

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**



**Prototipo de Dinamómetro Para la Evaluación de las Fuerzas de Reacción  
del Suelo en la Labranza.**

POR:

**EDUARDO REY VÁZQUEZ ORTIZ**

TESIS

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

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

Prototipo de dinamómetro para la evaluación de las fuerzas de reacción del suelo en la labranza.

POR:

**EDUARDO REY VÁZQUEZ ORTIZ**

TESIS

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

**INGENIERO MECANICO AGRICOLA**

Aprobado por el Comité de Tesis

Asesor Principal

Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Sinodal

M.C. Juan Antonio López López

Sinodal

Ing. Héctor Emilio González Ramírez



Coordinador Interino de División de Ingeniería

Ing. Bruno García Mendoza

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre 2018

## AGRADECIMIENTOS

*“Mas las gracias sean dadas a Dios, que nos da la victoria por medio de nuestro señor Jesucristo”*

*1 de Corintios 15:57*

Le agradezco a la “**Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**” por abrirme sus puertas y capacitarme con rudeza para formar mi carrera profesional.

A los profesores de Maquinaria Agrícola por ser patícipes de mi formación:

*Mc. Héctor U. Serna Fernández.*

*Ing. José J. de Valle Treviño.*

*Ing. Juan A. Guerrero Hernández.*

*Mc. Genaro Demuner Molina.*

*Ing. Tomas Gaytan Muñoz.*

*Dr. Martin Cadena Zapata.*

*Ing. Blanca E. de la Peña Casas.*

*Dr. Mario A. Mendez Dorado.*

*Ing. Rosendo González Garza.*

Agradeciendo también á:

*Ing. Gerardo Sánchez Martínez*

*Lic. Luz M. Lopez Oalde*

*Dr. Karim de Alba Romenus*

*Cp. Erika C. González*

*MEd. Ana. María Fuentes*

*Ing. Heriberto Rios Tapio*

*Lic. María del socorro Flores Estrada*

Al Dr. **Santos Gabriel Campos Magaña**, por haberme permitido realizar la tesis en uno de sus proyectos, por su paciencia y tolerancia que me tuvo y por los conocimientos que me a transmitido.

Agradeciendo por su apoyo y colaboración á:

*Mc. Ronaldo Galindo Castillo*

*Ing. Héctor Emilio González Ramírez*

*Mc. Juan Antonio López López*

Al área de servicios asistenciales de la Universidad por dejar que fuese mi casa durante 4 años en “palomares 2 cuarto 7” y a mis compañeros que allí habitaron y habitan: ***Ing. Gorge A. Kau, Emilio Perez, Manuel Hernández, Miqueas F. Hernández, Ing. Pedro O. Kau, Antelmo Arriaga, Erasto A. Perez, Wilber Mendoza, Yair N. Roblero***, así también a los habitantes de “palomares 2 cuarto 10” por su apoyo y amistad.

#### **A MIS PADRES**

***Sr. Misael M. Vazquez Diaz y Sra. Victorina G. Ortiz Morales.***

Por su apoyo incondicional, por haberme inducido a la educación desde preescolar hasta mis logros actuales.

#### **A MIS HERMANOS**

***Carlos A. Vazquez Ortiz,***

***Ing. Yimna A. vazquez Ortiz***

Por su gran apoyo económico y por la confianza que han depositado en mí

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES**

**Sr. Misael M. Vazquez Díaz**

**Sra. Victorina G Ortiz Morales**

Por ser mis héroes y mi ejemplo de vida, fuente de motivación e inspiración, por su apoyo incondicional, por el amor, paz, humildad y todos los valores que me han inculcado.

### **A MIS HERMANOS**

**Carlos A Vazquez Ortiz**

**Josué O. Vazquez Ortiz**

**Yimna A. Vazquez Ortiz**

**Maria E. Vazquez Ortiz**

**Abner O.Vazquez Ortiz**

A mi comunidad, lugar de origen, *Cumbre Ventanas, Siltepec Chiapas, Mexico*, por sus palabras de aliento y motivación.

## ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Antecedentes .....	3
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	6
2.1. General .....	6
2.2. Específicos .....	6
<b>III. HIPÓTESIS</b> .....	7
<b>IV. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	8
4.1. Tecnología de implementos .....	8
4.2. Labranza .....	8
4.2.1. Labranza primaria. ....	<b>9</b>
4.2.2. Labranza vertical.....	<b>9</b>
4.3. Relación de la fuerza vertical y horizontal.....	10
4.4. Consumo de energía en la labranza.....	11
4.5. Profundidad crítica .....	14
4.6. Sensores de fuerza de tiro.....	15
4.6.1. Octagonal de anillo extendido. ....	<b>18</b>
4.6.2. Galgas extensiométricas .....	<b>19</b>
4.6.3. Puente de wheatstone.....	<b>20</b>
4.7. Sistema de adquisición de datos.....	22
<b>V. MATERIALES Y METODOS</b> .....	24
5.1. Evaluación en laboratorio.....	25
5.2. Evaluación en campo .....	26
<b>VI. RESULTADOS</b> .....	30
6.1. Resultados en laboratorio.....	30

6.2.	Resultados en campo .....	38
6.2.1.	Arreglo 0.20m – 0.20m.....	<b>39</b>
6.2.2.	Arreglo 0.30m – 0.30m.....	<b>42</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	46
<b>VIII.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	47
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	51
9.1.	ANEXO A .....	51
9.1.1.	Anexo A1. comportamiento de los voltajes de deformación de los sensores oae en laboratorio.....	<b>51</b>
9.1.2	A.2. deformación máxima de los sensores para cada posición de brazo de palanca. <b>58</b>	
9.1.3	A.3. Regresión lineal para los sensores verde y amarillo en 5 posiciones de brazo de palanca, sometido a una carga máxima de 2,845.0 N.....	<b>59</b>
9.1.4	A.4. Constantes de los sensores verde y amarillo para cada posición de brazo de palanca. <b>62</b>	
9.1.2.	A.5. Promedio de voltajes y error en los sensores en cada posición de brazo de palanca. <b>62</b>	
9.2.	ANEXO B .....	64
9.2.1.	B.1. Medidas del sensor octagonal de anillo extendido.....	<b>64</b>
9.3.	ANEXO C .....	65
9.3.1.	C1. Analisis de varianza para los metodos de energia y espectral para el analisis de resultdos a una profundidad de trabajo de 0.20-0.20 m.....	<b>65</b>
9.3.2.	C2. Analisis de varianza para los metodos de energia y espectral para el analisis de resultdos a una profundidad de trabajo de 0.30-0.30 m.....	<b>65</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura. (4.1). Valor de la fuerza vertical (V) se incrementa con la velocidad (Randolph) .....	11
Figura. (4.2). Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan and Farrelly, 1964). .....	15
Figura. (4.3). Diagrama de adquisición y procesamiento de datos. ....	18
Figura. (4.4). Transductor tipo anillo: (a) anillo liso extendido; (b) anillo octagonal extendido "EOR", (Chen et al., 2005) .....	19
Figura. (4.5). Muestra una galga extensiométrica .....	20
Figura. (4.6). a) Láminas apiladas a 90°; b) Lámina plana a 90° y c) Lámina planas a 45° ....	20
Figura. (4.7) Puente de wheatstone (Goodwin, 1993). .....	21
Figura. (4.8). Diagrama de bloques del sistema de instrumentación completo del tractor (Kheiralla and Azmi, 2002). .....	23
Figura. (5.1) metodología para desarrollar las evaluaciones en laboratorio y en campo .....	24
Figura. (5.2): Banco de prueba con los sensores acoplados de manera integral, donde se muestra el arreglo con la herramienta de trabajo. ....	25
Figura. (5.3): a) Imagen satelital de la parcela de evaluación. b) Evaluación realizada en el campo experimental el bajío. ....	27
Figura. (5.4). Equipos utilizados para la evaluación en campo. ....	28
Figura. (5.5) Arreglo del implemento para realizar un laboreo a 0.20 m de profundidad .....	29
Figura. (6.1): Efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE, en voltaje, para un brazo de palanca de 0.60 m. ....	31
Figura. (6.2). Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 0.70 m .....	34
Figura. (6.3). Grafica de regresión lineal de las constantes en cada posición del brazo de palanca. ....	36
Figura. (6.4). Gráfica de regresión del error para cada brazo de palanca .....	38
Figura. (6.5). elementos utilizados en la prueba de campo. ....	39
Figura. (6.6). grafica de respuesta en campo del arreglo de dos cinceles frontales y un cincel trasero sin alas a 0.20 m de profundidad. ....	39
Figura. (6.7). Grafica de respuesta en campo de dos cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero sin alas a 0.20 m de profundidad. ....	40



Figura. (6.8). Grafica de respuesta en campo de dos cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero sin alas a 0.20 m de profundidad. ....	41
Figura. (6.9). Grafica de respuesta en campo que muestra el arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 m y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad. ....	43
Figura. (6.10). Arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad. ....	43
Figura. (6.11). Arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 m y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad. ....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Cuadro 5.1:</b> Análisis de varianza para los dos sensores verde, amarillo y posición de brazo de palanca. ....	32
<b>Cuadro 5.2:</b> Comparación de medias de los voltajes de respuestas obtenidas con 5 diferentes brazos de palanca para una carga de 2,845.0 N. ....	33
<b>Cuadro 5.3:</b> Análisis de Varianza para las constantes de los sensores amarillo [4] y verde [3] en cinco posiciones de brazo de palanca para un total de 12 repeticiones por posición de la carga. ....	35
<b>Cuadro 5.4:</b> Concentrado de constante para los 5 diferentes brazos de palancas de calibración en los sensores verde [3] y amarillo [4]. ....	35
<b>Cuadro 5.5:</b> Magnitud del error en las diferentes posiciones de los brazos de palanca entre la media de voltajes de los sensores verde [3] + amarillo [4] Vs media de los sensores (verde-azul) [2] + (amarillo-rojo) [2]. ....	37
<b>Cuadro 5.6:</b> Resumen de los voltajes obtenidos por el método espectral de las combinaciones de los sensores para una profundidad de trabajo de 0.20 m en los cinceles frontales y un cincel traseros a 0.20 m sin alas. ....	41
<b>Cuadro 5.7:</b> Resumen de los voltajes obtenidos por el método de energía de las combinaciones de los sensores para una profundidad de trabajo de 0.20 m en los cinceles frontales y un cincel trasero a 0.20 m. ....	42
<b>Cuadro 5.8:</b> voltajes obtenidos por el método espectral para una profundidad de trabajo de 0.30 m en dos cinceles frontales y un cincel trasero a 0.30 m sin alas. ....	45
<b>Cuadro 5.9:</b> Resumen de los voltajes obtenidos por el método de energía de las combinaciones de los sensores para una profundidad de trabajo de 0.30 m en los cinceles frontales y un cincel trasero a 0.30 m sin alas. ....	45

## RESUMEN

En la actualidad es importante evaluar la maquinaria agrícola para conocer distintas variables de reacción del suelo entre los que destacan la fuerza de tiro, fuerza de succión, etc. Por lo que es necesario contar con un equipo confiable que pueda medir dichas variables. En el presente trabajo de investigación se evaluó un prototipo integral de medición de fuerzas en distintas configuraciones para la evaluación de implementos de labranza. El prototipo cuenta con tres sensores octagonales de anillo extendido con galgas extensiométricas con distintos arreglos. Para su evaluación en laboratorio se utilizó un sistema de adquisición de datos DaqBook-2000 y un acondicionador de señales DBK43A, para su registro de la empresa IOTECH. en la evaluación en laboratorio se utilizaron distintos pesos para obtener las constantes de deformación. En cuanto a la simulación de trabajo en campo se utilizaron distintos brazos de palanca que representan distintas profundidades de trabajo. Para la evaluación en campo se consideraron distintos arreglos de cinceles y obtener la fuerza de tiro. Los resultados obtenidos de las constantes de deformación muestran una linealidad con un  $R^2$  superiores al 99 % para los tres sensores. Se realizó un análisis estadístico donde muestra una diferencia significativa entre los distintos brazos de palanca, por lo que es necesario considerar realizar una corrección en la ecuación para determinar las fuerzas reales del suelo ya que el equipo muestra una subestimación o sobreestimación de los valores reales del suelo encontrando errores entre el 13 y 41 % de los cuales el menor error se encuentra con un brazo de palanca entre 0.70 y 0.90 m. se compararon estadísticamente dos métodos de la obtención del error, uno de ellos el análisis espectral y área bajo la curva, mostrando que no existe diferencia significativa entre ambos métodos.

***Palabras clave:*** sensor integral sensores octogonales fuerzas de reacción

## I. INTRODUCCIÓN

Debido a los altos costos de preparación o laboreo del suelo, la reducción del uso de energía en los sistemas de producción agrícola es un tema de gran importancia, pues contribuye al éxito económico de los mismos para las labores de establecimiento de cultivos, actualmente se requiere un gran consumo de energía en forma de combustible, esto es un factor que limita la actividad agrícola, pues reduce el costo beneficio del sistema de producción, no obstante, si se implementan cambios tecnológicos apropiados en los sistemas de producción de alimentos, se estima que se puede reducir hasta en un 50% el uso de energía fósil en los mismos (Pimentel *et. al.*, 2008).

La creciente caída de la rentabilidad de la producción de granos básicos es una característica que describe los sistemas productivos de nuestro país, donde la preparación de los suelos destaca como la actividad que consume más energía o combustible y, por lo tanto, la que representa los mayores costos. El uso excesivo de la maquinaria agrícola es un indicador de la ausencia de tecnología y conocimiento, representada por la poca información en el establecimiento de los sitios, y, por tanto, ocasionando erróneas decisiones en su manejo (Reynolds, 2012).

