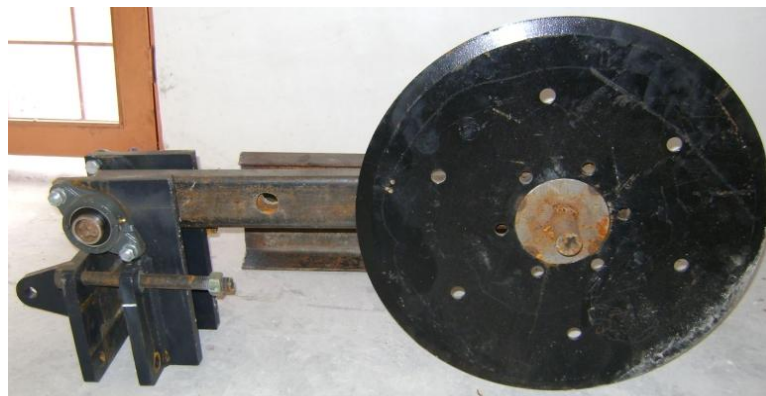
**Fig. 3.6 Diseño en Pro-E del carro porta-sensores.**

Así mismo, con ruedas controladoras de profundidad hasta de 60 cm. En el mecanismo de cuenta con el gato hidráulico como se muestra en la figura 3.7.

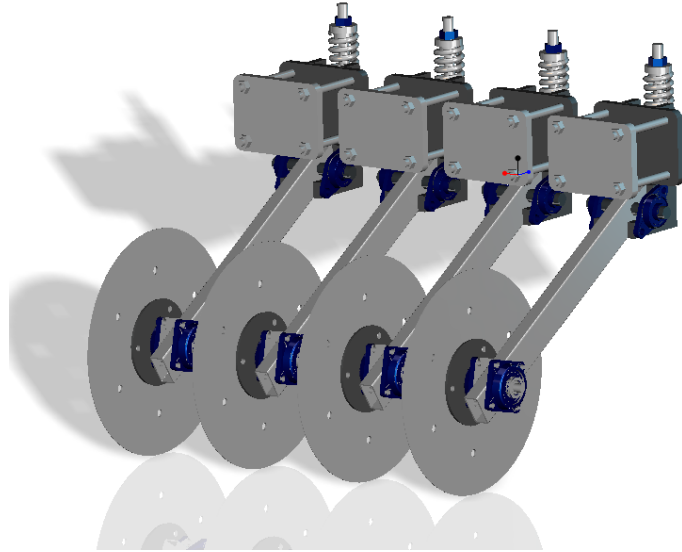


**Fig. 3.7** Diseño en Pro-E del mecanismo de control de profundidad del carro-portasensores.

Las placas que se utilizarán para medir la capacitancia serán los discos cortadores de residuos trabajando a una profundidad de 10 cm. en el suelo Fig. **(3.8)** Los niveles de voltaje aplicados de referencia serán los mismos que se requieran bajo condiciones de laboratorio. Se variaran las distancias entre placas para determinar cuáles son las apropiadas para que nos den lecturas similares obtenidas bajo condiciones de laboratorio. Otra variable será el porcentaje de humedad en el suelo.



**(a)**



(b)

*Fig. 3.8 Disco Cortador de Residuos a) real y b) diseñado en Pro-E*

### **3.5 Acondicionamiento de tractor**

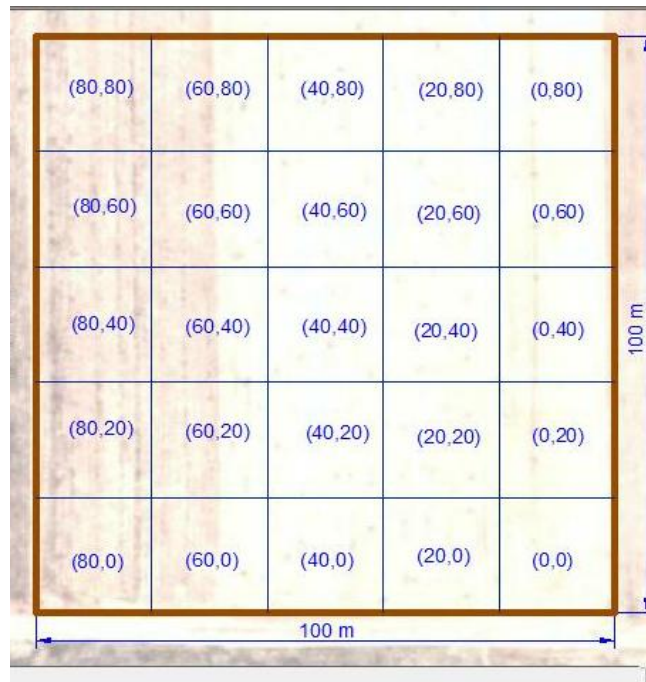
El tractor fue acondicionado para recibir los componentes tales como una computadora el data logger un alimentador de voltaje de C.D a C.A también contará con una asiento extra para un segundo ocupante el cual manipulará el equipo lo que se busca es ampliar la plataforma 60cm para la colocación del asiento y diversos compartimientos para el equipo a utilizar Fig. (3.9).



*Fig. 3.9 Tractor acondicionado*

### 3.6 Realización del mapeo

Para la realización del mapeo utilizaremos el software Gs+ (geoStatistics) en el cual después de obtener los datos de campo nosotros realizaremos el mapa. Conforme a las siguientes coordenadas que se encuentran en la figura 3.10. Se realizó una cuadrícula en una hectárea de terreno dentro de la cual obtuvimos 25 puntos para el muestreo, en el terreno de 100 x 100 metros. Dividimos en 20 en 20 metros para ambos lados.



**Fig. 3.10 Cuadrícula del terreno de evaluación**



### **3.7 Características del campo experimental donde se hizo la evaluación**



**Fig. 3.11 Imagen satelital del campo experimental "NAVIDAD"**

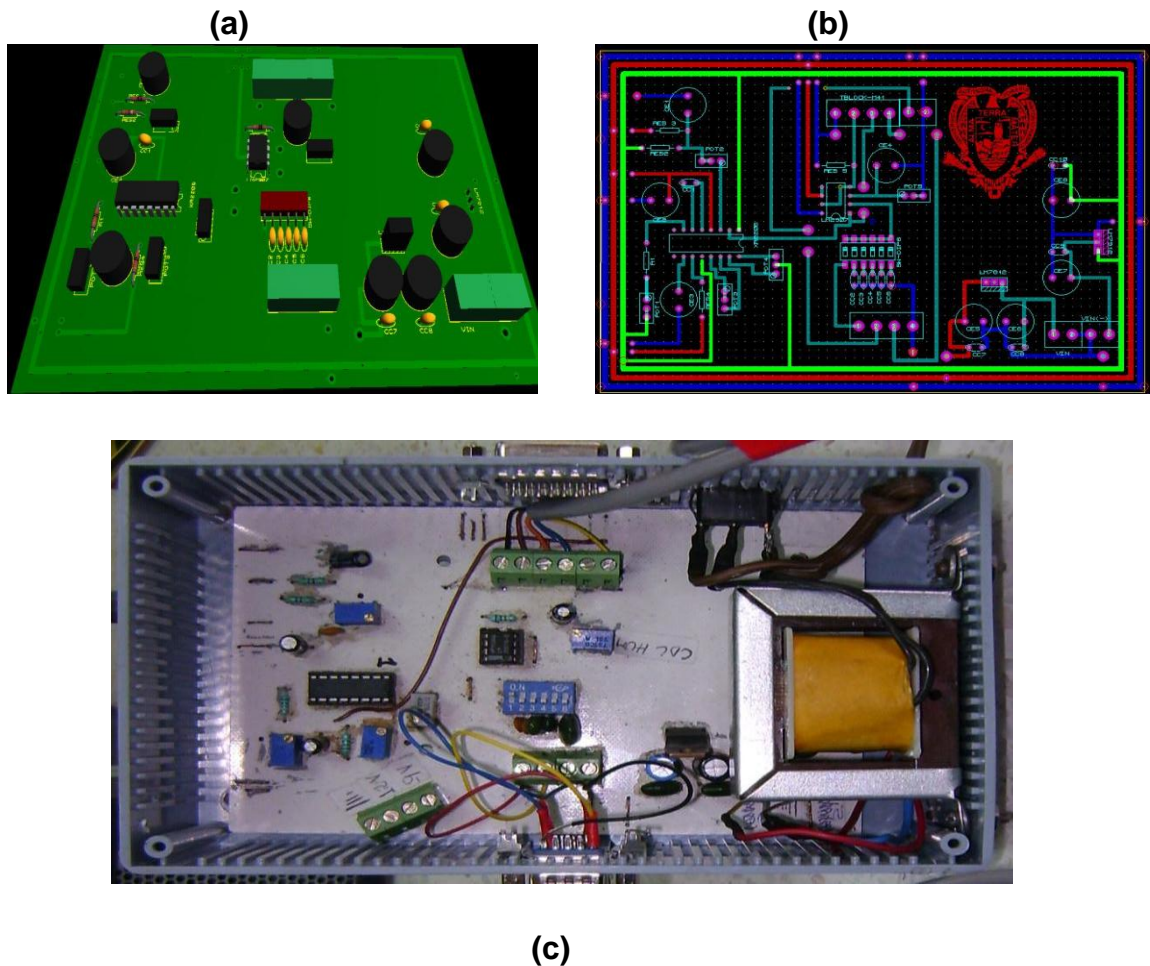
Esta unidad experimental se encuentra en la Colonia Agrícola Navidad, perteneciente al municipio de Galeana, N.L., a 84 km de la ciudad de Saltillo, Coah., por la carretera saltillo-matehuala y se localiza entre las coordenadas geográficas 25° 04" de latitud norte y 100° 37" de longitud oeste; y a una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

Las características del suelo es textura de migajón areno-limoso, con un pH alcalino (7.8 - 8.0) con alto contenido de materia orgánica, pobres en nitrógeno total, muy bajos en fósforo, con suficiente potasio intercambiable, pero muy bajos en hierro aprovechable y magnesio intercambiable; con una C.I.C. mediana.

Cuenta con dos pozos profundos con un gasto total de 70 lts/seg; el agua está clasificada como de calidad condicionada, la cual contiene alta salinidad y bajo contenido de sodio.

#### IV. RESULTADOS

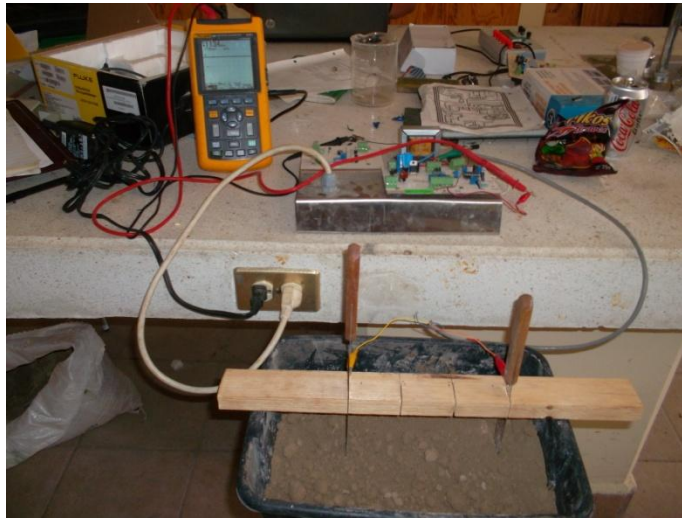
Para lograr los objetivos planteados se construyeron los circuitos electrónicos los cuales se muestran en la Fig. (4.1), estos fueron elaborados en Ares 7 profesional (proteus) se muestran tanto los diagramas en 3D (a), esquemático (b) y real (c) del equipo electrónico para medir la capacitancia y C.E. tomando como base los C.I. XR2206 y LM2907 cuyas características se encuentran en los anexos 1.



**Fig. 4.1** Diagrama de circuitos electrónicos desarrollados, para medir C.E y capacitancia

#### **4.1 Resultados de pruebas realizadas en el campo para humedad del suelo.**

En la Fig. 4.2 Se muestran los equipos empleados donde se llevó a cabo las pruebas para la determinación de la humedad del suelo y revisión del comportamiento con respecto a las distintas humedades dentro del laboratorio y determinar las ecuaciones de respuesta para cada capacitor.



**Fig. 4.2 Equipo utilizado para la determinación de la humedad.**

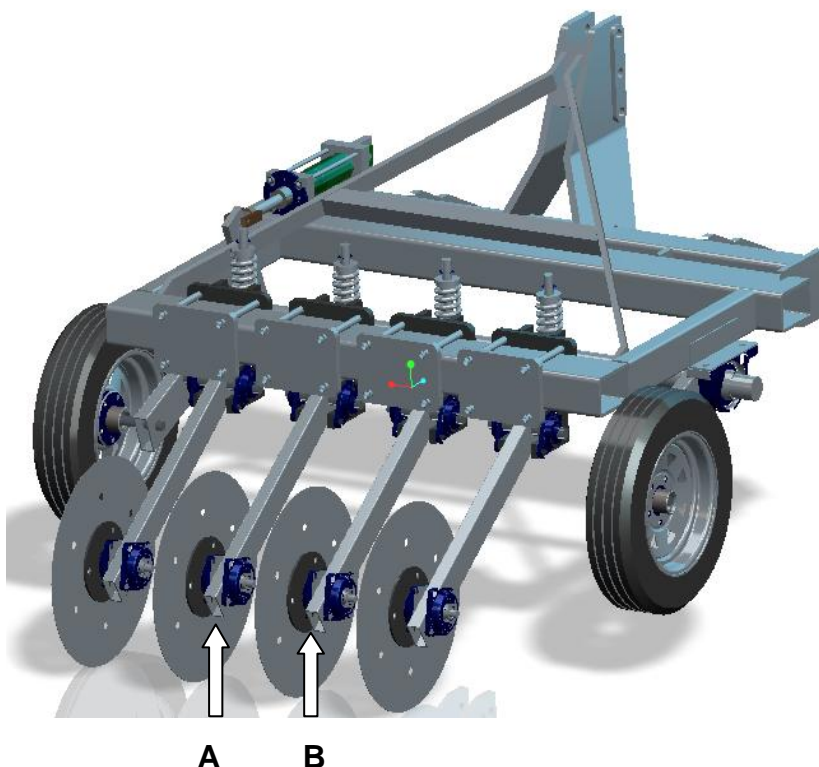
**Cuadro 4.1** Resultados en (mV) con diferentes niveles de humedad con diferentes capacitores en laboratorio.

| % de humedad | capacitor 151 mV | capacitor 102 mV | capacitor 103 mV |
|--------------|------------------|------------------|------------------|
| 1.3          | 22.1             | 67.2             | 96.7             |
| 13.2         | 29               | 136.6            | 785              |
| 22.3         | 34.8             | 210              | 1940             |
| 30           | 38.5             | 230              | 2101             |



En la figura 4.3 observamos las ubicaciones de los electrodos utilizados para la determinación de la humedad en campo para cada capacitor. La cual nos muestra la configuración correspondiente:

- A) Contiene una chumacera de plástico donde inyectamos el valor (+)
- B) Contiene una chumacera de metal donde inyectamos el valor (-)



**Fig. 4.3** Aplicación del voltaje para determinar la humedad en campo.

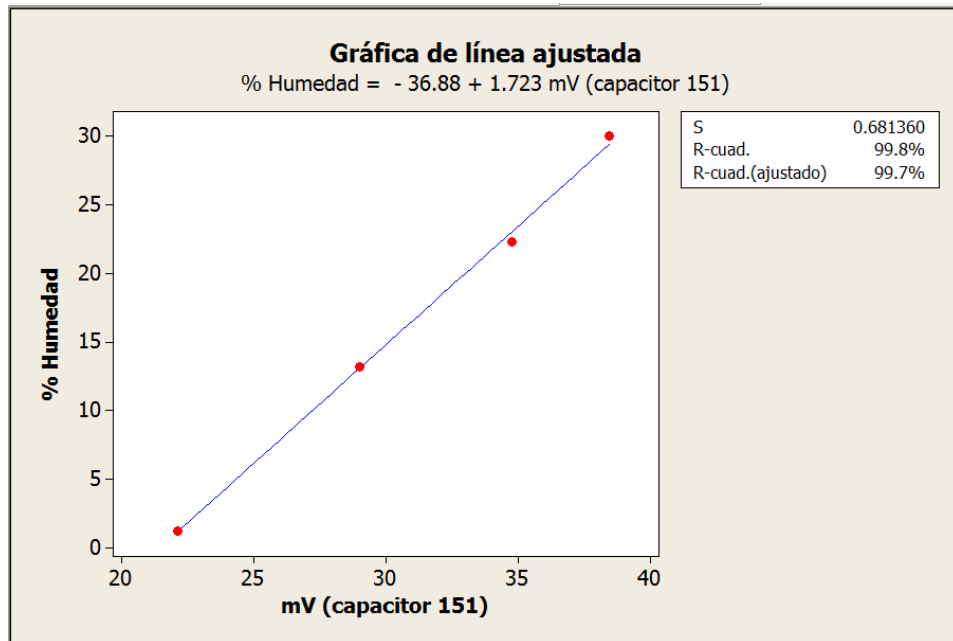
#### 4.1.1 Análisis del capacitor 151

**Cuadro 4.2** Análisis de varianza de humedad en (mV) con capacitor 151

| Fuente       | GL       | SC            | CM      | F      | P     |
|--------------|----------|---------------|---------|--------|-------|
| Regresión    | 1        | 456.731       | 456.731 | 983.80 | 0.001 |
| Error        | 2        | 0.929         | 0.464   |        |       |
| <b>total</b> | <b>3</b> | <b>457.66</b> |         |        |       |

GL- Grados de libertad, SC.- Suma de cuadrados, CM.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

**Ecuación 4.1**      % de humedad =  $-36.88 + 1.723 Mv$  (Capacitor 151)  
 $S = 0.681360$     $R\text{-cuad.} = 99.8\%$     $R\text{-cuad. (Ajustada)} = 99.7\%$



**Fig. 4.4** Curva de respuesta de humedad en (mV) del capacitor 151

En el cuadro 4.3 Se muestran los resultados de campo utilizando el capacitor 151 en mV y en el cuadro 4.4 se muestra los resultados de humedad los cuales vamos a utilizar para realizar el mapeo.

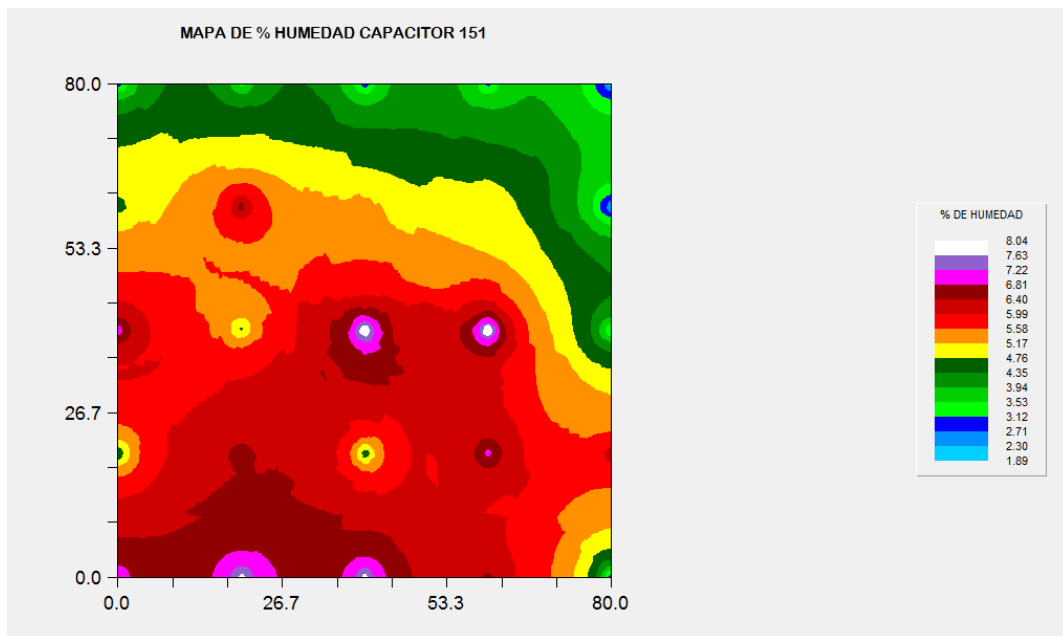
**Cuadro 4.3** resultados de campo en (mV) para el capacitor 151

| Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 0,0   | 25.6 | 1,0   | 26   | 2,0   | 26   | 3,0   | 25.2 | 4,0   | 22.9 |
| 0,1   | 23.8 | 1,1   | 25.2 | 2,1   | 23.8 | 3,1   | 25.5 | 4,1   | 25.1 |
| 0,2   | 25.6 | 1,2   | 24   | 2,2   | 26.3 | 3,2   | 26.4 | 4,2   | 23   |
| 0,3   | 24   | 1,3   | 25.4 | 2,3   | 24.6 | 3,3   | 24.4 | 4,3   | 22.5 |
| 0,4   | 23   | 1,4   | 23.3 | 2,4   | 23   | 3,4   | 23.1 | 4,4   | 22.5 |

**Cuadro 4.4** resultados de % de humedad para el capacitor 151

| X,Y  | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) |
|------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
| 0,0  | 7.2288            | 20,0  | 7.918             | 40,0  | 7.918             | 60,0  | 6.5396            | 80,0  | 2.5767            |
| 0,20 | 4.1274            | 20,20 | 6.5396            | 40,20 | 4.1274            | 60,20 | 7.0565            | 80,20 | 6.3673            |
| 0,40 | 7.2288            | 20,40 | 4.472             | 40,40 | 8.4349            | 60,40 | 8.6072            | 80,40 | 2.749             |
| 0,60 | 4.472             | 20,60 | 6.8842            | 40,60 | 5.5058            | 60,60 | 5.1612            | 80,60 | 1.8875            |
| 0,80 | 2.749             | 20,80 | 3.2659            | 40,80 | 2.749             | 60,80 | 2.9213            | 80,80 | 1.8875            |

En la figura 4.5 se muestra la generación del mapa para el capacitor 151 con los resultados de humedad para ese capacitor.