En la actualidad debido al uso excesivo e inadecuado de los implementos de labranza, provoca la degradación de suelo y genera baja rentabilidad de los cultivos; la búsqueda de soluciones a esta problemática ha conducido al estudio e implementación de sistemas de labranza de tipo conservacionista (no inversión del suelo), incluyendo a la labranza vertical, con el fin de disminuir el impacto al medio ambiente y especialmente sobre el suelo. Por lo anterior es importante conocer diferentes parámetros operativos de los implementos de labranza y su incidencia en el suelo (Camacho y Rodríguez, 2007).

En los últimos años se ha incrementado el interés por el uso eficiente de la energía, la conservación del suelo y agua, principalmente donde es escasa, lo que ha traído un cambio en actitudes con respecto a las prácticas de manejo del suelo y los residuos. Cada año se da más énfasis al uso de labranzas mínimas y a la preparación de la cama de siembra en la agricultura temporal (FAO<sup>a</sup>, 2003).

Una prioridad para la evaluación de implementos apegados a los lineamientos institucionales del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), como órgano rector, es contar con instrumentos para satisfacer los requerimientos de prueba de los diferentes parámetros a medir durante la evaluación del desempeño de los equipos de labranza. Una de las pruebas es la determinación de la fuerza de tiro, actualmente el método aprobado en México (potencia y fuerza de tracción a la barra de tiro NMX-O-203-SCFI-2004) donde se utiliza un dinamómetro de tiro el cual es colocado entre dos tractores, un tractor con el implemento a evaluar en posición de trabajo y otro como fuente de potencia

Las empresas que se dedican a la fabricación de implementos agrícolas, en fechas recientes se han preocupado por implementar diseños óptimos y controlar la calidad de los existentes. Debido a que existe poco conocimiento por parte de los fabricantes acerca de las necesidades de la fuerza de tracción que requieren los implementos, así como su potencia consumida por cada implemento para efectuar su labor específica, es necesario conocer la magnitud y dirección de las fuerzas de reacción del suelo sobre el implemento, es por ello que se requiere contar con instrumentos y sensores de medición precisos de los parámetros para la evaluación de los implementos bajo condiciones de campo. El contar con los instrumentos antes mencionados, servirá para dar servicio a fabricantes de equipo agrícola, así como generar la información para el desarrollo de nuevas tecnologías que requieran menos demanda de energía, que en un momento determinado redunde en gastos para el productor y disminuya por un lado su capacidad económica y por consiguiente aumente su capacidad de producción del mismo (Campos, 2000).

En la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) se tiene el desarrollo de un sensor integral que cuenta con tres sensores octogonales de anillo extendido que dentro de su instrumentación cuenta con galgas extensiométricas para la medición de la deformación relacionados con las fuerzas horizontales, verticales y momentos. Mediante este instrumento integral se reemplaza el uso de dos tractores como se especifica en las normas, se obtienen resultados confiables y por lo tanto una reducción de costos.

El presente trabajo es la continuación de la investigación realizada por campos *et. al.*, (2015) donde recomienda llevar a cabo una recalibración en la fase de laboratorio del sensor integral

para determinar la magnitud del error producto del cambio de profundidad de trabajo. Además de realizar una verificación de la magnitud, trabajando con diferentes arreglos de cinceles a diferentes profundidades de laboreo

### **1.1. Antecedentes**

Tradicionalmente se emplean dinamómetros de tiro que representan un 60% de las fuerzas a medir en la evaluación de herramientas, requiriéndose para estos diseñar elementos que permitan medir tanto la fuerza de penetración (30%) y las parasitas (10%). Esto con la finalidad de contar con un instrumento integral para el desarrollo de nuevas formas de implementos que demande menor consumo de energía (Campos, 2000).

Thomson y Shinnars (1989), desarrollaron un sistema para medir fuerzas de reacción del suelo en dos direcciones, colocando en una estructura rígida, simulando un sistema de enganche rápido a los tres puntos del tractor. El sistema emplea celdas de carga como unidades de medición de las fuerzas de reacción.

El transductor octagonal de anillo extendido para uso en estudios de labranza (Cook and Rabinowicz, 1954) se diseñó primeramente para monitorear las dos componentes de fuerzas y el momento en el plano de estas fuerzas de reacción del suelo. Baker y Col. (1981) utilizó seis celdas de carga montados en diferentes puntos dentro de un marco, una forma de medir las fuerzas horizontales, verticales y laterales. Otro caso, (Thomas Fontain 1991, citado por Bonifaz, 2012) evaluó un sistema de transductor de platos flotantes de seis componentes, estos componentes permiten la medición de la fuerza de reacción en las tres direcciones. Sakurai (1996), señala como las fuerzas son determinadas a través de un análisis de suma de momentos en un punto de la viga, mediante el cual son determinadas cada una de las fuerzas y la dirección de la fuerza resultante-

Godwin y Spoor citado por Campos (2000) indican que uno de los aspectos más importantes en la evaluación de nuevos diseños de herramientas de labranza, es el proceso de medición de las magnitudes de las fuerzas que actúan en dichos implementos, la característica de la falla, así como el volumen de disturbación y sección transversal del suelo como producto de la geometría

de la herramienta. Campos *et al.*, (2000) diseñaron y compararon el funcionamiento de tres transductores de fuerzas basados en el principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas, evaluados bajo condiciones de laboratorio y simulando las condiciones de suelo sin labrar en campo.

Al-Jalil *et al.*, (2001), diseñaron y fabricaron un enganche de tres puntos capaz de medir tres fuerzas que actúan en el tractor-implemento en tres dimensiones, que ayudaría a diseñar herramientas de labranza y evaluar el funcionamiento del tractor.

Hinojosa, (2003) propone el diseño de un transductor integral para tractores categoría II que permita medir en un solo instrumento cuatro variables: fuerza de tiro, fuerza de penetración, momento y transferencia de peso.

Bonifaz (2012) rediseño, construyó y evaluó un sensor integral con capacidad de 80 kN para las fuerzas horizontales y verticales, así como 70 kN de transferencia de peso. Los elementos que lo integran son tres anillos octagonales extendidos y un marco de enganche de tres puntos, categoría II.

El rediseñar un transductor basado en la propuesta de Hinojosa (2003), tiene la finalidad de que pueda ser utilizado para la evaluación de implementos integrales de labranza tales como: multi-arado, arado, rastra, vibro-cultivador, sembradora, cultivadora y cualquier otro implemento integral a tractores de categoría II por lo que podrá emplearse en la determinación de la fuerza de tiro dentro del procedimiento del desarrollo de las normas de arados, rastras y sembradoras.

Pacheco (2012) desarrolló y evaluó un transductor integral para la medición de la fuerza de tiro en un prototipo de labranza vertical con arreglos de hasta 6 cinceles con y sin alas expansoras basado en la propuesta de Hinojosa (2003), el cual está constituido por tres transductores octagonales de anillo extendido cada uno con capacidad de 40 kN con un factor de correlación por encima del 99%.

Pacheco y Bonifaz, (2012) encontraron un coeficiente de variación entre el 5 y 6% en sus evaluaciones realizadas para el transductor integral, indicándonos así que es un aparato eficiente para el uso de evaluaciones en campo.

Los sensores o transductores de fuerza son ampliamente usados en el campo de la industria y las investigaciones, presentando muchas configuraciones en equipos comerciales. Básicamente están compuestos por: una pieza monolítica conocida como elemento elástico y por extensiómetros o galgas extensiométricas que permiten medir, en el área de colocación de los mismos, los niveles de deformación preferiblemente uniformes, que experimenta el transductor bajo la acción de la fuerza aplicada. Estos diseñados, para que a fuerzas relativamente bajas permitan altos niveles de deformación, siendo precisamente el elemento elástico el componente más crítico del transductor (Martínez, 2008).

Korkut (2003), desarrolló un dinamómetro para medir las componentes de fuerza durante el corte de un metal en tres direcciones y se encontró que el dinamómetro puede utilizarse de manera fiable para la medición de fuerzas de corte. Khan *et al.* (2007), diseño un sistema de transductor biaxial (EOR) para medir las fuerzas tractor-implemento, mostraron que la Sensitividad cruzada del sensor fue menor a 1.5% para la mayoría de los casos.

La necesidad de conocer con precisión la magnitud y dirección de las fuerzas de reacción del suelo, que actúan sobre un implemento en particular para su diseño óptimo, requiere el uso de transductores para medir dichos parámetros, los cuales se han diseñado para medir las fuerzas de tiro, fuerza vertical para herramientas de geometría simétrica, ya que de acuerdo a la teoría de falla de suelo son los componentes de interés. También existe una tercera fuerza de interés para elementos de geometría no simétrica como es la fuerza lateral. Uno de los transductores más apropiados para determinar las fuerzas de reacción del suelo en los implementos de labranza es el transductor octagonal de anillo extendido, que tienen las ventajas sobre otros comúnmente empleados en la evaluación de equipos de labranza (Campos, 1993).



## **II. OBJETIVOS**

### **2.1.General**

Evaluar un prototipo integral para la medición de las fuerzas de reacción del suelo en la labranza vertical

### **2.2. Específicos**

- Determinar constantes de deformación de los sensores octagonales
- Evaluar en campo el prototipo con diferentes configuraciones de labranza vertical
- Comparar la confiabilidad de dos métodos de análisis de los datos de evaluación en campo.

### **III. HIPOTESIS**

Con la evaluación del prototipo integral será posible determinar las fuerzas de reacción del suelo con alta confiabilidad.

## **IV. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **4.1. Tecnología de implementos**

Kepner *et al.*, (1978) describen que las reacciones de los suelos debido a las fuerzas aplicadas por implementos de labranza son afectadas por la resistencia del suelo a compresión, la resistencia al corte, adhesión (fuerzas atractivas 25 entre el suelo y algún otro material), y la resistencia a la fricción. Estas son todas las propiedades dinámicas que se hacen de manifiesto solamente a través del movimiento del suelo. Con el avance de la herramienta, el suelo en esta trayectoria está sujeto a esfuerzo de compresión que, en un suelo friable, resulta ser una acción de corte. El cortado de los suelos es considerablemente diferente del cortado de muchos sólidos, esto es debido a que la reacción puede ser ejercida por una distancia considerable sobre cualquiera de los lados del plano de corte por la fricción interna y la acción cohesiva de las películas de humedad.

### **4.2. Labranza**

Durante miles de años de historia, la humanidad ha labrado la tierra con el fin de aumentar la producción de alimentos. La labranza del suelo, en general, es una de las operaciones del campo fundamentales en la agricultura, debido a su influencia en las propiedades del suelo, medio ambiente y la producción de cultivos. Para asegurar el crecimiento normal de la planta, el suelo debe estar preparado en tales condiciones que las raíces puedan tener suficiente aire y nutrientes (Gill y McCreery, 1960; Gill y Vandenberg, 1967).

La labranza es la manipulación mecánica del suelo, para la producción de cultivos en la agricultura (ASAE, 2002). Sin embargo, existen efectos directos e indirectos que se logran con la labranza, entre los cuales se encuentran: facilitar la producción de los cultivos, el control de malezas, acondicionar la superficie del suelo para permitir una buena irrigación y una cosecha más fácil, además de facilitar la incorporación de materia orgánica, fertilizantes, pesticidas, entre otros (Hoogmoed, 1999).

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

#### **4.2.1. Labranza primaria.**

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

La profundidad de la labranza primaria depende de la fuerza de tracción disponible. Con tracción animal es normalmente entre 10 y 20 cm; con el tractor, especialmente con el aumento de potencia de los tractores modernos, se llega en algunos países hasta 40 cm. Existe una amplia polémica sobre la profundidad de la labranza primaria. En general no se debería aumentar la profundidad de labranza sólo porque se dispone de la potencia necesaria. En suelos con una capa de suelo delgada esto puede literalmente destruir el suelo, lo que ocurre frecuentemente cuando se usan tractores. El incremento de cosecha que coincide a veces con una profundización de la capa arable, sólo en pocos casos es sostenible. Esto depende mucho de la fertilidad y la profundidad del suelo. Por otro lado: con una buena estructura del suelo las raíces de las plantas llegarán a las partes más profundas sin necesidad de una labranza profunda.

A largo plazo, la labranza profunda consume más combustible mientras que los beneficios no están asegurados.

#### **4.2.2. Labranza vertical**

La labranza vertical se refiere a un sistema en donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación (FAO, 2000). Por lo tanto, el suelo queda normalmente en buena cobertura de rastrojo de más de 30% sobre la superficie, es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos del suelo, inclusive en los que tiene

problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación (Agamennoni, 1996; Velásquez, 2011). La eficiencia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibro-cultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos. Por consiguiente, es posible preparar entre 50 hasta 80% más de superficie con la labranza vertical, si se la compara con labranza convencional (Barber *et al.*, 1993<sup>a</sup>)

#### **4.3.Relación de la fuerza vertical y horizontal**

Según Marín (2003), un arado de vertederas generalmente tiene un componente vertical actuando hacia abajo de la fuerza útil del suelo (succión). La magnitud de la fuerza específica (V) en relación a velocidad de avance del tractor (L) varía extensamente, empezando por la influencia del tipo y condición del suelo, profundidad y partes de la forma de corte o afilados y otros factores. El valor de la fuerza vertical (V) se incrementa con la velocidad como se muestra en la figura (4.1), pero con la tendencia en algunos suelos para una reducción ligera de la relación  $\frac{V}{L}$ . La relación  $\frac{V}{L}$  de las pruebas realizadas en el ataque de los suelos esquematizadas se obtiene rangos de relación de 0.5 a 0.6 para las arenas y de 0.35 a 0.45 para limos arenosos finos. Resultados aportados por pruebas de campo de varios tipos y condiciones de suelos, presumiblemente con partes en condiciones buenas, dan rangos de relaciones  $\frac{V}{L}$  de 0.1 a 0.3.