**Fig. 4.5** mapa de % de humedad para el capacitor 151

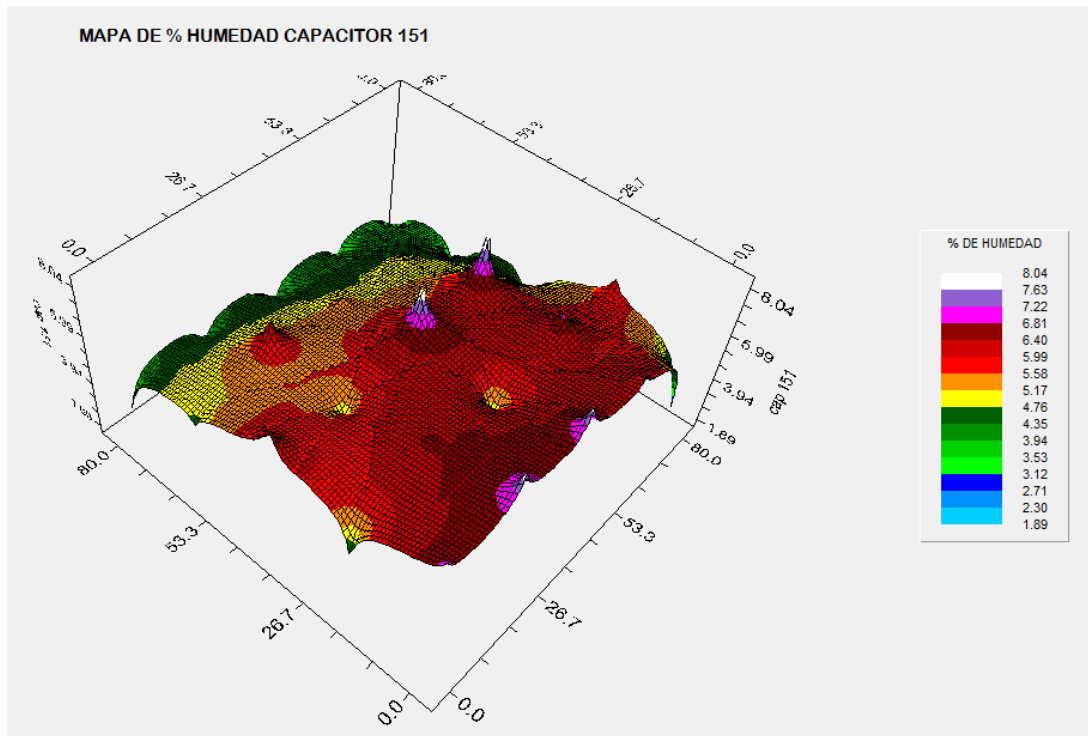


Fig. 4.6 mapa 3D de % de humedad para el capacitor 151

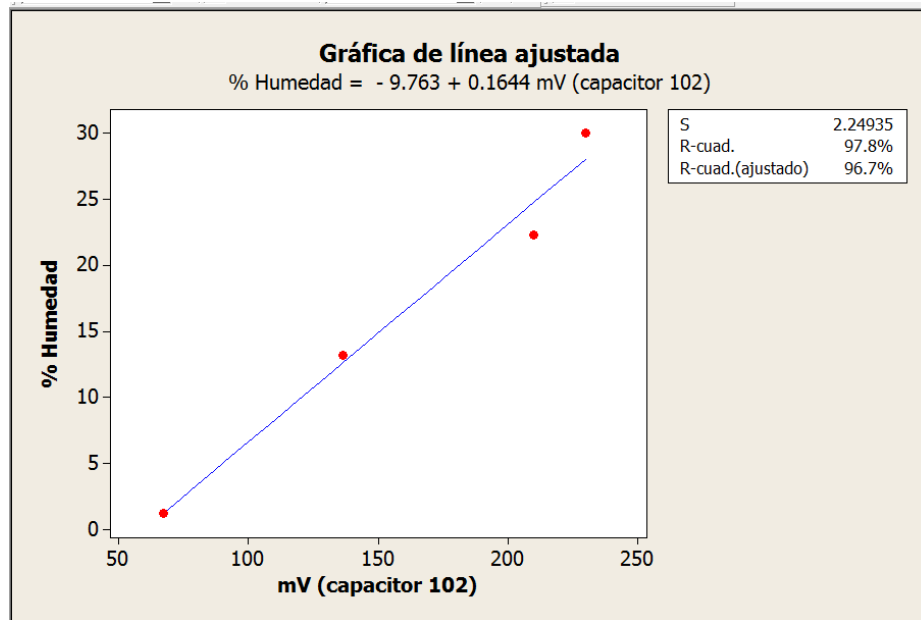
#### 4.1.2 Análisis del capacitor 102

Cuadro 4.5 Análisis de varianza de humedad en (mV) con capacitor 102

| Fuente    | GL | SC      | CM      | F     | P     |
|-----------|----|---------|---------|-------|-------|
| Regresión | 1  | 447.541 | 447.541 | 88.45 | 0.011 |
| Error     | 2  | 10.119  | 5.060   |       |       |
| total     | 3  | 457.66  |         |       |       |

GL- Grados de libertad, SC.- Suma de cuadrados, CM.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

**Ecuación 4.2**                      % de humedad =  $-9.763 + 0.1644 \text{ mV (Capacitor 102)}$   
 $S = 2.24935$      $R\text{-cuad.} = 97.8\%$      $R\text{-cuad. (Ajustada)} = 96.7\%$



**Fig. 4.7** Curva de respuesta de humedad en (mV) del capacitor 102

En el **cuadro 4.6** Se muestran los resultados de campo utilizando el capacitor 102 en mV y en el **cuadro 4.7** se muestra los resultados de humedad los cuales vamos a utilizar para realizar el mapeo.

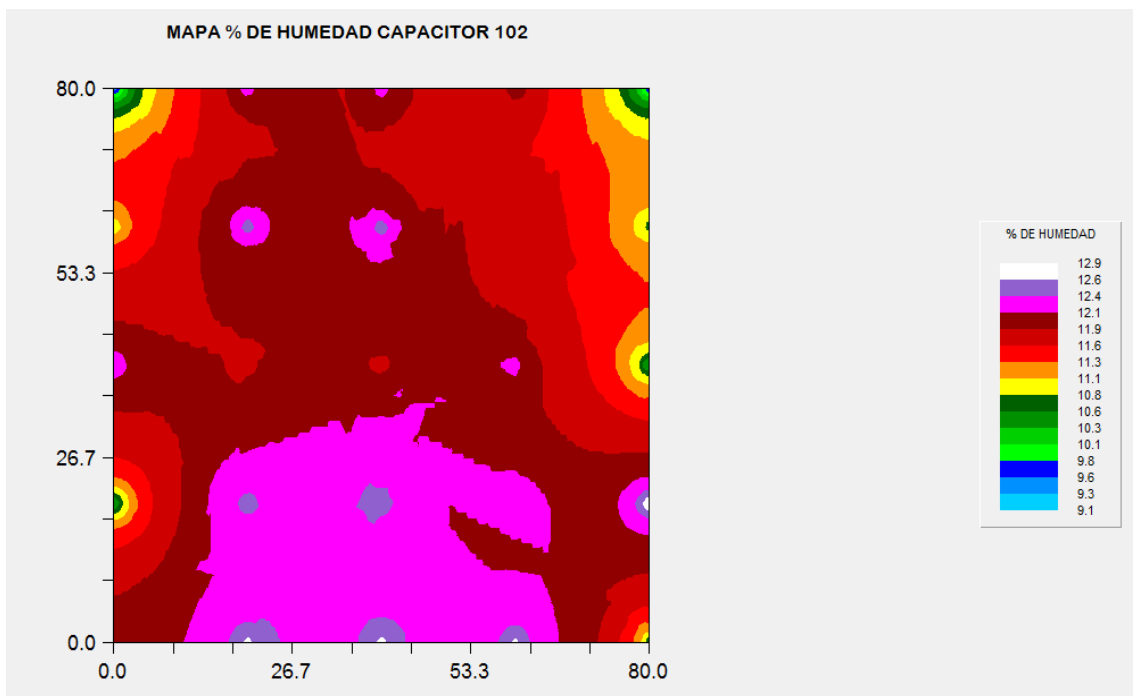
**Cuadro 4.6** resultados de campo en (mV) para el capacitor 102

| Punto | mV    | Punto | mV    | Punto | mV    | Punto | mV    | Punto | mV    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,0   | 132   | 1,0   | 136.9 | 2,0   | 123   | 3,0   | 136.7 | 4,0   | 123.5 |
| 0,1   | 120.8 | 1,1   | 136   | 2,1   | 131   | 3,1   | 134   | 4,1   | 138.3 |
| 0,2   | 135   | 1,2   | 130.4 | 2,2   | 137   | 3,2   | 134   | 4,2   | 120.7 |
| 0,3   | 125.2 | 1,3   | 136.1 | 2,3   | 131.3 | 3,3   | 130   | 4,3   | 124   |
| 0,4   | 114.6 | 1,4   | 134.5 | 2,4   | 126   | 3,4   | 133   | 4,4   | 116   |

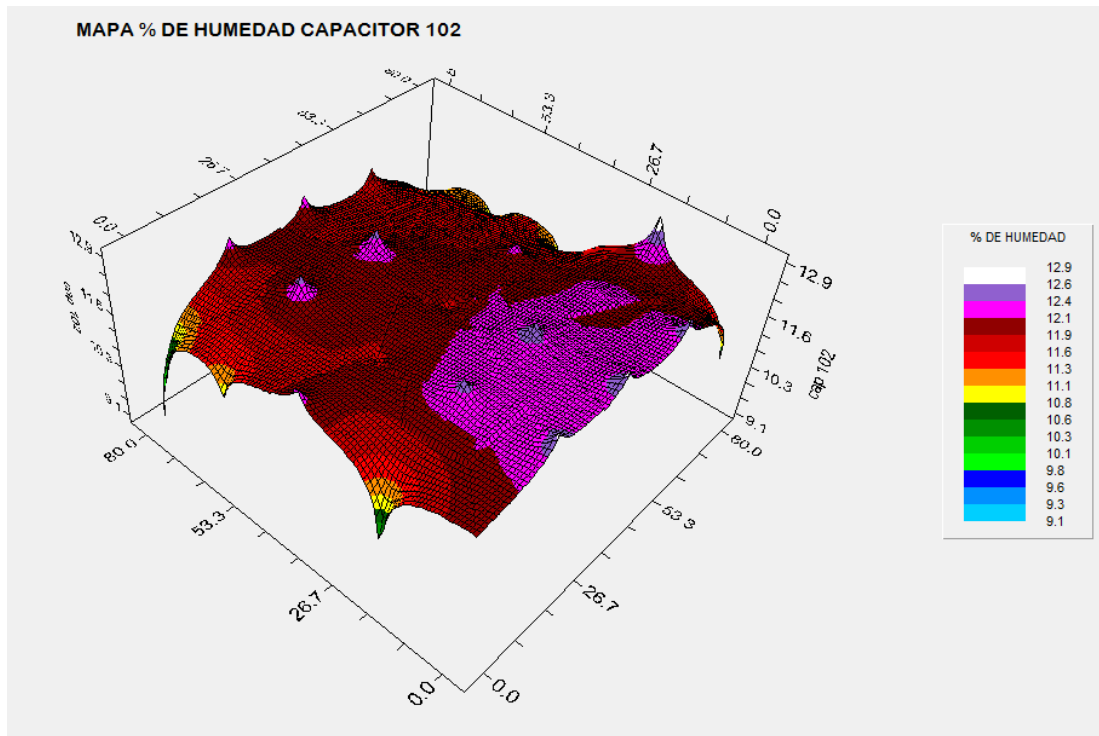
**Cuadro 4.7** resultados de % de humedad para el capacitor 102

| X,Y  | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) |
|------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|
| 0,0  | 11.9378                 | 20,0  | 12.74336                | 40,0  | 12.74336                | 60,0  | 12.71048                | 80,0  | 10.5404                 |
| 0,20 | 10.09652                | 20,20 | 12.5954                 | 40,20 | 12.5954                 | 60,20 | 12.2666                 | 80,20 | 12.97352                |
| 0,40 | 12.431                  | 20,40 | 11.67476                | 40,40 | 11.67476                | 60,40 | 12.2666                 | 80,40 | 10.08008                |
| 0,60 | 10.81988                | 20,60 | 12.61184                | 40,60 | 12.61184                | 60,60 | 11.609                  | 80,60 | 10.6226                 |
| 0,80 | 9.07724                 | 20,80 | 12.3488                 | 40,80 | 12.3488                 | 60,80 | 12.1022                 | 80,80 | 9.3074                  |

En la figura 4.8 se muestra la generación del mapa para el capacitor 102 con los niveles de humedad.



**Fig. 4.8** mapa de % de humedad para el capacitor 102



**Fig. 4.9** mapa de % de humedad para el capacitor 102

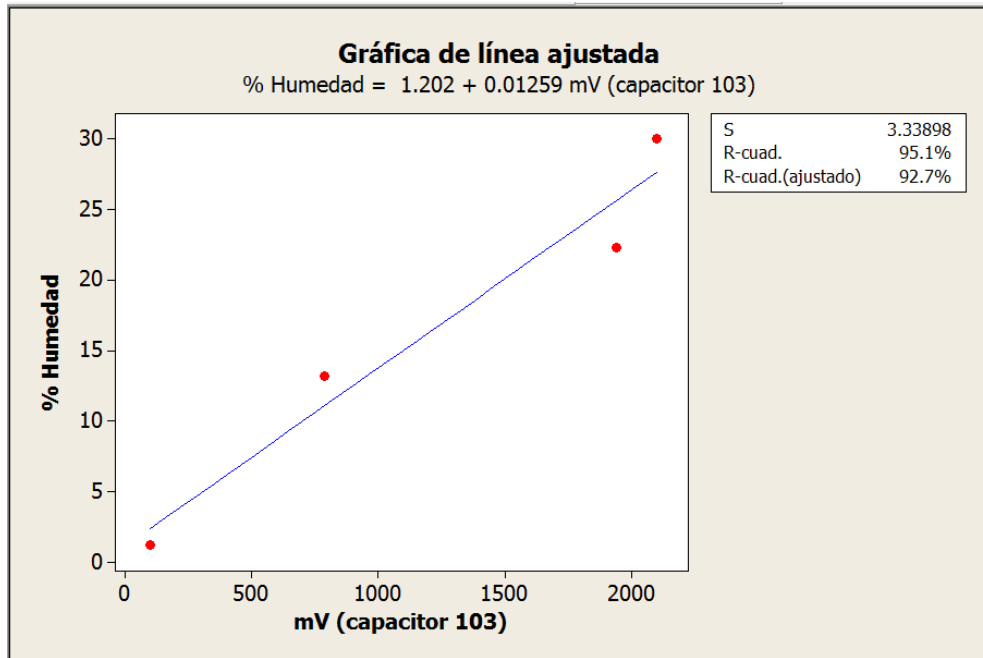
### 4.1.3 Análisis del capacitor 103

**Cuadro 4.8** Análisis de varianza de humedad en (mV) con capacitor 103

| Fuente    | GL | SC      | CM      | F     | P     |
|-----------|----|---------|---------|-------|-------|
| Regresión | 1  | 435.362 | 435.362 | 39.05 | 0.025 |
| Error     | 2  | 22.298  | 11.149  |       |       |
| total     | 3  | 457.66  |         |       |       |

GL- Grados de libertad, SC.- Suma de cuadrados, CM.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

**Ecuación 4.3**      % de humedad = 1.202 + 0.01259 mV (Capacitor 103)  
 $S = 3.33898$   $R\text{-cuad.} = 95.1\%$   $R\text{-cuad. (Ajustada)} = 92.7\%$



**Fig. 4.10** Curva de respuesta de humedad en (mV) del capacitor 103

En el cuadro 4.9 Se muestran los resultados de campo utilizando el capacitor 103 en mV y en el cuadro 4.10 se muestra los resultados de humedad los cuales vamos a utilizar para realizar el mapeo.

**Cuadro 4.9** resultados de campo en (mV) para el capacitor 103

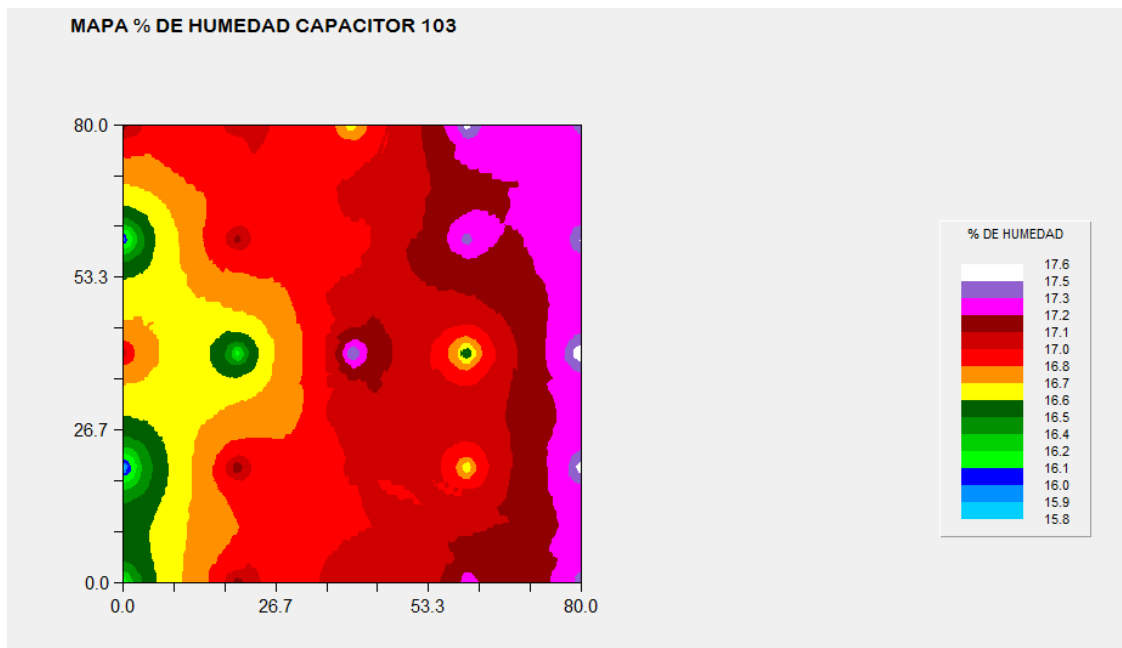
| Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 0,0   | 1185 | 1,0   | 1270 | 2,0   | 1260 | 3,0   | 1280 | 4,0   | 1290 |
| 0,1   | 1148 | 1,1   | 1275 | 2,1   | 1256 | 3,1   | 1220 | 4,1   | 1300 |
| 0,2   | 1260 | 1,2   | 1180 | 2,2   | 1300 | 3,2   | 1200 | 4,2   | 1307 |
| 0,3   | 1160 | 1,3   | 1270 | 2,3   | 1245 | 3,3   | 1290 | 4,3   | 1294 |
| 0,4   | 1270 | 1,4   | 1260 | 2,4   | 1220 | 3,4   | 1300 | 4,4   | 1287 |



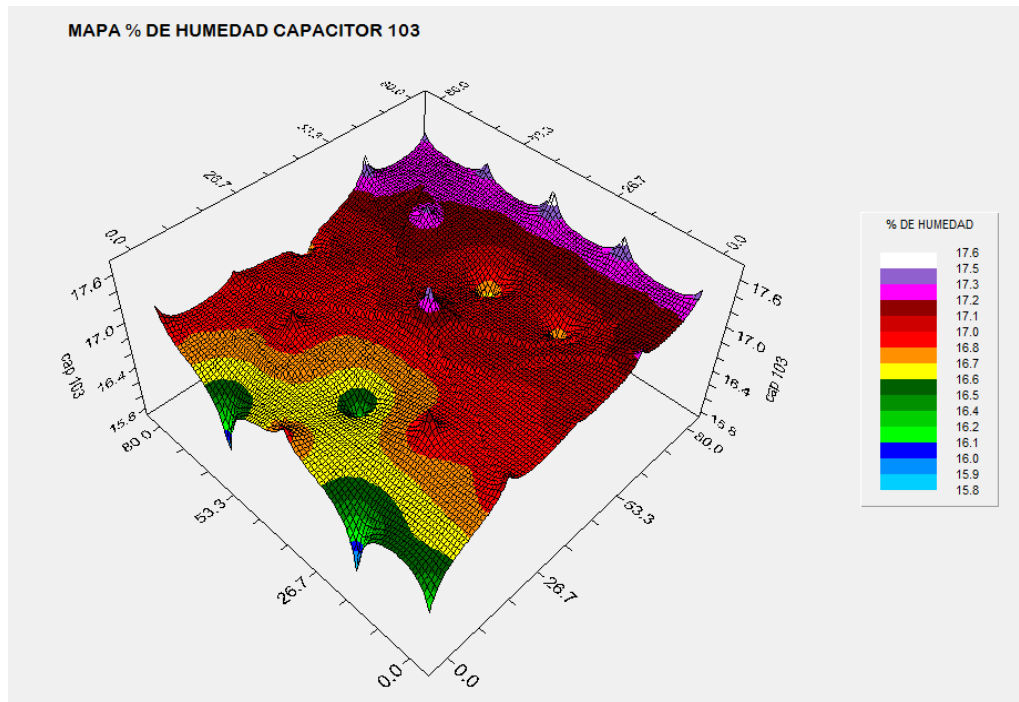
**Cuadro 4.10** resultados de % de humedad para el capacitor 103

| X,Y  | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) | X,Y   | % humedad Z(10cm) |
|------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
| 0,0  | 16.12115          | 20,0  | 17.1913           | 40,0  | 17.0654           | 60,0  | 17.3172           | 80,0  | 17.4431           |
| 0,20 | 15.65532          | 20,20 | 17.25425          | 40,20 | 17.01504          | 60,20 | 16.5618           | 80,20 | 17.569            |
| 0,40 | 17.0654           | 20,40 | 16.0582           | 40,40 | 17.569            | 60,40 | 16.31             | 80,40 | 17.65713          |
| 0,60 | 15.8064           | 20,60 | 17.1913           | 40,60 | 16.87655          | 60,60 | 17.4431           | 80,60 | 17.49346          |
| 0,80 | 17.1913           | 20,80 | 17.0654           | 40,80 | 16.5618           | 60,80 | 17.569            | 80,80 | 17.40533          |

En la figura 4.11 se muestra la generación del mapa para el capacitor 103 con los niveles de humedad.



**Fig. 4.11** mapa de % de humedad para el capacitor 103



**Fig. 4.12** mapa 3D de % de humedad para el capacitor 103

#### **4.2 Resultado de pruebas realizadas en el campo para conductividad eléctrica.**

En la Fig.4.13 Se muestran los equipos empleados donde se llevó a cabo las pruebas para la determinación de la conductividad eléctrica y revisión del comportamiento con respecto a las distintas humedades en campo.



**Fig. 4.13** Equipo utilizado para medir la conductividad eléctrica.

En el cuadro 4.11, Se muestran los resultados de conductividad eléctrica con 4 diferentes % de humedad con la finalidad de obtener el comportamiento del suelo durante la aplicación del voltaje.