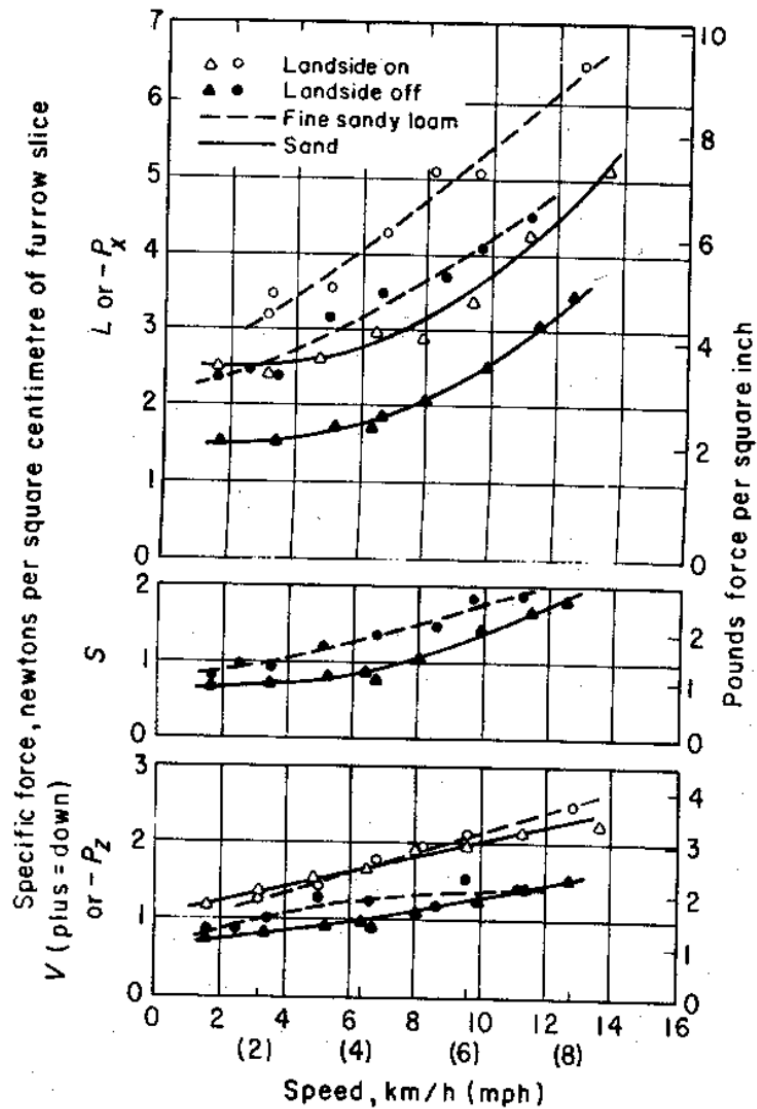


Figura (4.1): Valor de la fuerza vertical (V) se incrementa con la velocidad (Randolph)

#### 4.4. Consumo de energía en la labranza.

Edmundo (1987), menciona que la determinación para la demanda energética de una operación de labranza exige conocer el valor de la fuerza por unidad de ancho necesaria para arrastrar el equipo en el campo. Este valor de la fuerza y la velocidad de trabajo permiten obtener la potencia necesaria para accionar, un equipo de un tamaño determinado. Estas relaciones se muestran en la ecuación (1).

$$Potencia = \frac{fuerza*Velocidad}{FPT*3.6} \dots\dots\dots (1)$$

El gasto energético por *ha* se establece asociando el valor de la potencia con la capacidad efectiva de trabajo (CET) del equipo, que tiene incluida una estimación de la eficiencia de campo.

La potencia de trabajo requerida para trabajar con diversas herramientas es variable y depende de varios factores. Entre ellos se encuentra la textura y contenido de humedad del suelo, la velocidad y profundidad de trabajo, la naturaleza del material de la herramienta deslizante, sea metálico, plástico o madera. A pesar de la posibilidad de poder predecir la fuerza de arrastre de ciertas herramientas bajo condiciones específicas, una predicción práctica y realista es difícil por la variabilidad de las condiciones en un campo agrícola. Normalmente se encuentran en zonas muy húmedas y mal drenadas, compactadas, con pendiente, piedras y otros obstáculos que obligan al operador a cambiar la velocidad de trabajo (Ashburner y Sims, 1984).

Sin embargo, es importante manejar algún procedimiento que permita estimar la potencia requerida para trabajar con diversas herramientas en condiciones normales y así permitir la selección de tractores y equipos en forma racional, lo cual también, permite ejecutar un análisis económico del sistema de mecanización seleccionado (de Dios, 1972; Hunt, 1977).

La humedad del suelo es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimientos de potencia en la preparación del suelo. Suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua aumenta en el suelo (Mouazen y Ramón, 2002), aumentando entonces la adhesión que las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción. Arvidsson *et al.*, (2004) encontraron que el contenido de agua adecuado para las labores de labranza es cercano al límite plástico de suelo; también incluyeron que la profundidad de trabajo aumenta a mayor contenido de humedad del suelo, disminuyendo la resistencia específica. Por otra parte, la labor en un suelo seco favorece la formación de terrones grandes (De Toro y Arvidsson, 2003) y suelos con contenido de agua superior al límite plástico son fácilmente deformados y compactados.

Camacho y Rodríguez (2007), midieron el área transversal del suelo disturbado, la profundidad de trabajo, el ancho de trabajo, la fuerza de tracción y la resistencia específica para diferentes implementos de labranza con tres contenidos de agua en el suelo y tres velocidades de operación, indicando que el contenido de agua afectó todos los implementos de labranza, destacando el arado de discos y el arado de cincel vibratorio, en la cual muestra que el arado de cincel rígido es energéticamente más eficiente para preparar el suelo, con una resistencia específica baja y una mayor área transversal de suelo disturbado.

Martínez *et al*, (2001) presentan una serie de ecuaciones que pueden servir como herramienta de soporte en la toma de decisiones para la selección y operación de implementos de labranza concluyendo que los modelos resultantes pueden utilizarse con fines de predicción.

Con base en resultados estadísticos se determinó que entre la intensidad de labranza y la energía utilizada ( $kW\ ha^{-1}$ ) para cada tratamiento, existe una relación significativa cuyo coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.935$ ). Este indica una alta dependencia entre estos dos parámetros, por lo que se propone la ecuación 1 para estimar el consumo energético requerido al preparar el suelo en función de la intensidad de labranza originada por un implemento determinado. Además las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) para la estimación del requerimiento energético con los implementos para ellas especificados.

$$RE = -3.21 + (0.5512) * (IL) \quad R^2 = (0.935) \dots \dots \dots (2)$$

$$RE(KW\ ha^{-1}) = -3.123 + (183.733)(PPL) - [(91.876)(PPL)(Dt)]/Act \dots \dots \dots (3)$$

Cuando la distancia entre los timones sea mayor que el ancho de corte de cada timón (en la superficie queda terreno sin alterar), la ecuación se reduce a:

$$RE(kw\ ha^{-1}) = -3.123 + [(27.56)(Act)]/Dt \dots \dots \dots (4)$$

La ecuación (5) para el arado de discos y la rastra de discos:

$$RE(kw\ ha^{-1}) = -4.9052 + 183.733(PLL) - [(2.5722)(Dd)]/A \dots \dots \dots (5)$$



La ecuación (6) para el arado de vertedera:

$$RE(kw ha^{-1}) == -4.9052 + 183.73PPL - (2.5722)\left(\frac{Ar}{A}\right).....(6)$$

Las ecuaciones propuestas están referidas a su intensidad de labranza, la cual presenta un valor diferente para cada implemento y condición de laboreo, por lo que los resultados pueden usarse para comparar la eficiencia de trabajo de los implementos que se utilizan para realizar la preparación del suelo, tanto en función del grado de preparación, como el consumo energético, o bien para estimar la energía requerida para preparar un predio determinado.

Por su parte, Stafford (1983), desarrolló modelos para la predicción la acción de fuerza en las herramientas de labranza, los cuales toman en cuenta diferentes tipos de disturbio o falla de suelo que pueden ser causados por dichas herramientas. Muestran también que en, falla frágil, los efectos de velocidad es debido a la fuerza de inercia y tipos de efecto de fricción del suelo-metal

#### **4.5. Profundidad crítica**

Los modelos de corte del suelo, ya sea en dos o tres dimensiones, han asumido que el suelo se mueve hacia arriba en todo el rango de profundidad de la herramienta de corte; aunque este no siempre es el caso, especialmente en donde un implemento de corte angosto está operando a profundidades en un suelo plástico. Kostriksyn (1956) reportó observaciones de este fenómeno el cual ha sido llamado "la profundidad crítica", y sugiere a partir de su experiencia, que esta profundidad es generalmente de siete a ocho veces el ancho de la herramienta.

O'Callaghan y Farrelly (1964) observaron profundidades críticas del mismo orden de las magnitudes, así como, del ancho, cuando evaluaron cuchillas verticales de acero en suelos plásticos arenosos y arcillosos. Usando herramientas similares, sin embargo, Miller (1971) encontró profundidades críticas hasta 14 veces la dimensión del ancho de la cuchilla en arena dura, y Godwin (1974) observó la profundidad crítica en rangos de ancho de cuchilla con una

variación de 10 a 16, dependiendo del ángulo de inclinación de la cuchilla en un suelo franco arenoso friable.

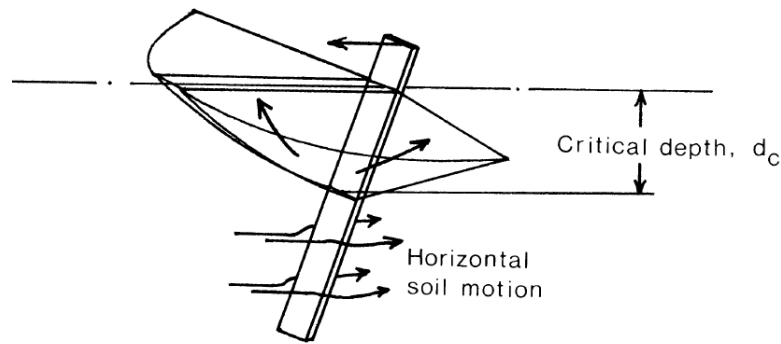


Figura. (4.2). Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan and Farrelly, 1964).

#### 4.6. Sensores de fuerza de tiro.

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

Se determinaron dos ecuaciones para el momento de flexión en la sección del anillo prolongado, mismas que se utilizan para el cálculo del momento en la sección utilizando el (EOR). McLaughlin (1996) detectó algunos errores en las ecuaciones de los Hoag y Yoerger y las corrigió.

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

O'Dogherty (1975) diseñó un transductor para determinar las fuerzas de corte y verticales usando una cuchilla en remolacha azucarera utilizando el anillo octogonal extendida. Informó de una buena linealidad, histéresis baja en ciclos de carga y descarga, y sensibilidades cruzadas entre 4,1 y 6,5 % para las fuerzas de corte y vertical, respectivamente en el proceso de calibración del transductor.

Godwin *et al.* (1987) diseñó tres transductores de (EOR) usando tres diferentes materiales con diferentes relaciones de radio y diferentes espesores del anillo ( $r / t$ ). Ellos encontraron que los sistemas desarrollados de instrumentación tenían suficiente resolución para medir el comportamiento dinámico vertical de suelo a acoplado a un enganche de pivote único.

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

O'Dogherty (1996) derivó una fórmula para determinar el espesor del anillo del transductor (EOR) mientras utilizaba datos de los transductores diseñados previamente por los investigadores. El introdujo un procedimiento gráfico para el diseño (EOR) basado en parámetros geométricos del anillo.

McLaughlin *et al.* (1998) diseñó y fabricó un octagonal de doble anillo extendido (DEOR por sus siglas en inglés) acoplado a una barra de tiro. Ellos calibraron el transductor utilizando métodos de carga uniaxiales y triaxiales. Los autores derivaron la regresión de un modelo para predecir las fuerzas de tiro, verticales, y las cargas laterales, e informó de las Sensitividad cruzada del sensor de 1,9 y 7,0 % para el las fuerzas de tiro y verticales respectivamente.

Kheiralla *et al.* (2003) desarrollaron un dinamómetro de tres puntos de enganche automático utilizando un transductor (EOR). Ellos reportaron una Sensitividad primaria horizontal y

vertical de 25,19 kN  $\mu$ strain-1 y 25.60 kN  $\mu$ strain-1 para el sensor (77.75 % y 89.77 % de la Sensitividad teórica calculada).

Korkut (2003) desarrolló un dinamómetro para medir las componentes de fuerza durante el corte de un metal en tres direcciones y se encontró que el dinamómetro puede utilizarse de manera fiable para la medición de fuerzas de corte.

Khan *et al.*, (2007) diseñó un sistema de transductor biaxial (EOR) para medir las fuerzas tractor-implemento, mostraron que la Sensitividad cruzada del sensor fue menor a 1,5 % para la mayoría de los casos.

Se puede decir que la mayoría de los sistemas de medición se pueden dividir en tres partes (Campos *et al.*, 2000).

Etapa detecta-transductor, detecta la variable física y efectúa una transformación, ya sea mecánica o eléctrica para convertir la señal de una forma más manejable. Generalizando el concepto, un transductor es un dispositivo que transforma el efecto físico en otro, en gran mayoría de los casos, la variable física se transforma en una señal eléctrica, ya que ésta es la forma de señal más fácilmente medible.

Etapa Intermedia, modifica la señal que proviene del transductor, ya sea por amplificación, filtrado u otros medios para tener una salida deseable.