**Cuadro 4.11** Cuadro de resultados de conductividad eléctrica.

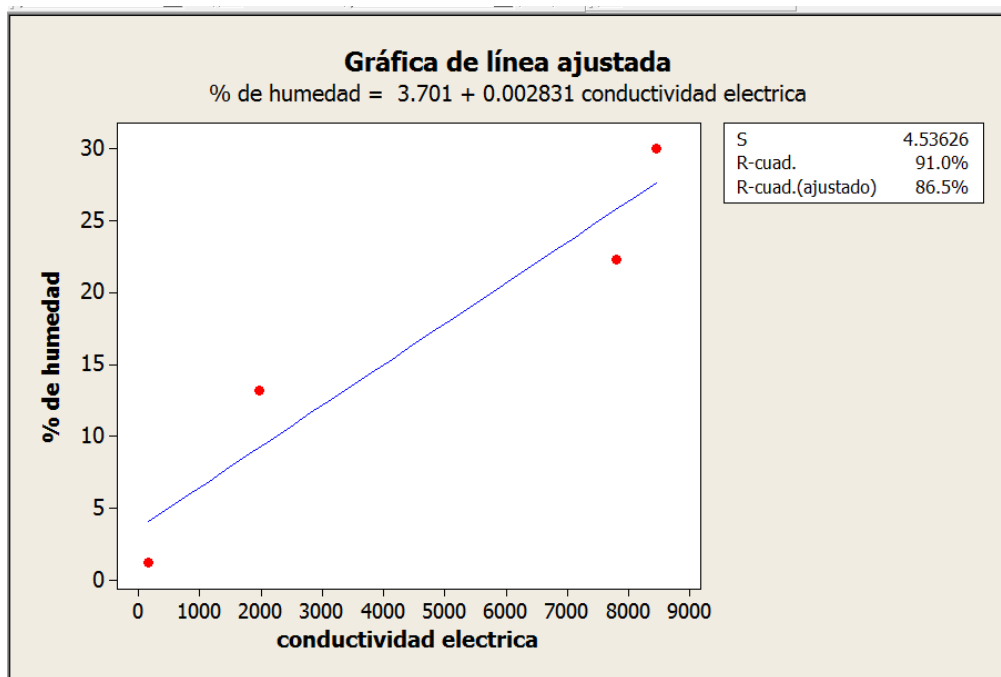
| <b>% de Humedad</b> | <b>entrada elec-externos</b> | <b>Salida elec-internos</b> |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1                   | 19.55                        | 145                         |
| 13                  | 19.55                        | 1960                        |
| 22                  | 19.55                        | 7800                        |
| 30                  | 19.55                        | 8460                        |

**Cuadro 4.12** Análisis de varianza del comportamiento de respuesta de la prueba para conductividad eléctrica.

| Fuente    | GL | SC      | CM      | F     | P     |
|-----------|----|---------|---------|-------|-------|
| Regresión | 1  | 416.505 | 416.505 | 20.24 | 0.046 |
| Error     | 2  | 41.155  | 20.578  |       |       |
| Total     | 3  | 457.66  |         |       |       |

Df.- Grados de libertad, Ss.- Suma de cuadrados, Ms.- Cuadrado medio, F.- factor F, P.-Probabilidad

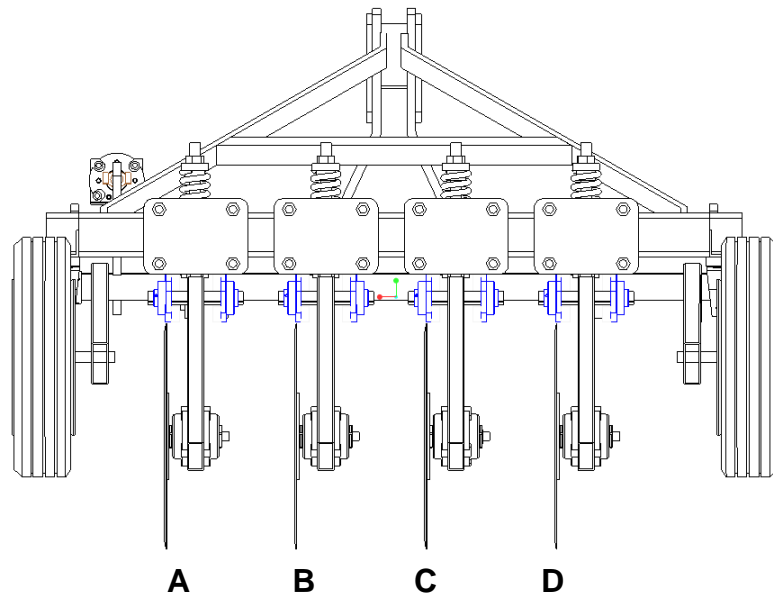
**Ecuación 4.4**      % de Humedad = 3.425 + 2.846 Conductividad Eléctrica  
 $S = 4.53626$      $R\text{-cuad.} = 91.0\%$      $R\text{-cuad. (Ajustada)} = 86.5\%$



**Fig. 4.14** Curva de respuesta del comportamiento de la conductividad eléctrica

En la figura 4.15 observamos la forma de aplicación de voltaje a los electrodos para la determinación de la conductividad eléctrica. La cual nos muestra la configuración correspondiente:

- A)** *Contiene una chumacera de plástico donde inyectamos el valor (+)*
- B)** *Contiene una chumacera de plástico donde recibimos el valor (+) conducido por el suelo.*
- C)** *Contiene una chumacera de metal donde recibimos el valor (-).*
- D)** *Contiene una chumacera de metal donde inyectamos el valor (-)*



**Fig. 4.15 configuración de los electrodos para la determinación de la Conductividad eléctrica.**

En el cuadro 4.13 Se muestran los resultados de campo de la conductividad eléctrica en mV y en el cuadro 4.14 se muestra los resultados de conductividad eléctrica del suelo los cuales vamos a utilizar para realizar el mapeo.

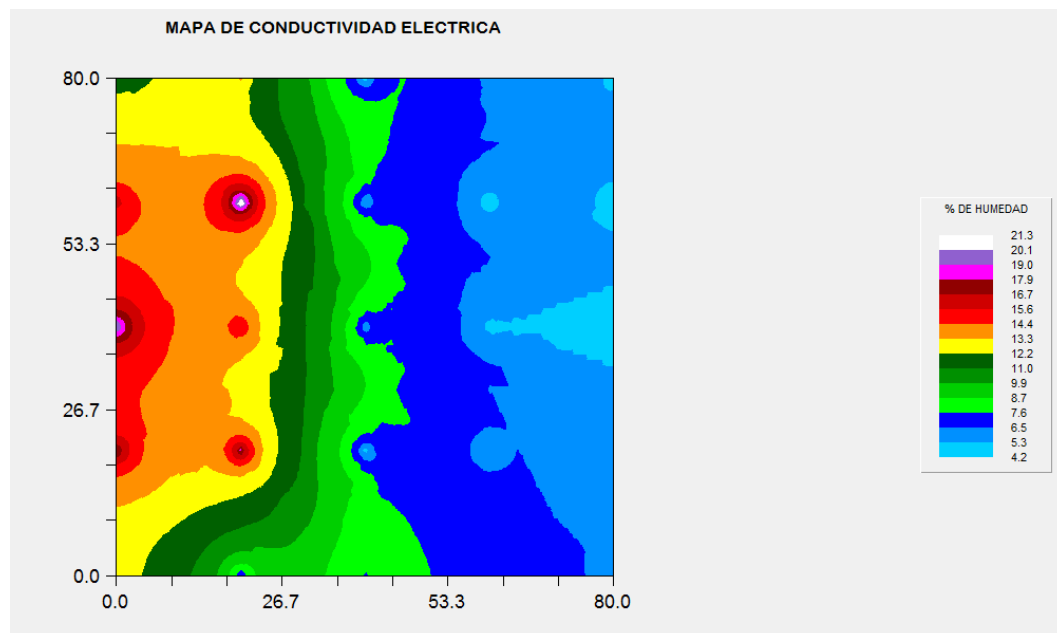
**Cuadro 4.13** resultados de campo en (mV) para conductividad eléctrica.

| Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV   | Punto | mV  |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-----|
| 0,0   | 3300 | 1,0   | 950  | 2,0   | 950  | 3,0   | 1190 | 4,0   | 760 |
| 0,1   | 5130 | 1,1   | 5300 | 2,1   | 5300 | 3,1   | 560  | 4,1   | 550 |
| 0,2   | 6100 | 1,2   | 4400 | 2,2   | 4400 | 3,2   | 358  | 4,2   | 210 |
| 0,3   | 4500 | 1,3   | 6600 | 2,3   | 6600 | 3,3   | 127  | 4,3   | 119 |
| 0,4   | 2700 | 1,4   | 3500 | 2,4   | 3500 | 3,4   | 761  | 4,4   | 270 |

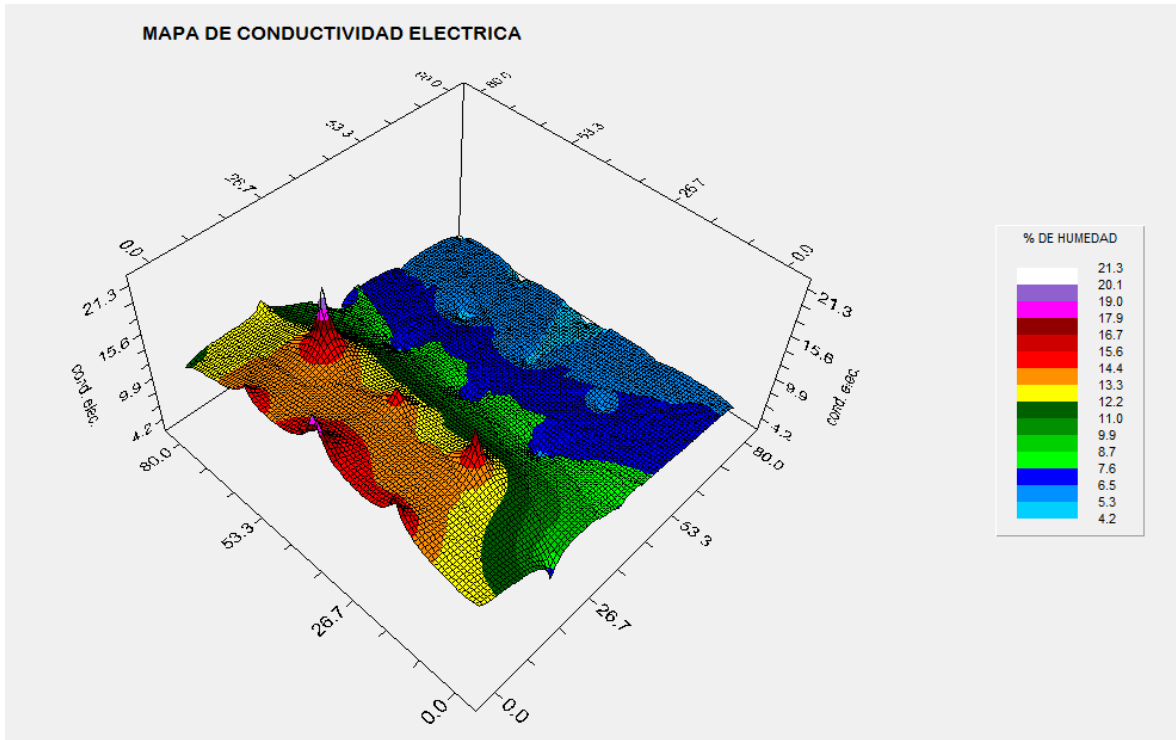
**Cuadro 4.14** resultados de conductividad eléctrica

| X,Y  | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) | X,Y   | %<br>humedad<br>Z(10cm) |
|------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|
| 0,0  | 13.0433                 | 20,0  | 6.39045                 | 40,0  | 7.3813                  | 60,0  | 7.06989                 | 80,0  | 5.85256                 |
| 0,20 | 18.22403                | 20,20 | 18.7053                 | 40,20 | 4.5503                  | 60,20 | 5.28636                 | 80,20 | 5.25805                 |
| 0,40 | 20.9701                 | 20,40 | 16.1574                 | 40,40 | 5.453389                | 60,40 | 4.714498                | 80,40 | 4.29551                 |
| 0,60 | 16.4405                 | 20,60 | 22.3856                 | 40,60 | 5.006091                | 60,60 | 4.060537                | 80,60 | 4.037889                |
| 0,80 | 11.3447                 | 20,80 | 13.6095                 | 40,80 | 4.589934                | 60,80 | 5.855391                | 80,80 | 4.46537                 |

En la figura 4.16 se muestra la generación del mapa para la conductividad eléctrica respecto a los distintos niveles de humedad.



**Fig. 4.16** mapa de conductividad eléctrica



**Fig. 4.17** mapa 3D de conductividad eléctrica

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Se lograron los objetivos específicos planteados en el presente trabajo se terminó otra fase del proyecto **“DESARROLLO DE EQUIPOS, SENSORES E INSTRUMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y LABRANZA DE CONSERVACIÓN”** que fue tener los mapas para % de humedad y conductividad del suelo, y se obtuvieron datos relevantes a través del diseño de los circuitos electrónicos para poder medir en forma confiable la permisividad eléctrica del suelo en forma dinámica.

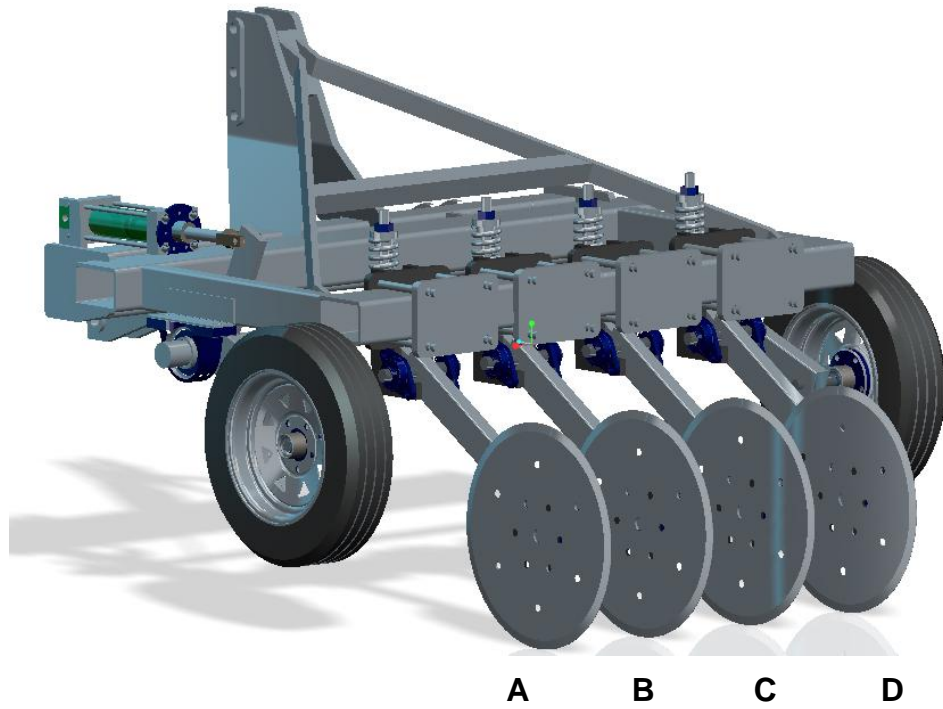
1. Se acondicionó el carro-portasensores con cilindro hidráulico para controlar la profundidad de los discos cortadores de residuos en un rango de 15 a 20 cm.
2. Se construyeron los cuatro electrodos, con discos cortadores de residuos de 52 cm de diámetro y se diseñó el sistema de pivoteo; así como, el aislamiento de los discos para inyectar el voltaje.
3. En la medición de la humedad en campo obtuvimos mejor respuesta con el capacitor 102 pF el cual presenta una excelente curva de respuesta con una correlación superior del 95%. Obteniendo un mapa con un porcentaje de humedad entre 9 y 13% en el terreno de evaluación.
4. La ecuación de respuesta de conductividad eléctrica, con respecto a la humedad del suelo, se tiene una correlación superior al 90% mostrada en el mapa de conductividad eléctrica respectivo.



## **5.2 Recomendaciones**

De acuerdo con los resultados obtenidos existe una alta confiabilidad de los datos para medir la humedad del suelo, sin embargo se tiene que afinar el circuito para medir la C.E bajo condiciones de campo para lo cual se recomienda lo siguiente:

1. Para obtener una mejor curva de respuesta en la C.E de las sales con diferentes concentraciones, se requieren terminar de desarrollar el circuito electrónico con diferentes niveles de voltaje y diferentes frecuencias.
2. Se requiere conectar el circuito electrónico de conductividad eléctrica y humedad al daqbook 200 para almacenar estos valores en un archivo de datos.
3. Se requiere diseñar un circuito que permita eliminar los posibles ruidos magnéticos durante el almacenamiento de la información.
4. La recomendación para la forma de aplicación de voltaje a los electrodos para la determinación de la humedad y conductividad eléctrica de manera dinámica está dada por la siguiente configuración mostrada en la figura:
  - A)** *Colocar una chumacera de plástico donde inyectamos el valor (+) para conductividad.*
  - B)** *Colocar una chumacera de plástico donde recibimos el valor (+) conducido por el suelo para conductividad.*
  - C)** *Colocar una chumacera de metal donde inyectamos el valor (-).*
  - D)** *Contiene una chumacera de plástico donde inyectamos el valor (+) para humedad del suelo.*



***Fig. 5.1 Recomendación de la configuración de los electrodos para obtener resultados de conductividad y humedad del suelo de manera dinámica.***

## VI. LITERATURA CITADA

✚ Adriaanse, A. 1993. Environmental Policy Performance Indicators. A Study on the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach, The Netherlands.

✚ Arshad, M.A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. American J. of Alternative Agriculture 7: 25-31.

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

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

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

✚ Buol, S. W. 1995. Sustainability of soil use. Annual Review of Ecology and Systematic 26:25-44.

✚ Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En Soil quality for crop production and ecosystem health (eds

✚ Corwin, D.L. and J.D. Rhoades: << Determining soil electrical conductivity using an inductive electromagnetic soil conductivity meter>>, Soil Sci. Soc.

Amer.J., 45:255-260, 1981.

✚ Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

✚ Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington DC, USA.

✚ Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.

✚ Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M. y Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian J. of Soil Science 74: 367-386.

✚ Goodland, R. y H. Daly. 1996. Environmental sustainability: universal and non negotiable. Ecological Applications 6:1002-1017.

✚ Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.

✚ Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J. 61: 4-10.

✚ Larson, W.E. y Pierce, F.J. 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. In Evaluation for sustainable land management in the developing world. En Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai. pp. 175-203. 15-21 Sept. 1991. Int. Board of Soil

Res. and Manage., Bangkok, Thailand.

✚ Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B. y Meyer, R.E. 1992. Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. American J. of Alternative Agriculture 7: 5-11.

✚ Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

✚ Queshuayllo. C .W.R Tesis diseño y ejecución de una puesta a tierra de baja resistencia licenciado en física de la universidad nacional mayor de san marcos

✚ Regalado, C.M., A. Ritter y R.M. Rodríguez-González.2007. Performance of the commercial WET capacitance sensor as compared with Time Domain Reflectometry in volcanic soils. Vadose Zone J. 6: 244 - 254.

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

✚ Lowdermilk, W.C. 1953. Conquest of the Land Through Seven Thousand Years. Agriculture Information Bulletin N° 99, USDA, Soil Conservation Service, Washington, D.C.

✚ Singer, M.J. y Ewing, S. 2000. Soil Quality. En Handbook of Soil Science. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.

✚ Sojka, R.E y Upchurch, D.R. 1999. Reservations Regarding the Soil Quality Concept. Soil Science Society of America J. 63: 1039-54.

✚ SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA

Natural Resources Conservation Service.

✚ [Medición de la Humedad en Cultivos Hidropónicos de Maíz](#); F. Calderón; Abril, 2000.

✚ Laboratorios Ltda. Avda. 13 No. 87-81 Bogotá D.C., Colombia S.A.; Septiembre, 2000.

✚ [Control de humedad en cultivos de clavel mediante el uso de Sensores Eléctricos](#); F. Calderón; Dr. Calderón Laboratorios Ltda. Avda. 13 No. 87-81 Bogotá D.C., Colombia S.A. Reporte a Julio 31 de 2001.

✚ [Evaluación de diferentes métodos para determinar la Humedad del sustrato en un cultivo Hidropónico de Clavel en la sabana de Bogotá \(Finca Guacarí\) mediante la utilización de tres sistemas de medición y cinco subsistemas de riego.](#) F. Calderón y col. Dpto. Técnico Dr. Calderón Laboratorios Ltda. Octubre 10, 2002.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_Informaci%C3%B3n\\_Geogr%C3%A1fica](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%A1fica).

<http://www.agroplan.com.co/AgriculturadePrecisionBasico.pdf>

<http://webiica.iica.ac.cr/bibliotecas/repiica/B0483e/B0483e.pdf>. Bongiovanni, R.;

[http://www.deere.com/es\\_ES/agriculture/ams/yield\\_mapping.html](http://www.deere.com/es_ES/agriculture/ams/yield_mapping.html)

<http://usuarios.lycos.es/zandoli/web3/Capacidad%20de%20intercambio%20catonico.html>

<http://www.soildoctor.com/Abrate.PDF>

<http://www.manualdelombricultura.com/wwwboard/messages/9695.html> .David R.

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/932/93216408.pdf>

Why measure Soil Resistivity...? AEMC Instruments. Chauvin Arnoux Inc. d.b.a.

AEMC

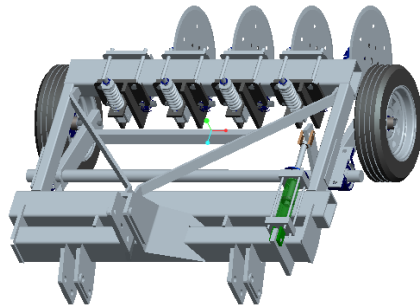
Instruments; [www.aemec.com](http://www.aemec.com) ; 08/02.

## **VII ANEXOS**

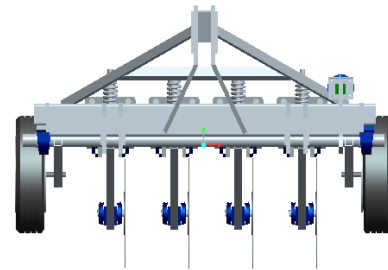


**ANEXO 7.1 Dibujos en PRO-ENGENIEER de los elementos del carroportasensores.**

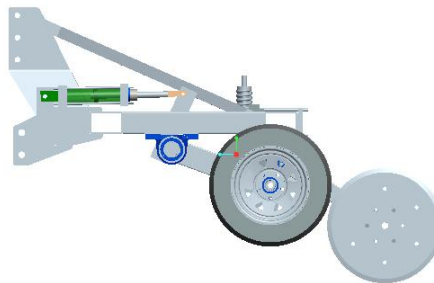
A) Vistas de carro portasensores.