Etapa final o terminal, indica, graba o controla la variable que se desea medir.

Mojica (2000) describe que un transductor es un dispositivo que ha sido diseñado para reaccionar ante un estímulo físico y proporcionar una salida que puede ser un desplazamiento o por lo regular un voltaje, que posteriormente puede ser comparado o analizado dependiendo de los requerimientos del sistema donde se utiliza.

Moo (1999) señala que los transductores (sensores) son elementos de transformación de una variable física correspondiente a un fenómeno, a una señal eléctrica que describe ese comportamiento y su desempeño se debe a los elementos de captura, estos solo trabajan con señales eléctricas. Generalmente los transductores son empleados en la medición de magnitudes físicas, como por ejemplo, temperatura, presión, longitud, etc.

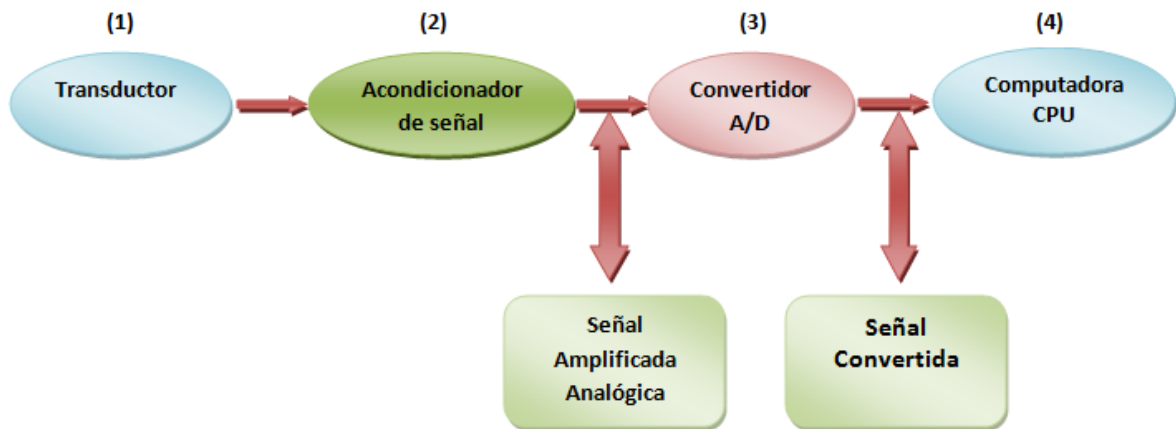
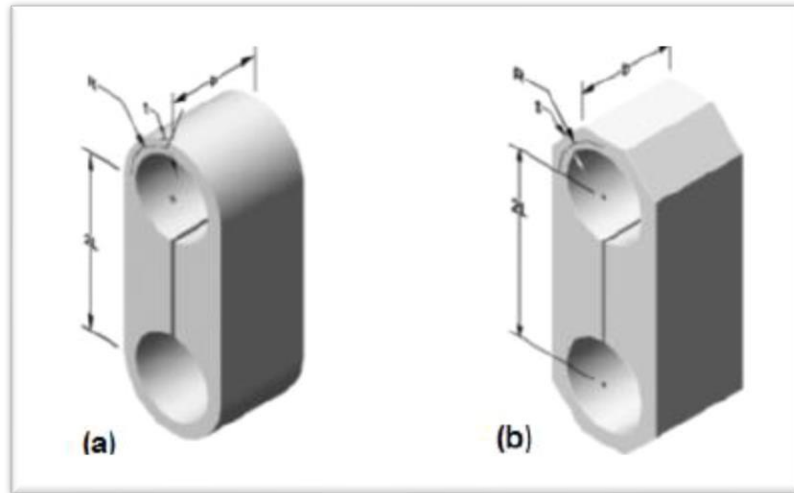


Figura (4.3). Diagrama de adquisición y procesamiento de datos.

En la figura (4.3) se muestra un diagrama de bloques de un sistema típico de medición empleado en la correlación de datos.

#### 4.6.1. Octagonal de anillo extendido.

Los transductores octagonales de anillo extendido han sido desarrollados como se muestran en la figura (4.4); tanto el anillo extendido y anillo octagonal extendido deben tener una sección central donde los accesorios de carga pueden ser atornillados. Las galgas extensiométricas están montadas en las secciones más delgadas de anillo para la medición de fuerza. (Hoag y Yoerger, 1975).

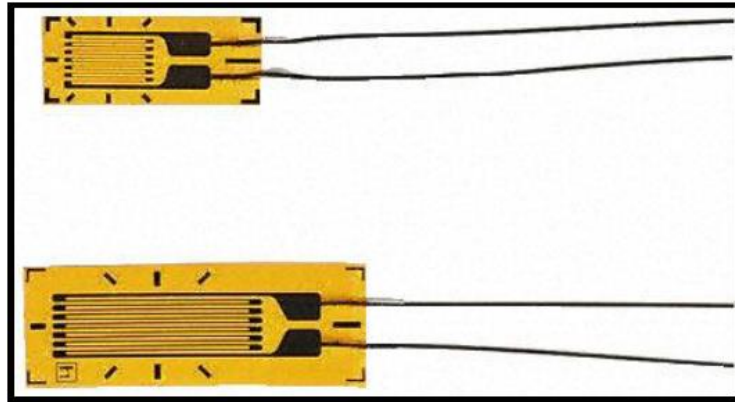


**Figura (4.4): Transductor tipo anillo: (a) anillo liso extendido; (b) anillo octagonal extendido “EOR”, (Chen et al., 2005)**

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

#### **4.6.2. Galgas extensiométricas**

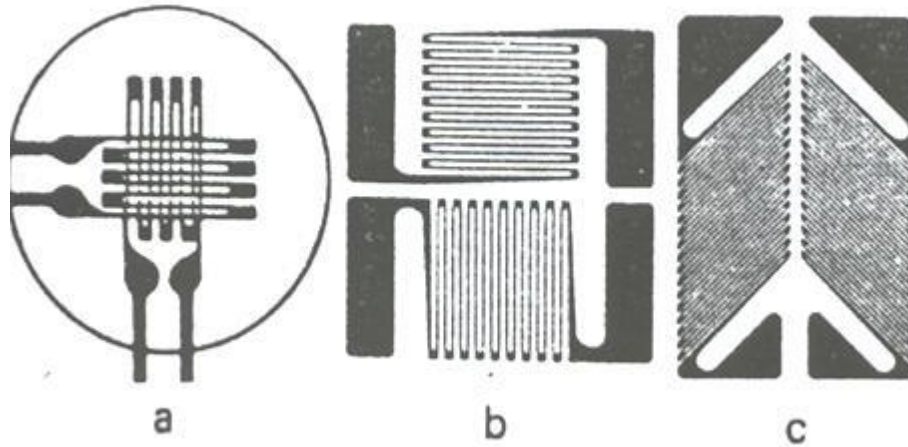
Las galgas extensiométricas son un ejemplo de transductor pasivo que convierte un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Es un dispositivo delgado, con una oblea, que se puede unir (soldar) a una variedad de materiales con el fin de medir los esfuerzos aplicados. Las galgas extensiométricas metálicas se fabrican con alambres resistentes de diámetros muy pequeños o grabado en laminillas metálicas delgadas (Figura 4.5). La resistencia del alambre o de la lámina delgada cambia de longitud a medida que el material al cual esta soldada sufre tensiones o compresiones. Este cambio de resistencia es proporcional a la tensión aplicada y se mide con un puente de Wheatstone adaptado especialmente (Cooper, 1991; citado por Bonifaz, 2012).



**Figura (4.5) Muestra una galga extensiométrica**

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

Las siguientes rosetas pueden utilizarse en transductores de fuerza. Las galgas se conectan en un circuito puente de wheatstone para proporcionar una máxima salida. La figura (4.6) muestra diferentes rosetas de dos elementos:



**Figura (4.6): a) Láminas apiladas a 90°; b) Lámina plana a 90° y c) Lámina planas a 45°**

### **4.6.3. Puente de wheatstone**

El dispositivo eléctrico que es normalmente usado para medir  $\epsilon k = \frac{dR}{R}$  y para convertir esta medición de cambio de resistencia en deformación se utiliza el potenciómetro y el puente de Wheatstone como se muestra en la figura (4.7) el puente de Wheatstone puede determinar lecturas de galgas de tensión dinámica y elástica.

El voltaje de la excitación puede ser CA o DC, aquí solo DC es considerada.

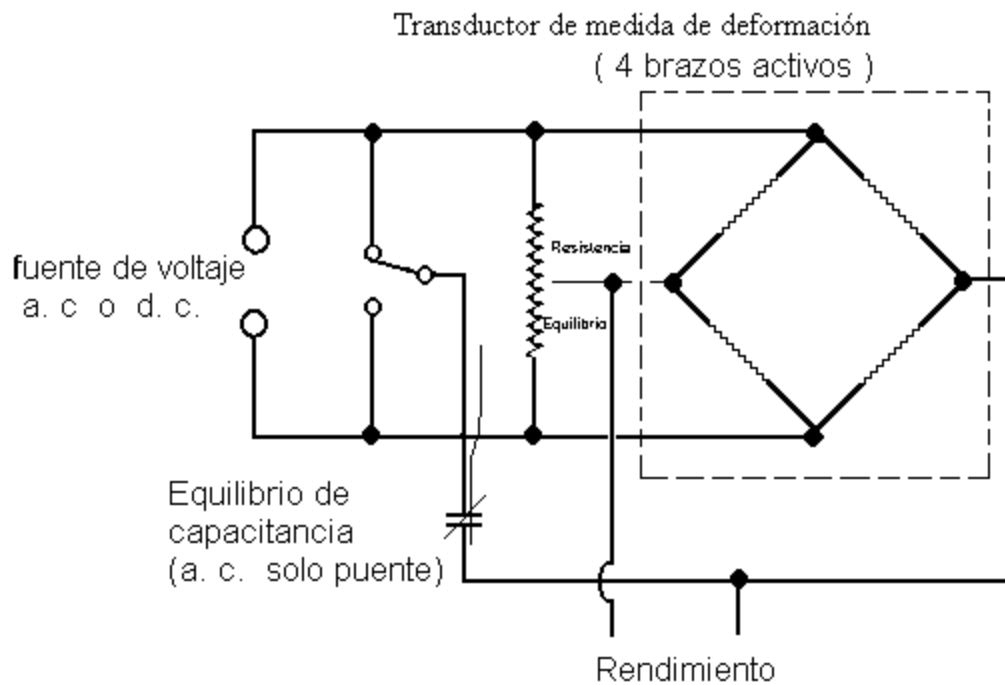


Figura (4.7). Puente de wheatstone (Goodwin, 1993).

De la figura anterior se puede desprender la ecuación (7).

$$V = \frac{(U)(FG)(n)(\epsilon)}{4} * Gain \dots \dots \dots (7)$$

Dónde:

V= Voltaje de salida esperado

U= Voltaje de excitación

N=Número de galgas activas



$\epsilon$ =Deformación

FG= Factor de galga

Gain= Ganancia

#### **4.7.Sistema de adquisición de datos**

Rogers y Johnston (1953) citado por Ozuna (2011) 68 indican la necesidad del procedimiento de datos de las fuerzas que actúan sobre los implementos. Usaron un cilindro de simple efecto para los brazos de enganche de tres puntos del tractor. Las líneas de presión de estos cilindros fueron ruta para las galgas montadas sobre un equipo. Durante la operación de este sistema el equipo fue fotografiado con una cámara de video de 16 cuadros. Aparentemente el procesamiento de datos para las fuerzas fue obtenido de un análisis de foto por foto de la filmación. Ellos fueron capaces de grabar las fuerzas en intervalos de distancias de 0.05 m. en el campo. Neuholff (1959) describe la técnica de cómo se puede usar un analizador de deformación y registrarla para medir la suma de dos fuerzas simultáneamente.

Campos *et al.*, (2000), describen la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización; en cuanto al hardware en varias investigaciones se puede identificar en todas y cada una de ellas, un sistema de acondicionamiento de señales provenientes de los sensores de fuerzas, un sistema convertidor analógico a digital y software para su funcionamiento (Moo, 1999). El anterior sistema permite reproducir en términos de energía lo que está sucediendo en interacción suelo herramienta. Moo (1999) desarrolló un sistema de adquisición de datos de laboratorio y campo que permite evaluar el desempeño de los implementos de labranza, además muestra el diseño de medidores de velocidad y desplazamiento. Campos (1993) menciona que dentro de la adquisición de datos de laboratorio comprende de un tanque de suelos el cual el sistema y los transductores se adaptan a éste. Y para el análisis de información proveniente de los procesos de muestreo (conversión analógica a digital) utilizando la metodología del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de potencia espectral.

Kheiralla and Azmi, (2002) desarrollaron un sistema completo de adquisición de datos de instrumentación y fue desarrollado e instalado en un tractor Massey Ferguson 3060, tractor agrícola para poder mapear la energía y la demanda energética en la operación en campos de agrícolas en Malasia. El sistema de instrumentación es capaz de medir y visualizar información sobre la velocidad del motor, la velocidad de toma de fuerza, velocidad de avance, deslizamiento de las ruedas de accionamiento, acres trabajado, el consumo de combustible por hora, el consumo de combustible por hectárea, acres por hora, factor de costo, combustible consumido, el combustible restante, y la distancia. Los ensayos de campo muestran que el sistema es capaz de funcionar con éxito sin dar mucho problema. Todos los sensores son capaces de escanear y grabar el registro de datos en los entornos hostiles de campo. En la figura (4.8) se muestra el diagrama de bloques en donde se ven los componentes del sistema de adquisición de datos.

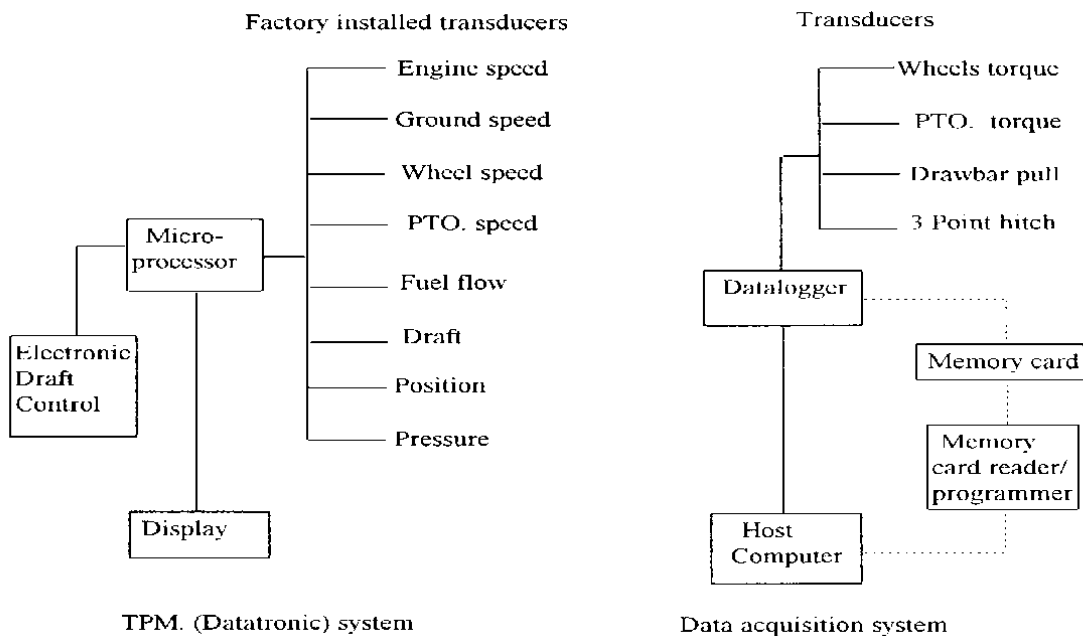


Figura. (4.8). Diagrama de bloques del sistema de instrumentación completo del tractor (Kheiralla and Azmi, 2002).

## V. MATERIALES Y METODOS

La metodología presentada en este capítulo consta de dos fases: evaluación en laboratorio y evaluación de campo.

La siguiente figura (5.1) muestra el diagrama que se desarrolló para realizar las evaluaciones y determinar la confiabilidad del sensor integral y el porcentaje de error entre mediciones en laboratorio y campo.

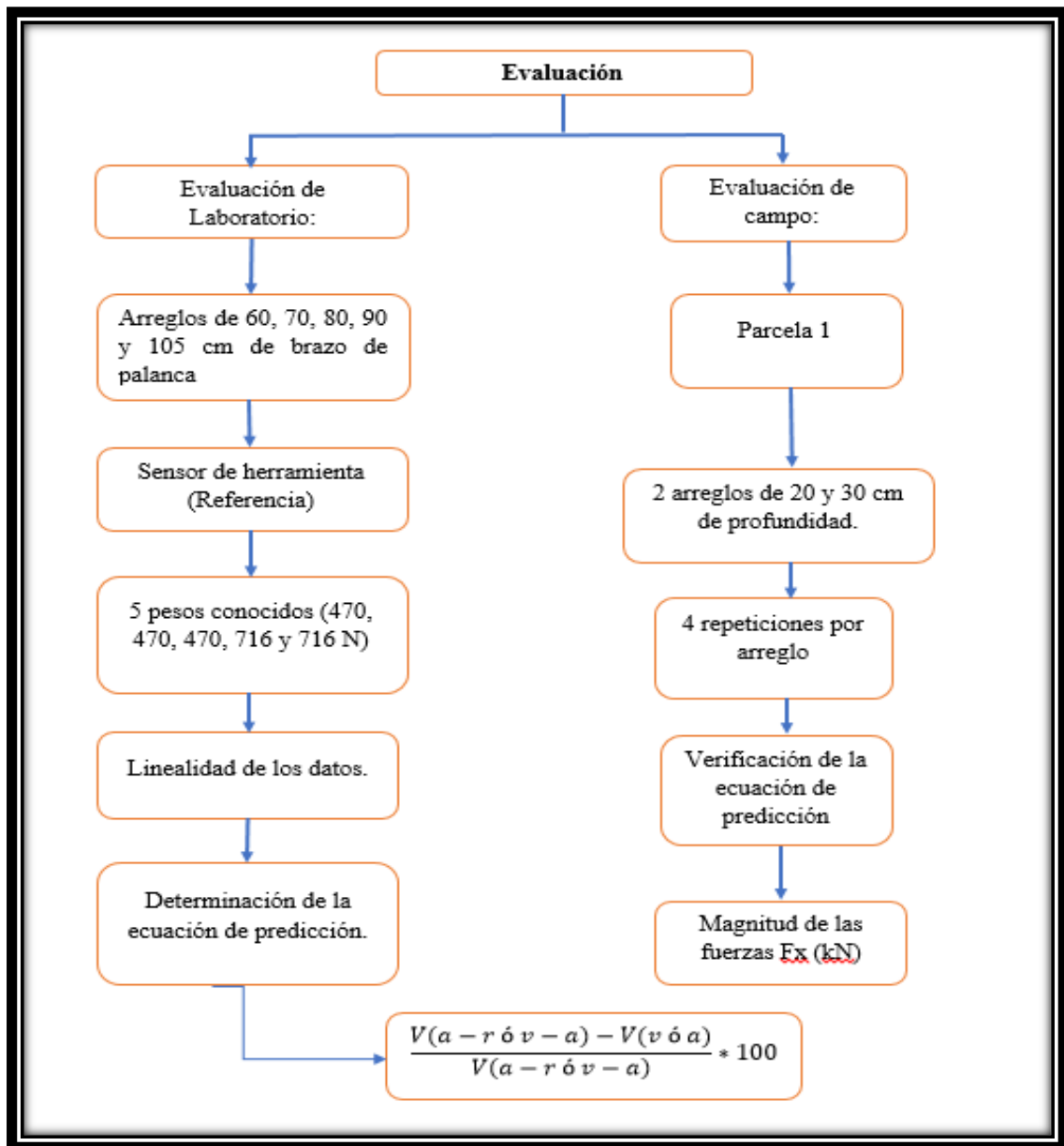


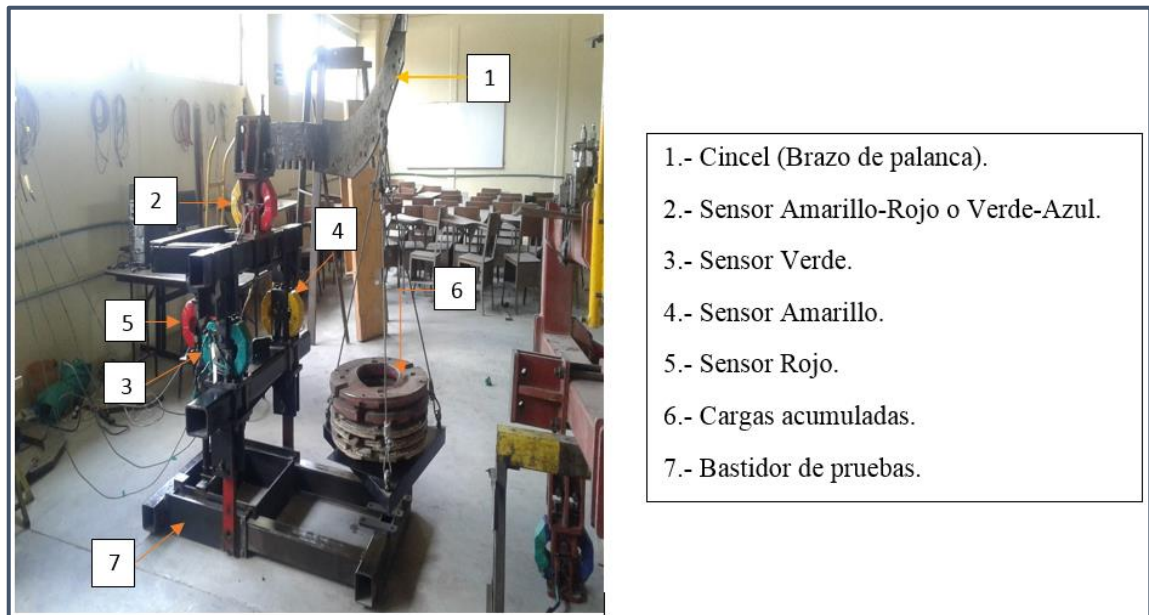
Figura. (5.1). Metodología para desarrollar las evaluaciones en laboratorio y en campo

## 5.1.Evaluación en laboratorio

La evaluación en laboratorio se llevó a cabo en las instalaciones del departamento de maquinaria agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Esta evaluación tuvo como propósito la determinación de la ecuación del error que existe en las mediciones de las fuerzas detectadas por los sensores Octagonales de Anillo Extendido (OAE) montados en el bastidor mostrado en la figura (5.2).

Al ser acoplado entre el tractor y un implemento del tipo integral. Las fuerzas reales de reacción del suelo. Se obtuvieron además las constantes de calibración para cada sensor con una carga máxima de 2,845 N integrada en cinco niveles (471.0, 942.0, 1413.0, 2129.0 y 2845.0 N) para cinco diferentes magnitudes de brazo de palanca (0.60, 0.70, 0.80, 0.90 y 1.05 m), simulando diferentes profundidades de laboreo, determinando las ecuaciones de calibración en función del cambio de posición de la fuerza resultante.



**Figura (5.2): Banco de prueba con los sensores acoplados de manera integral, donde se muestra el arreglo con la herramienta de trabajo.**

La secuencia de evaluación esta descrita por Campos *et al*,.. (2015) señalando la importancia de los ajustes a las constantes de los equipos de acondicionamiento de señales y la importancia del análisis de resultados empleando métodos estadísticos como el ANOVA y las ecuaciones de regresión para la obtención de las constantes de calibración.

Para el registro de las deformaciones de los sensores octagonales (OAE) se empleó el sistema de adquisición de datos Daqbook 2000 y el acondicionador de señales DBK43A, de la marca IOTECH. Se analizó la linealidad de los datos obtenidos de la cual se obtuvo una ecuación de predicción que nos permite estimar la fuerza de reacción del suelo en campo.

Los datos obtenidos para cada tratamiento fueron analizados y graficados empleando los software de Minitab V17 y el software de análisis estadísticos desarrollado por la Universidad Autónoma de Nuevo León, V3.1.

## 5.2.Evaluación en campo

Para la evaluación en campo se empleó un bastidor con tres cinceles que permiten el ajuste de profundidad de los mismos, además del sistema de adquisición de datos para el registro de información, mostradas en la figura (5.4). Las profundidades de laboreo fueron de 0.20, y 0.30m. Con el trabajo de campo se verifico la ecuación de correlación obtenida en la fase de laboratorio.

El error se determinó a la máxima carga tanto para los voltajes detectados en el sensor amarillo rojo y verde, estos valores se contrastaron con los voltajes de los sensores amarillo-rojo y verde-azul. Para este contraste se aplica la ecuación (8), también mostrada en la Figura (5.1)

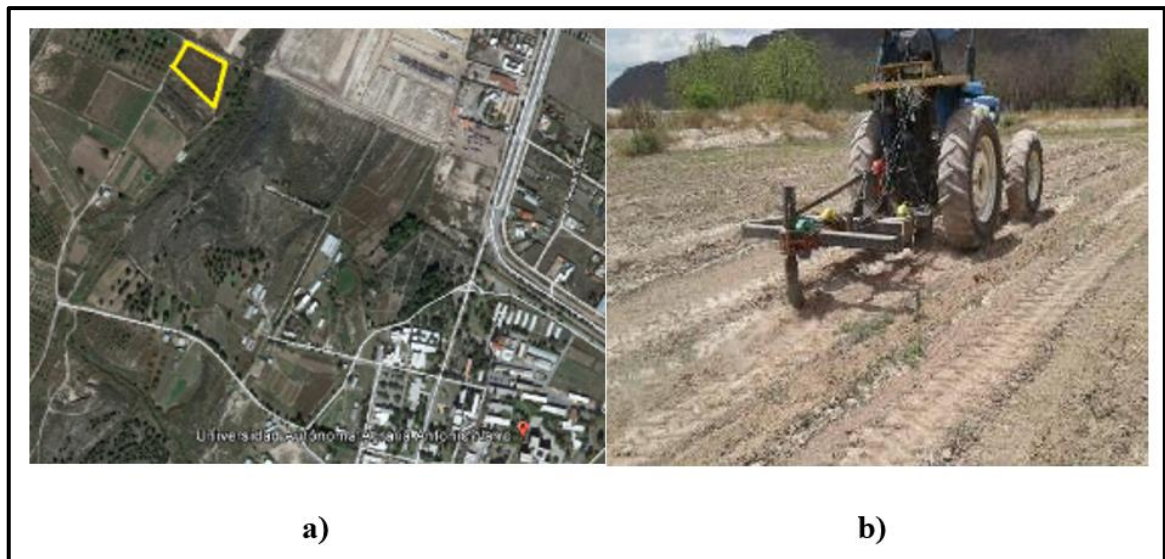
$$\frac{V(a-r \text{ ó } v-a)-v(v \text{ ó } a)}{v(a-r \text{ ó } (v-a))} * 100 \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

$V(a - r \text{ ó } v - a)$ = Voltaje del sensor amarillo-rojo ó del verde-azul

$V(v \text{ ó } a)$ = Voltaje del sensor verde ó amarillo.