**a) Orientacion normal**

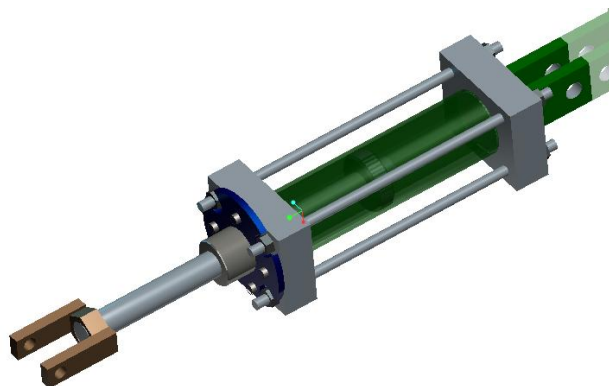


**b) frontal**



**c) derecha**

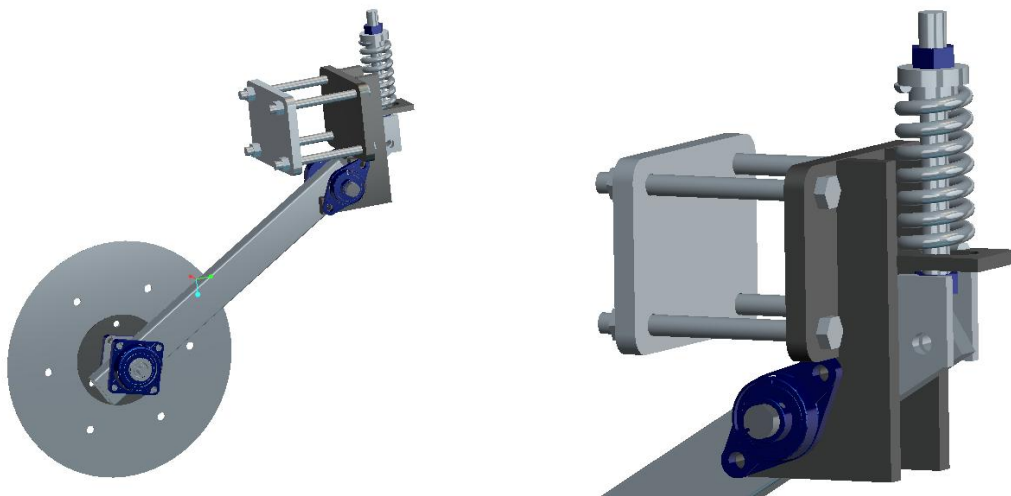
B) gato hidráulico



C) llantas



D) mecanismo de pivoteo de los discos



## ANEXO 7.2 Hojas de datos del CIRCUITO INTEGRADO XR-2206



# XR-2206

Monolithic  
Function Generator

June 1997-3

### FEATURES

- Low-Sine Wave Distortion, 0.5%, Typical
- Excellent Temperature Stability, 20ppm/°C, Typ.
- Wide Sweep Range, 2000:1, Typical
- Low-Supply Sensitivity, 0.01%V, Typ.
- Linear Amplitude Modulation
- TTL Compatible FSK Controls
- Wide Supply Range, 10V to 26V
- Adjustable Duty Cycle, 1% TO 99%

### APPLICATIONS

- Waveform Generation
- Sweep Generation
- AM/FM Generation
- V/F Conversion
- FSK Generation
- Phase-Locked Loops (VCO)

### GENERAL DESCRIPTION

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high-stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01Hz to more than 1MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range with an external control voltage, while maintaining low distortion.

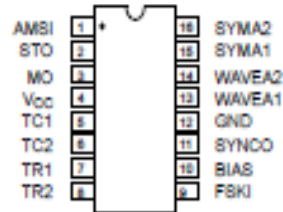
### ORDERING INFORMATION

| Part No.  | Package                    | Operating Temperature Range |
|-----------|----------------------------|-----------------------------|
| XR-2206M  | 16 Lead 300 Mil CDIP       | -55°C to +125°C             |
| XR-2206P  | 16 Lead 300 Mil PDIP       | -40°C to +85°C              |
| XR-2206CP | 16 Lead 300 Mil PDIP       | 0°C to +70°C                |
| XR-2206D  | 16 Lead 300 Mil JEDEC SOIC | 0°C to +70°C                |

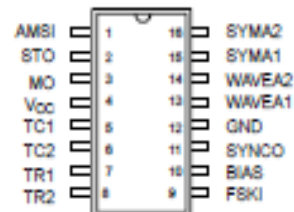
Rev. 1.03  
©1972

EXAR Corporation, 48720 Kato Road, Fremont, CA 94538 ♦ (510) 668-7000 ♦ (510) 668-7017





16 Lead PDIP, CDIP (0.300")



16 Lead SOIC (Jedec, 0.300")

**PIN DESCRIPTION**

| Pin # | Symbol          | Type | Description  |
|-------|-----------------|------|--|
| 1     | AMSI            | I    | Amplitude Modulating Signal Input.   |
| 2     | STO             | O    | Sine or Triangle Wave Output.  |
| 3     | MO              | O    | Multiplier Output.   |
| 4     | V <sub>CC</sub> |      | Positive Power Supply.   |
| 5     | TC1             | I    | Timing Capacitor Input.  |
| 6     | TC2             | I    | Timing Capacitor Input.  |
| 7     | TR1             | O    | Timing Resistor 1 Output.  |
| 8     | TR2             | O    | Timing Resistor 2 Output.  |
| 9     | FSKI            | I    | Frequency Shift Keying Input.  |
| 10    | BIAS            | O    | Internal Voltage Reference.  |
| 11    | SYNCO           | O    | Syno Output. This output is a open collector and needs a pull up resistor to V <sub>CC</sub> . |
| 12    | GND             |      | Ground pin.  |
| 13    | WAVEA1          | I    | Wave Form Adjust Input 1.  |
| 14    | WAVEA2          | I    | Wave Form Adjust Input 2.  |
| 15    | SYMA1           | I    | Wave Symetry Adjust 1.   |
| 16    | SYMA2           | I    | Wave Symetry Adjust 2.   |

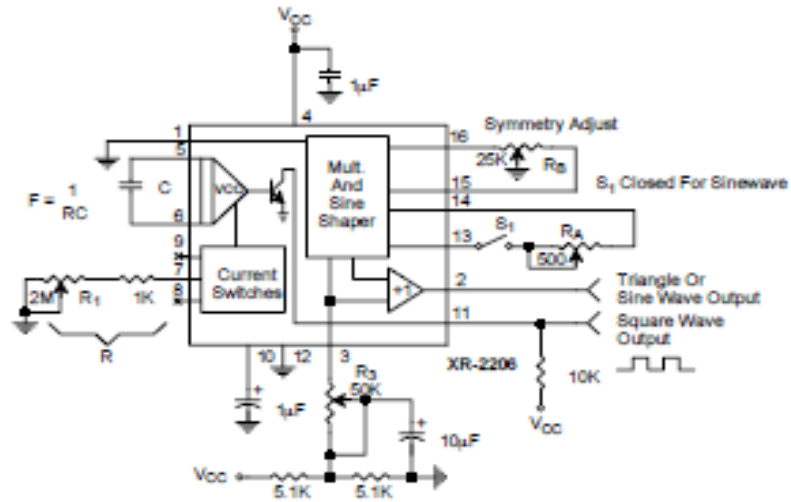


Figure 12. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. ( $R_3$  Determines Output Swing - See Figure 3)

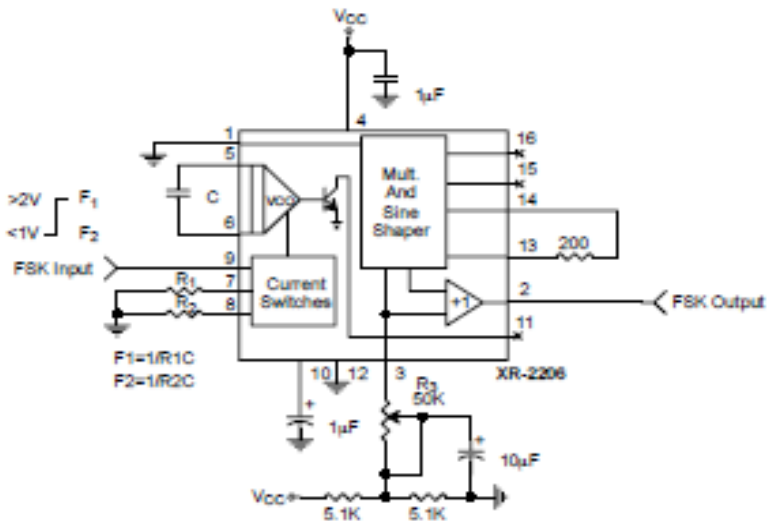


Figure 13. Sinusoidal FSK Generator

## ANEXO 7.3 Hojas de datos del CIRCUITO INTEGRADO LM2907



December 9, 2008

# LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

## General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above  $V_{CC}$  up to a maximum  $V_{CE}$  of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

## Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use;  $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$

- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

## Features

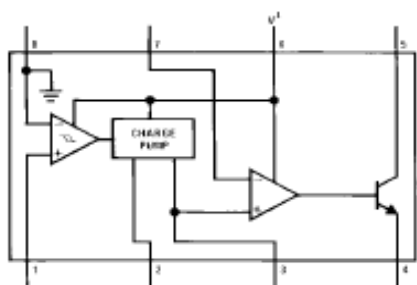
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs
- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$  linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above  $V_{CC}$  and below ground

## Applications

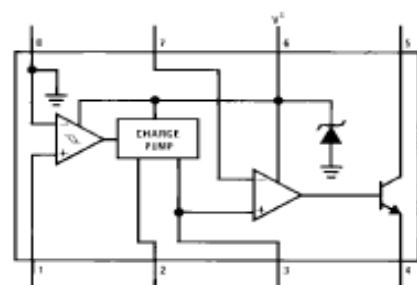
- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

## Connection Diagrams

Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views



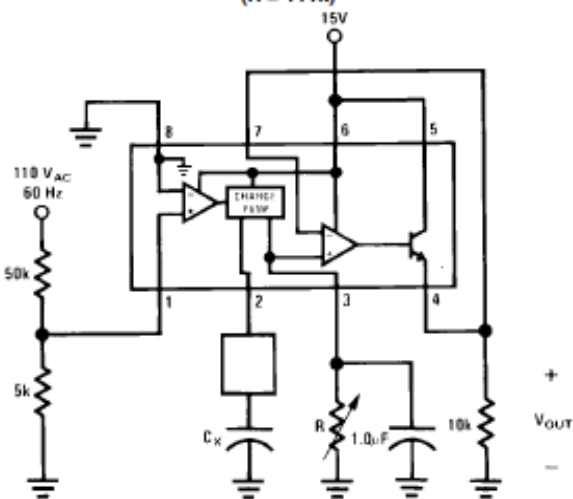
Order Number LM2907M-8 or LM2907N-8  
See NS Package Number M08A or N08E



Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8  
See NS Package Number M08A or N08E

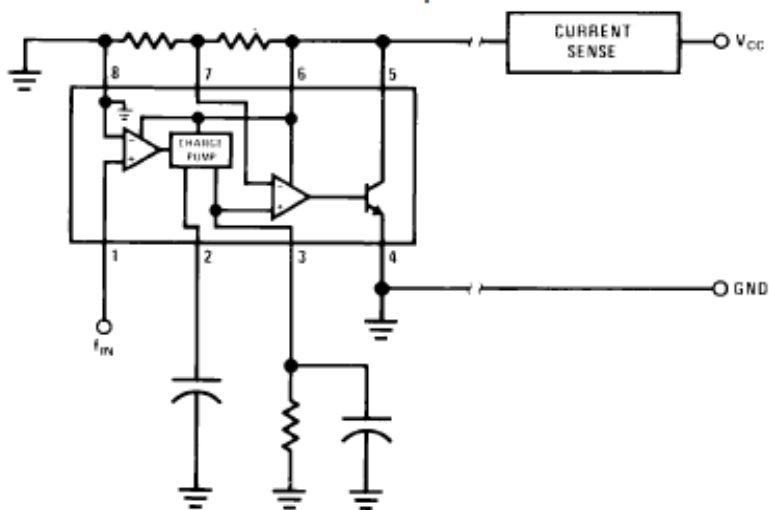
LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