La evaluación en campo se llevó a cabo en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el cual se conoce como bajío con coordenadas geográficas  $25^{\circ} 21.610'N$  latitud norte y  $101^{\circ} 2.258'O$  longitud Oeste,

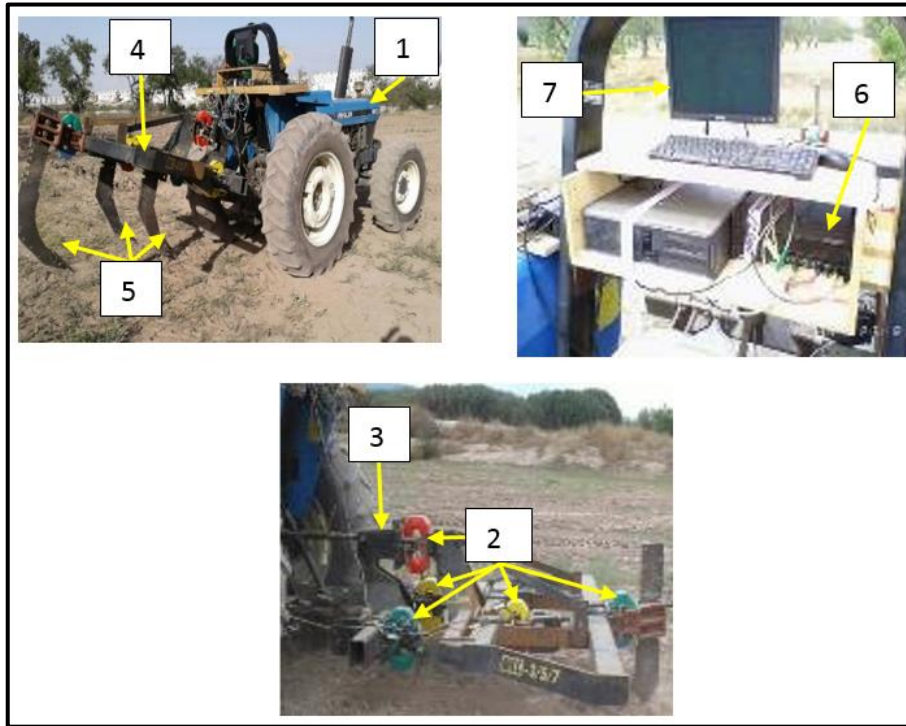


**Figura (5.3): a) Imagen satelital de la parcela de evaluación. b) Evaluación realizada en el campo experimental el bajío.**

Los materiales y equipos que se utilizaron para la evaluación bajo condiciones de campo se enlistan y se muestran a continuación en conjunto con la figura (5.4)

- 1) Tractor New Holland 6810 4WD.
- 2) Sensores octagonales de anillo extendido. (rojo, verde, amarillo, verde-azul y rojo-amarillo).
- 3) Estructura flotante.
- 4) Bastidor de implemento BISON.
- 5) Cinceles de corte de 0.70 m y 0.90 m de largo
- 6) Módulo de adquisición de datos Daq-Book 2000.
- 7) Computadora de escritorio.

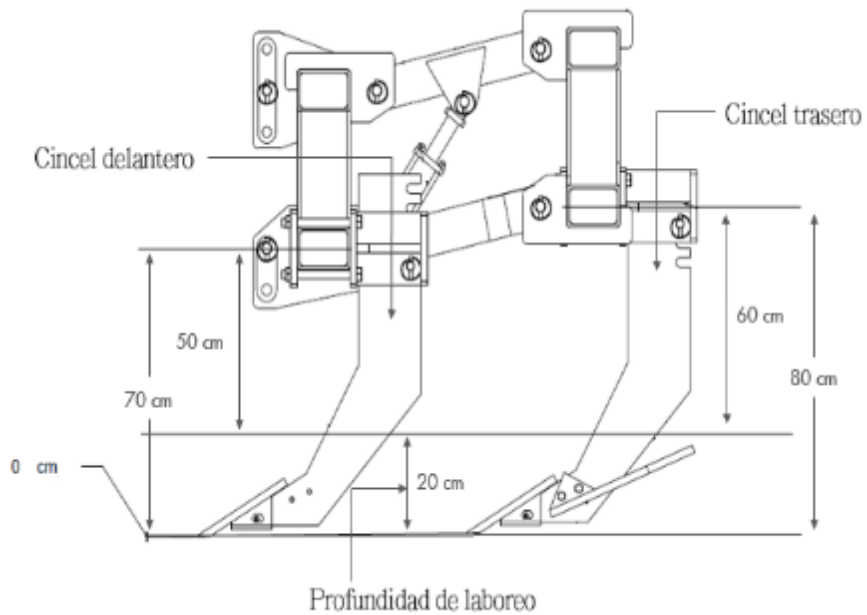
8) Inversor de voltaje de 120 V-12V AC marca STEREN.



**Figura (5.4). Equipos utilizados para la evaluación en campo.**

Los arreglos de evaluación para verificar la confiabilidad del sensor integral se hicieron con tres cinceles estos fueron colocados en un bastidor rígido y con un implemento articulado, como se muestra en la Figura (5.5). Los arreglos fueron de dos cinceles frontales y un cincel trasero. Las profundidades de trabajo fueron de 0.20 y 0.30 m.

En la misma figura (5.5) se muestra el arreglo a una profundidad tanto del cincel trasero como los cinceles frontales trabajando a 0.20 m de profundidad en el suelo.



**Figura (5.5) Arreglo del implemento para realizar un laboreo a 0.20 m de profundidad**

En las evaluaciones bajo condiciones de campo se definieron arreglos que constan de: número de cincelos, posición y profundidad de laboreo. En la parcela se plantearon 2 arreglos de trabajo para 2 niveles de profundidad con cuatro repeticiones por nivel con una distancia de trabajo de 80 m. Las variables que se consideraron para la estimación del error fue la magnitud de los voltajes en cada uno de los cinco sensores de fuerza que integran el equipo de evaluación.

Para el análisis de resultados se empleó el método espectral y el de energía descrito por Campos *et al.*,(2015)



## VI. RESULTADOS

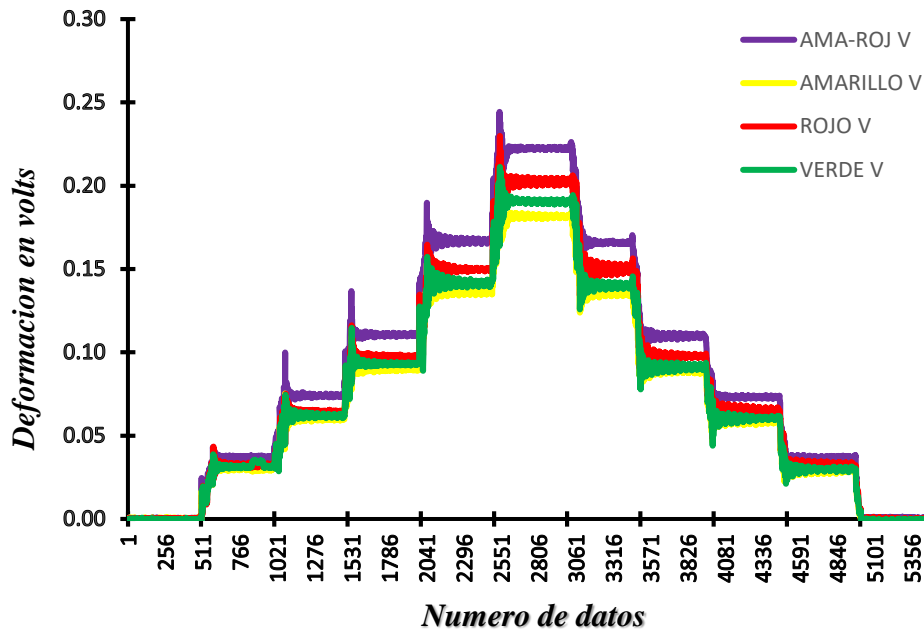
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos correspondientes a la evaluación realizada en campo y en laboratorio

### 6.1.Resultados en laboratorio

La evaluación en laboratorio tuvo como propósito la determinación de la ecuación del error que existe en las mediciones de las fuerzas detectadas por los sensores Octagonales de Anillo Extendido (OAE) montados en el bastidor (figura 5.2.), al ser acoplado entre el tractor y un implemento del tipo integral y las fuerzas reales de reacción del suelo. Se obtuvieron además las constantes de calibración para cada sensor con una carga máxima de 2,845 N para cinco diferentes brazos de palanca (0.60, 0.70, 0.80, 0.90 y 1.05 m), simulando diferentes profundidades de laboreo, determinando las ecuaciones de calibración en función del cambio de posición de la fuerza resultante.

La figura (5.2) muestra el banco de pruebas con los sensores, simulando el trabajo que se realiza en campo. Los tres sensores (verde [3], amarillo [4] y rojo [5]) acoplados a los tres puntos de enganche del tractor y el sensor rojo-amarillo [2], acoplado a un cincel con una carga en el extremo simulando la profundidad de trabajo dentro del suelo de la herramienta de trabajo [1]. Y en campo mide la fuerza real de roturación del suelo en forma individual.

Un ejemplo del comportamiento de la deformación obtenida por los sensores para un brazo de palanca de 0.60 m con 5 niveles cargas (471.0, 942.0, 1413.0, 2129.0 y 2845.0 N) se muestran en la Figura (6.1):



**Figura (6.1).** Efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE, en voltaje, para un brazo de palanca de 0.60 m.

En este ejemplo, figura (6.1) se muestra el comportamiento del voltaje de los 3 sensores que integran el transductor integral, para un brazo de palanca de 0.60 m con una carga máxima de 2,845.0 N contrastándolo con el sensor Testigo amarillo-rojo [2] el cual simula la magnitud de la fuerza de trabajo de la herramienta de labranza [1].

En la misma figura (6.1) se muestran las magnitudes en voltaje (V) de las cargas y descargas de los pesos acumulados que fueron detectados por los sensores. Se observa un comportamiento similar entre el sensor amarillo [4] y el sensor verde [3], lo que indica que tiene una misma deformación al detectar la fuerza horizontal que representa la fuerza de tiro, además se aprecia que la magnitud del voltaje del sensor (Amarillo-Rojo [2]), acoplado directamente a la herramienta [1], es ligeramente mayor que el voltaje en los sensores amarillo [4] y verde [3].

Las gráficas correspondientes para los brazos de palanca (0.70, 0.80, 0.90 y 1.05 m) se muestran en el ANEXO (A.1). En los resultados contenidos en el mismo anexo se observó el mismo comportamiento de incremento de la magnitud del voltaje con respecto al incremento de la magnitud de la carga para los sensores Amarillo-Rojo [2] y Verde-Azul [2] con respecto a los

sensores individuales verde [3] y amarillo [4]. Se observó que para cada brazo de palanca hay una diferencia en la magnitud del voltaje detectado.

Para los datos encontrados en las repeticiones y tratamientos de brazo de palanca en el cuadro (5.1) se puede observar los promedios encontrados de los cuales se realizó un análisis de varianza para ver si existe un efecto entre repeticiones y brazos de palanca.

El análisis de varianza de las respuestas de los sensores a la magnitud de los 5 brazos de palanca a diferentes cargas se muestra en el Cuadro (5.1). Los resultados indican que existe diferencia significativa en el monitoreo de las fuerzas producto de la magnitud del brazo de palanca no así en la magnitud de fuerzas detectadas por cada sensor (amarillo [4] y verde [3]) para una misma posición del brazo de palanca equivalente a la profundidad de laboreo. El valor medio máximo detectado en los sensores (verde [3] y amarillo [4]) fue de 0.278 V para un brazo de palanca de 1.05 m con una carga máxima de 2845.0 N.

**Cuadro 5.1: Análisis de varianza para los dos sensores verde, amarillo y posición de brazo de palanca.**

	[FV]	[GL]	[SC]	[CM]	[Fc]	[Sig.]
<b>Brazo de Palanca</b>		4	0.045	11236.817	62.728	0.000
<b>Sensor</b>		1	0.150	0.150	0.001	0.977
<b>Brazo de Palanca x Sensor</b>		4	30.600	7.650	0.043	0.966
<b>Error</b>		50	8956.833	179.137		
<b>Total</b>		59	53934.850			

[FV]: Fuente variación, [GL]: Grados de libertad, [SC]: Suma de cuadrados, [CM]: Cuadrado medio, [Fc]: F calculada, [Sig.]: Significancia a un 95 %.

El análisis de varianza del Cuadro (5.1), se realizó con un diseño factorial AXB con una distribución al azar, analizado con el software estadístico de la Universidad Autónoma de Nuevo León V1.4.

El anexo (A.2) se muestra los resultados con los voltajes obtenidos por los sensores para cada uno de los 5 brazos de palanca con una carga máxima de 2,845.0 N.

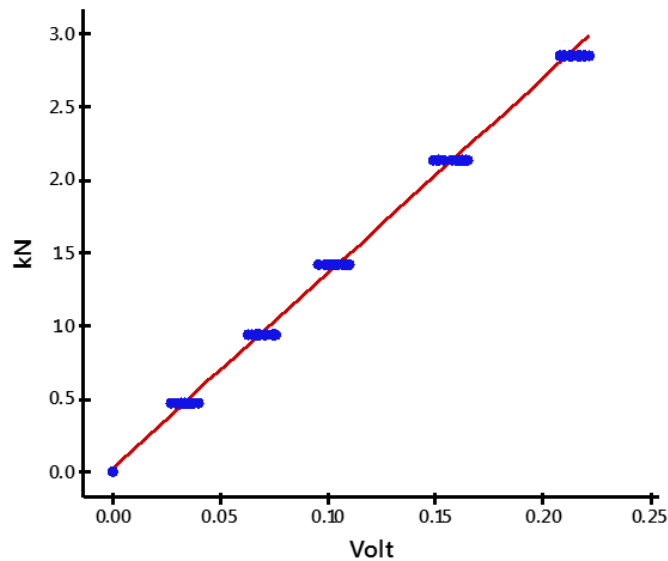
El cuadro (5.2) muestra las medias de las 6 repeticiones en cada una de las posiciones de los brazos de palanca para los sensores amarillo [4] y verde [3]. La comparación múltiple de medias utilizando el método de Tukey, muestra diferencias significativas de las magnitudes de los voltajes en su respuesta por efecto de posiciones de los brazos de palanca. Lo cual indica que la posición de la carga afecta la magnitud de las mediciones de los voltajes.

**Cuadro 5.2: Comparación de medias de los voltajes de respuestas obtenidas con 5 diferentes brazos de palanca para una carga de 2,845.0 N.**

<b>Brazo de palanca</b>	<b>Media de la respuestas</b>	
m	Volt	
1.05	0.278	a
0.90	0.247	b
0.80	0.239	b
0.70	0.215	c
0.60	0.198	d

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

En la Figura (6.2) se muestra un ejemplo de la gráfica resultante de la regresión lineal entre las cargas (N) y los voltajes (V), obteniendo una constante de calibración de  $13.36 \text{ kN V}^{-1}$ , con un coeficiente de determinación de 99.7%, para un brazo de palanca de 0.70 m. Esta linealidad en los datos indica una relación altamente significativa de deformación entre los pesos conocidos (N) y los voltajes (V) obtenidos por los sensores para una profundidad fija de trabajo. Todos los análisis de regresión lineal para obtener las constantes de calibración, se llevaron a cabo con el software estadístico Minitab V.17. La base de datos completa para los diferentes brazos de palanca se muestra en el anexo (A.3).



**Figura (6.2). Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 0.70 m con una  $R^2$  ajustada del 99.7%.**

Todos los análisis de regresión lineal de los sensores Amarillo [4] y Verde [3] muestran un coeficiente de correlación mayor al 95%, todas las gráficas obtenidas se muestran en el anexo (A.3)

### **Constante de calibración**

En el Cuadro (5.3) se muestra el análisis de varianza para las constantes obtenidas de los sensores amarillo [4] y verde [3] por efecto del cambio de las magnitudes de las cargas y brazos de palanca. Se muestra que no existe diferencia significativa en la medición de los voltajes generados entre los sensores verde [3] y amarillo [4] para cada posición específica de brazo de palanca. Para el factor de las magnitudes del brazo de palanca, sí existe diferencia significativa de los sensores verde [3] y amarillo [4] contra los sensores de referencia verde-azul [2] y amarillo-rojo [2] lo cual confirma que la magnitud del brazo de palanca afecta la medición real detectada por los sensores verde [3] y amarillo [4].

El análisis de varianza del Cuadro (5.3), se realizó con un diseño factorial AXB con una distribución completamente al azar, analizado con el software estadístico de la Universidad Autonom de Nuevo León. V 3.1

**Cuadro 5.3: Análisis de Varianza para las constantes de los sensores amarillo [4] y verde [3] en cinco posiciones de brazo de palanca para un total de 12 repeticiones por posición de la carga.**

	[FV]	[GL]	[SC]	[CM]	[Fc]	[Sig]
<b>Brazo de Palanca</b>		4	114.46	28.62	47.32	0.000
<b>Sensores</b>		1	0.033	0.033	0.054	0.817
<b>Brazo de palanca x Sensores</b>		4	0.341	0.085	0.141	0.966
<b>Error</b>		50	30.23	0.605		
<b>Total</b>		59	145.07			

[FV]: Fuente variación, [GL]: Grados de libertad, [SC]: Suma de cuadrados, [CM]: Cuadrado medio, [Fc]: F calculada, [Sig.]: Significancia a un 95 %.

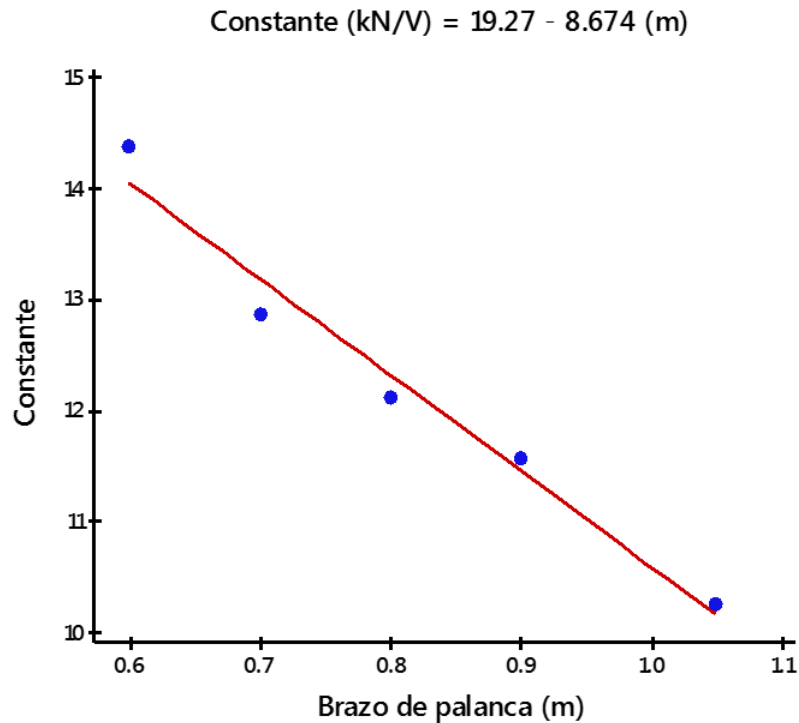
El cuadro (5.4) muestra el contraste de medias para las posiciones de los brazos de palanca, se observa que existe diferencia significativa entre las constantes para las posiciones de los brazos de palanca. Así también se observa un coeficiente de correlación superior al 95 % en todas las posiciones de brazo de palanca. El análisis de regresión lineal para las constantes de los sensores verde y amarillo se muestran en el anexo (A.3)

**Cuadro 5.4: Concentrado de constante para los 5 diferentes brazos de palancas de calibración en los sensores verde [3] y amarillo [4].**

<b>Brazo de palanca</b>	<b>R-cuad.(Ajustada)</b>	<b>Constante</b>	
m	%	kN V <sup>-1</sup>	
1.05	98.4	10.04	a
0.9	99.9	11.56	b
0.8	98.4	11.72	b
0.7	99.7	13.36	c
0.6	98.6	14.13	d

† Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

El comportamiento de los valores de las constantes obtenidas se observa en la figura (6.3). Se muestra que para un brazo de palanca de 0.70 m la constante correspondiente es de 13.15 kN V<sup>-1</sup> mientras que para el brazo de palanca de 0.90 m la constante correspondiente es de 11.42 kN V<sup>-1</sup>.



**Figura (6.3).** Grafica de regresión lineal de las constantes en cada posición del brazo de palanca.

La información completa de las constantes obtenidas para cada posición de brazo de palanca se encuentra en el anexo (A.4).

### **Estimación del error**

El Cuadro (5.5) muestra el porcentaje de error detectado entre la media de los voltajes de los sensores amarillo [4] y verde [3] con respecto a la media de los voltajes de los sensores verde-azul [2] y rojo-amarillo [2] para una carga máxima de 2,845.0 N. Este error se va incrementando o reduciendo para los brazos de palanca menores y mayores a 0.90 m respectivamente. El análisis a detalle de la información se muestra en el Anexo (A.5).

Campos *et. al.*, (2015) detectaron en evaluaciones de laboratorio y campo errores similares, sin mencionar las causas del mismo y las correcciones a este problema, lo cual dio origen a la realización de esta investigación.

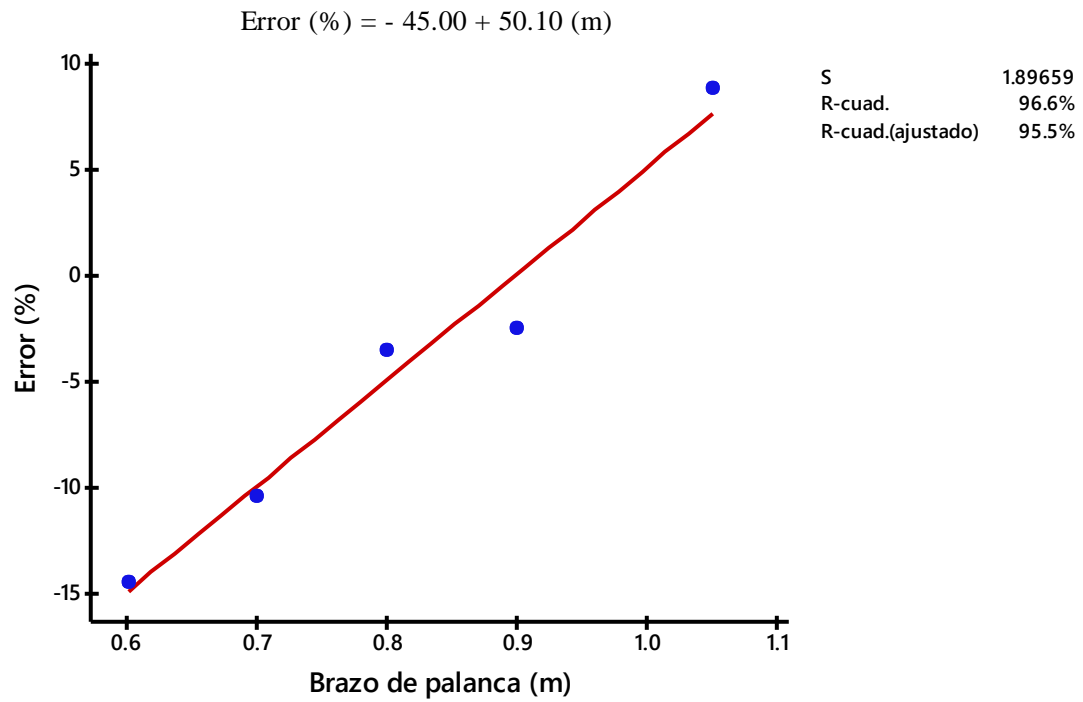
**Cuadro 5.5. Magnitud del error en las diferentes posiciones de los brazos de palanca entre la media de voltajes de los sensores verde [3] + amarillo [4] Vs media de los sensores (verde-azul) [2] + (amarillo-rojo) [2].**

<b>Brazo de palanca</b> m	<b>[A]</b> Volt	<b>[B]</b> Volt	<b>Error</b> %
0.60	0.198	0.231	-14.459
0.70	0.215	0.240	-10.454
0.80	0.240	0.249	-3.506
0.90	0.247	0.253	-2.518
1.05	0.278	0.255	8.823

[A]: media de la suma de los voltajes de sensores Verde +Amarillo, [B]: media de la suma de los voltajes de los sensores (Verde-Azul) + (Rojo-Amarillo).

La figura (6.4) muestra el comportamiento de la tendencia lineal del porcentaje del error para cada posición de los brazos de palanca. Se aprecia claramente que para un cero por ciento de error en la medición de la fuerza resultante la profundidad de trabajo debería de ser 0.90 m. Lo cual indica que para brazos de palanca menores a 0.90 m el equipo detecta *menor magnitud de voltaje* que los detectados por los sensores *verde-azul*[2] y *amarillo-rojo*[2] sobre los cuales van montados las herramientas de trabajo. Para magnitudes del brazo de palanca mayores a 0.90 m los sensores amarillo[4] y verde [3] incrementan el valor de la fuerza detectada en comparación con los sensores de referencia (verde-azul [2] o amarillo-rojo [2]). Godwing (2007) evaluó herramientas de trabajo de laboreo de suelos, con sensores con doble empotramiento, encontrando que no existe diferencia significativa entre las magnitudes de las fuerzas detectadas por efecto del cambio de posición de la fuerza resultante





**Figura (6.4): Gráfica de regresión del error para cada brazo de palanca**

## 6.2.Resultados en campo

En la figura (6.5) se muestra el arreglo del equipo para trabajo en campo donde se aprecia el implemento [1] con un arreglo de tres cinceles, el sensor integral [2], los sensores octagonales individuales [3] para medir la fuerza por herramienta de trabajo.

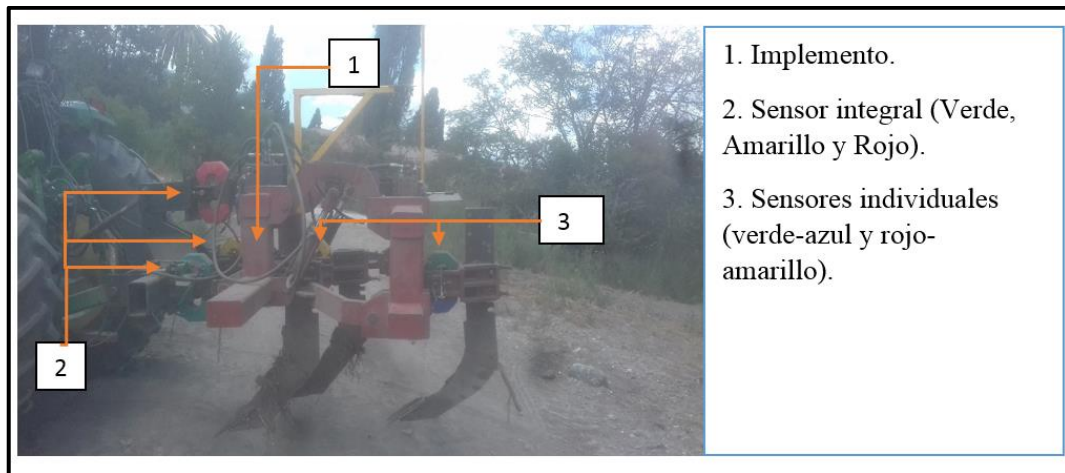


Figura (6.5): elementos utilizados en la prueba de campo

### 6.2.1. Arreglo 0.20m – 0.20m

En la figura (6.6) se muestra la gráfica integrada por la suma de dos veces la magnitud de la deformación en volts del sensor amarillo-rojo [2] con la magnitud del sensor verde-azul [2] contrastándolo con el promedio de la magnitud (V) de los sensores verde [3] + amarillo [4]. Para una profundidad de 0.20m.