**Capacitance Meter**  
 $V_{OUT} = 1V-10V$  for  $C_x = 0.01$  to  $0.1$  mFd  
 ( $R = 111k$ )



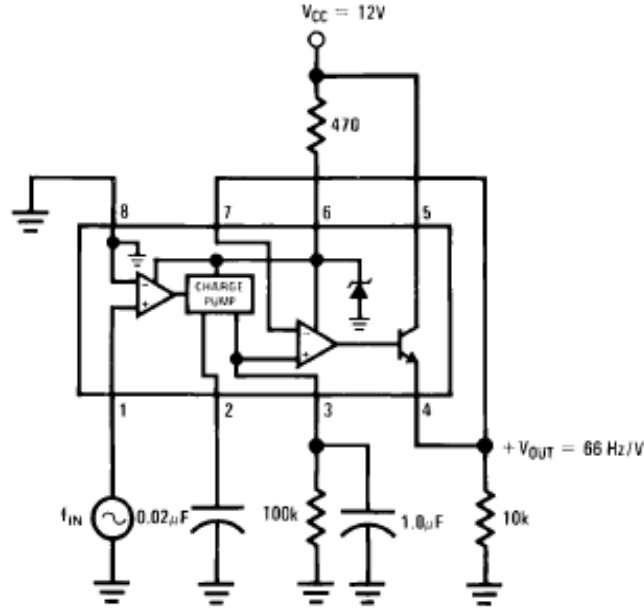
794214

**Two-Wire Remote Speed Switch**

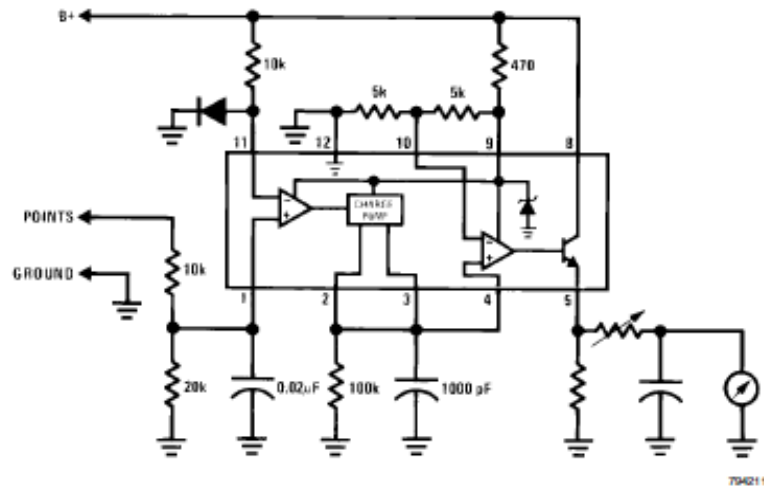


794215

### Zener Regulated Frequency to Voltage Converter



### Breaker Point Dwell Meter





## ANEXO 7.4 Secuencia para realización del mapeo en el programa **Gs+** Versión 9 para % de Humedad y conductividad eléctrica.

- Una vez abierto el programa capturamos los datos dentro de las celdas o también podemos copiar los datos desde EXEL y pegamos en el programa.

**Cuadro de datos % de humedad y conductividad eléctrica**

| X  | Y  | % humedad     | % humedad     | % humedad     | conductividad |
|----|----|---------------|---------------|---------------|---------------|
|    |    | capacitor 151 | capacitor 102 | capacitor 103 | eléctrica     |
| 80 | 0  | 2.5767        | 10.5404       | 17.4431       | 5.85256       |
| 80 | 20 | 6.3673        | 12.97352      | 17.569        | 5.25805       |
| 80 | 40 | 2.749         | 10.08008      | 17.65713      | 4.29551       |
| 80 | 60 | 1.8875        | 10.6226       | 17.49346      | 4.037889      |
| 80 | 80 | 1.8875        | 9.3074        | 17.40533      | 4.46537       |
| 60 | 0  | 6.5396        | 12.71048      | 17.3172       | 7.06989       |
| 60 | 20 | 7.0565        | 12.2666       | 16.5618       | 5.28636       |
| 60 | 40 | 8.6072        | 12.2666       | 16.31         | 4.714498      |
| 60 | 60 | 5.1612        | 11.609        | 17.4431       | 4.060537      |
| 60 | 80 | 2.9213        | 12.1022       | 17.569        | 5.855391      |
| 40 | 0  | 7.918         | 12.74336      | 17.0654       | 7.3813        |
| 40 | 20 | 4.1274        | 12.5954       | 17.01504      | 4.5503        |
| 40 | 40 | 8.4349        | 11.67476      | 17.569        | 5.453389      |
| 40 | 60 | 5.5058        | 12.61184      | 16.87655      | 5.006091      |
| 40 | 80 | 2.749         | 12.3488       | 16.5618       | 4.589934      |
| 20 | 0  | 7.918         | 12.74336      | 17.1913       | 6.39045       |
| 20 | 20 | 6.5396        | 12.5954       | 17.25425      | 18.7053       |
| 20 | 40 | 4.472         | 11.67476      | 16.0582       | 16.1574       |
| 20 | 60 | 6.8842        | 12.61184      | 17.1913       | 22.3856       |
| 20 | 80 | 3.2659        | 12.3488       | 17.0654       | 13.6095       |
| 0  | 0  | 7.2288        | 11.9378       | 16.12115      | 13.0433       |
| 0  | 20 | 4.1274        | 10.09652      | 15.65532      | 18.22403      |
| 0  | 40 | 7.2288        | 12.431        | 17.0654       | 20.9701       |
| 0  | 60 | 4.472         | 10.81988      | 15.8064       | 16.4405       |
| 0  | 80 | 2.749         | 9.07724       | 17.1913       | 11.3447       |

## ✚ Captura de los datos en Gs+ Versión 9

|    | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6           | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---|---|---|----|
|    | X Coord | Y Coord | Z       |         |         |             |   |   |   |    |
|    |         |         | cap 151 | cap 102 | cap 103 | cond. elec. |   |   |   |    |
| 1  | 80.00   | 0.00    | 2.53    | 10.54   | 17.44   | 5.85        |   |   |   |    |
| 2  | 80.00   | 20.00   | 6.37    | 12.97   | 17.57   | 5.26        |   |   |   |    |
| 3  | 80.00   | 40.00   | 2.75    | 10.08   | 17.66   | 4.30        |   |   |   |    |
| 4  | 80.00   | 60.00   | 1.89    | 10.62   | 17.49   | 4.04        |   |   |   |    |
| 5  | 80.00   | 80.00   | 1.89    | 9.31    | 17.41   | 4.47        |   |   |   |    |
| 6  | 80.00   | 0.00    | 6.54    | 12.71   | 17.32   | 7.07        |   |   |   |    |
| 7  | 60.00   | 20.00   | 7.06    | 12.27   | 16.56   | 5.29        |   |   |   |    |
| 8  | 60.00   | 40.00   | 8.61    | 12.27   | 16.31   | 4.71        |   |   |   |    |
| 9  | 60.00   | 60.00   | 5.16    | 11.61   | 17.44   | 4.06        |   |   |   |    |
| 10 | 60.00   | 80.00   | 2.92    | 12.10   | 17.57   | 5.86        |   |   |   |    |
| 11 | 40.00   | 0.00    | 7.92    | 12.74   | 17.07   | 7.38        |   |   |   |    |
| 12 | 40.00   | 20.00   | 4.13    | 12.60   | 17.02   | 4.55        |   |   |   |    |
| 13 | 40.00   | 40.00   | 8.43    | 11.67   | 17.57   | 5.45        |   |   |   |    |
| 14 | 40.00   | 60.00   | 5.51    | 12.61   | 16.88   | 5.01        |   |   |   |    |
| 15 | 40.00   | 80.00   | 2.75    | 12.35   | 16.56   | 4.59        |   |   |   |    |
| 16 | 20.00   | 0.00    | 7.92    | 12.74   | 17.19   | 6.39        |   |   |   |    |
| 17 | 20.00   | 20.00   | 6.54    | 12.60   | 17.25   | 18.71       |   |   |   |    |
| 18 | 20.00   | 40.00   | 4.47    | 11.67   | 16.06   | 16.16       |   |   |   |    |
| 19 | 20.00   | 60.00   | 6.88    | 12.61   | 17.19   | 22.39       |   |   |   |    |
| 20 | 20.00   | 80.00   | 3.27    | 12.35   | 17.07   | 13.61       |   |   |   |    |
| 21 | 0.00    | 0.00    | 7.23    | 11.94   | 16.12   | 13.04       |   |   |   |    |
| 22 | 0.00    | 20.00   | 4.13    | 10.10   | 15.66   | 18.22       |   |   |   |    |
| 23 | 0.00    | 40.00   | 7.23    | 12.43   | 17.07   | 20.97       |   |   |   |    |
| 24 | 0.00    | 60.00   | 4.47    | 10.82   | 15.81   | 16.44       |   |   |   |    |
| 25 | 0.00    | 80.00   | 2.75    | 9.08    | 17.19   | 11.34       |   |   |   |    |

✚ Una vez en Gs+ dar doble clic en la celda, cambiar a modo “z (primary variate)” para seleccionar el valor de la Z que nosotros vamos a utilizar y cambiar el nombre del archivo.

Column 3 Assignment

Column 3 name: cap 151

Assign column 3 as:

- None
- X Coordinate
- Primary Variate
- Sample ID
- Y Coordinate
- Z (Covariate)
- External Drift

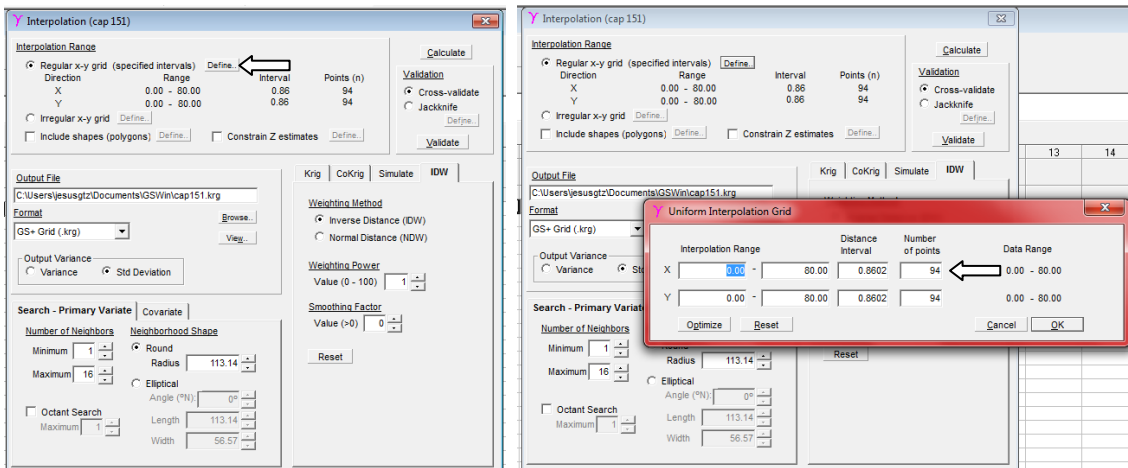
Rebuild automatically when reassigned

✚ Ahora nosotros damos clic en interpólate y seleccionamos Inverse Distance Weighting (IDW).

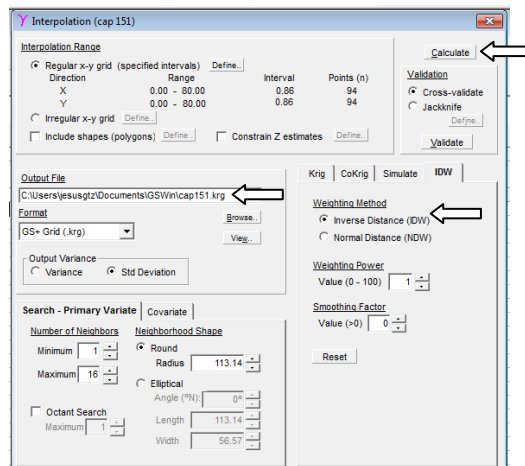
Interpolate

- Krig
- CoKrig
- Inverse Distance Weighting (IDW)**
- Simulation

- Se desplaza la ventana de Interpolation, dar clic en **Define** desplazando otra ventana **Uniform Interpolation Grid** y cambiar los **Number of points**, para X=250, para y=100 y dar **Ok**.



- El programa regresa al menú anterior de **interpolate** se le define nombre del archivo en **Output File**, dar clic en **IDW**, clic **Calculate**.



- Se guardan los cambios en el programa