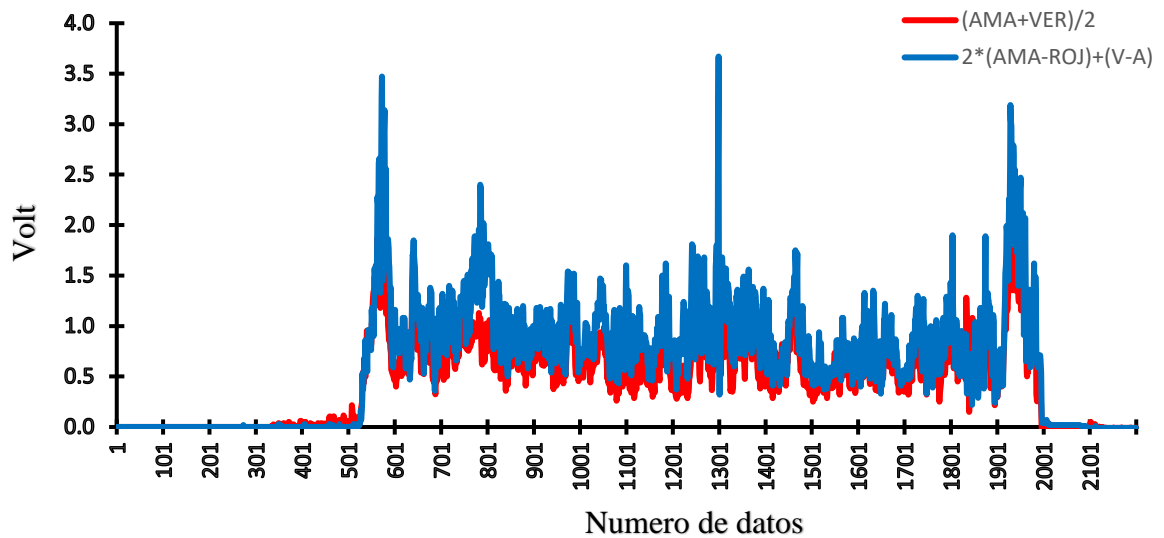
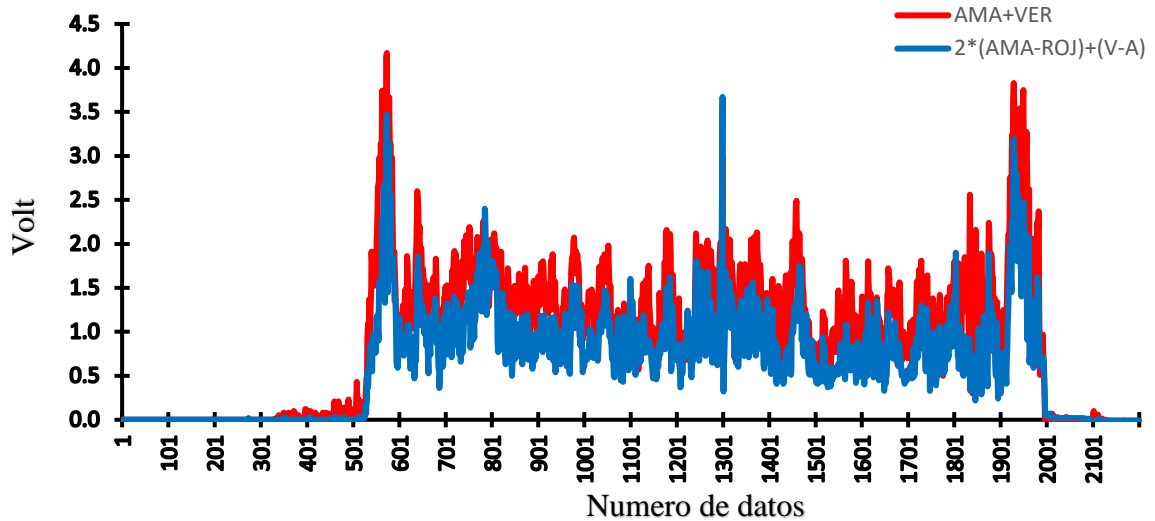


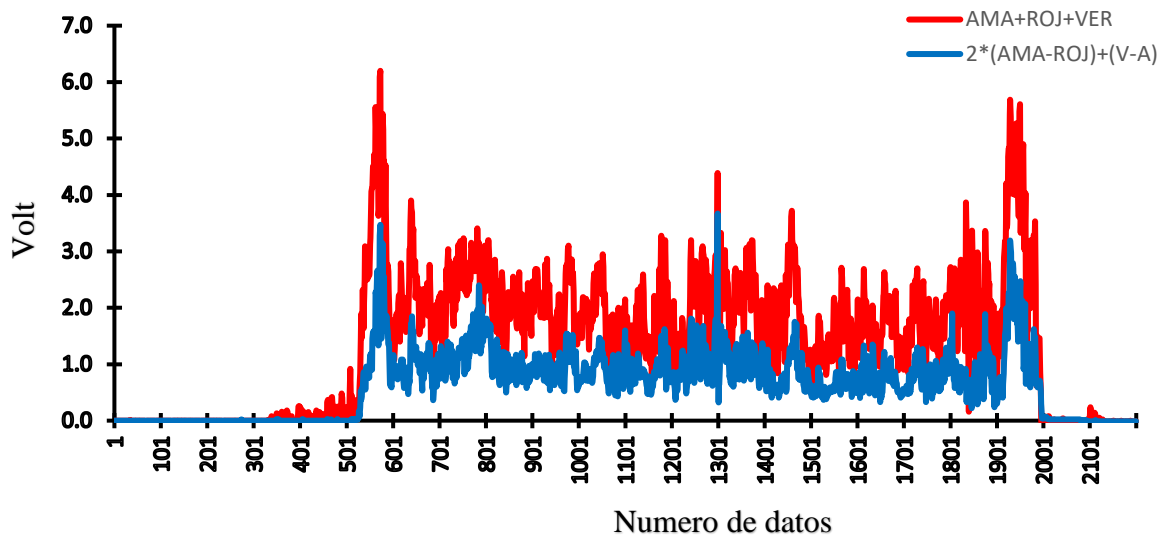
Figura (6.6): grafica de respuesta en campo del arreglo de dos cincelos frontales y un cincel trasero sin alas a 0.20 m de profundidad.

En la figura (6.7) se muestra la gráfica integrada por la suma de dos veces la magnitud de la deformación en volts del sensor amarillo-rojo [2] con la magnitud del sensor verde-azul [2] contrastándolo con la suma de las deformaciones (V) de los sensores verde [3] + amarillo [4].



**Figura (6.7):** Grafica de respuesta en campo de dos cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero sin alas a 0.20 m de profundidad.

En la figura (6.8) se muestra la gráfica integrada por la suma de dos veces la magnitud de la deformación en (V) del sensor amarillo-rojo con la magnitud del sensor verde-azul contrastándolo con la suma de las deformaciones (V) de los sensores verde [3] + amarillo [4] + rojo [5].



**Figura (6.8):** Grafica de respuesta en campo de dos cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero sin alas a 0.20 m de profundidad.

Para una profundidad de trabajo de 0.20 m en ambos cinceles, frontales y trasero, Se aprecia que el arreglo que mejor predice la magnitud real de la fuerza de reacción del suelo es el promedio de los voltajes de los sensores amarillo [4] + verde [3] comparado con la suma de 2 veces el amarillo-rojo [2] + el verde-azul [2]. Con un porcentaje de error de predicción del 37.5 al 27.5 previo a la aplicación del factor de corrección del 10% obtenido bajo condiciones de laboratorio, lo cual subestima hasta un 17.6% la magnitud de la fuerza bajo condiciones de campo como se puede apreciar en el cuadro (5.6). y el cuadro (5.7)

**Cuadro 5.6:** Resumen de los voltajes obtenidos por el método espectral de las combinaciones de los sensores para una profundidad de trabajo de 0.20 m en los cinceles frontales y un cincel traseros a 0.20 m sin alas.

Rep.	[A]	[B]	[C]	[D]	Error	Error con 10%
	Volt	Volt	volt	volt		%
1	0.69	1.39	2.06	1.03	32.71	22.78
2	0.62	1.24	1.80	0.99	37.55	27.62
3	0.76	1.51	2.23	1.04	27.59	17.66
4	0.62	1.23	1.80	0.87	29.33	19.40

[A]: (Amarillo+Verde)/2, [B]: Amarillo+Verde, [C]: Amarillo+Rojo+Verde, [D]: 2\*(Ama-Roj)+(Ver-Azul).

**Cuadro 5.7: Resumen de los voltajes obtenidos por el método de energía de las combinaciones de los sensores para una profundidad de trabajo de 0.20 m en los cinceles frontales y un cincel trasero a 0.20 m.**

<b>zRep.</b>	<b>[A]</b>	<b>[B]</b>	<b>[C]</b>	<b>[D]</b>	<b>Error</b>	<b>Corrección</b>
	Volt	Volt	Volt	Volt	%	-10%
1	868.7	1737.5	2604.9	1314.5	33.9	23.9
2	818.9	1638.0	2411.5	1241.0	34.0	24.0
3	1025.2	2043.3	3030.6	1411.6	27.3	17.3
4	968.7	1929.6	2843.0	1333.1	27.3	17.3

[A]: (Amarillo+Verde)/2, [B]: Amarillo+Verde, [C]: Amarillo+Rojo+Verde, [D]: 2\*(Ama-Roj)+(Ver-Azul)

El error mostrado en los cuadros (5.6) y (5.7) se estimó con la siguiente relación:

$$Error = \frac{D - A}{D} * 100$$

Los métodos de análisis, espectral y el de energía, para la estimación de predicción del porcentaje de error entre el sensor integral y los sensores individuales, no presentan diferencias sustantivas en la estimación del ANOVA presentando ambas estimaciones del error en el orden del 17.3%.

El análisis de varianza se encuentra en el Anexo (C1), el diseño estadístico fue por bloques al azar con dos factores y cuatro repeticiones por factor (espectral y área bajo la curva), con una confiabilidad del 95%.

### **6.2.2. Arreglo 0.30m – 0.30m.**

En la figura (6.9) se muestra la gráfica del arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 m y un cincel trasero a 0.30 integrada por la suma de dos veces la magnitud de la deformación en volts del sensor amarillo-rojo [2] con la magnitud del sensor verde-azul [2] contrastándolo con el promedio de los sensores verde [3] +amarillo [4].

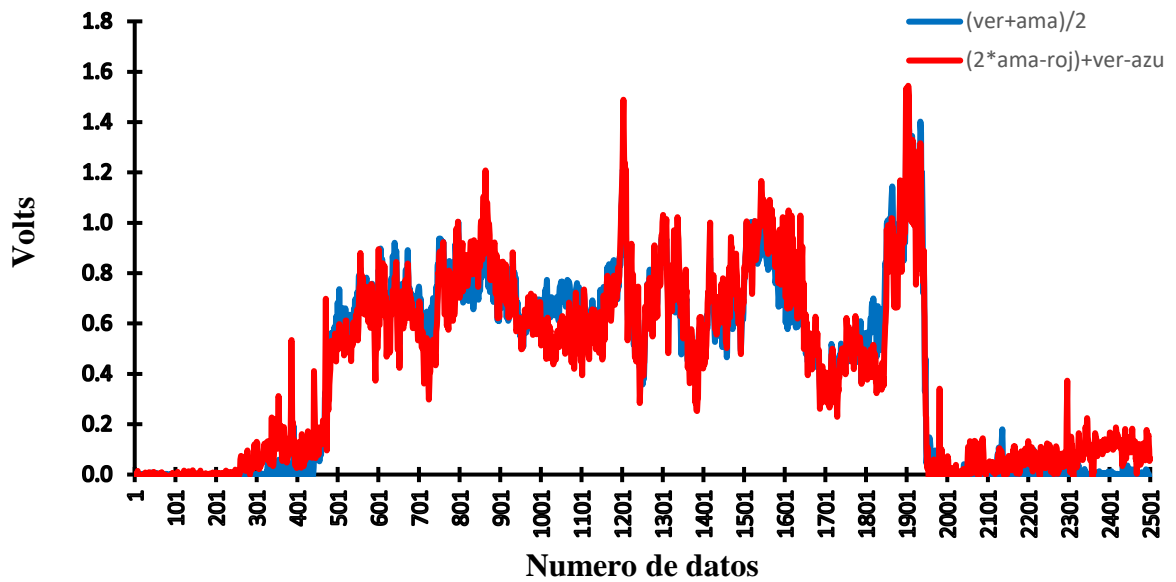


Figura (6.9): Grafica de respuesta en campo que muestra el arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 m y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad.

En la figura (6.10) se muestra la gráfica integrada por la suma de dos veces la magnitud de la deformación en (V) del sensor amarillo-rojo [2] con la magnitud del sensor verde-azul [2] contrastándolo con la suma de las deformaciones (V) de los sensores verde [3] +amarillo [4].

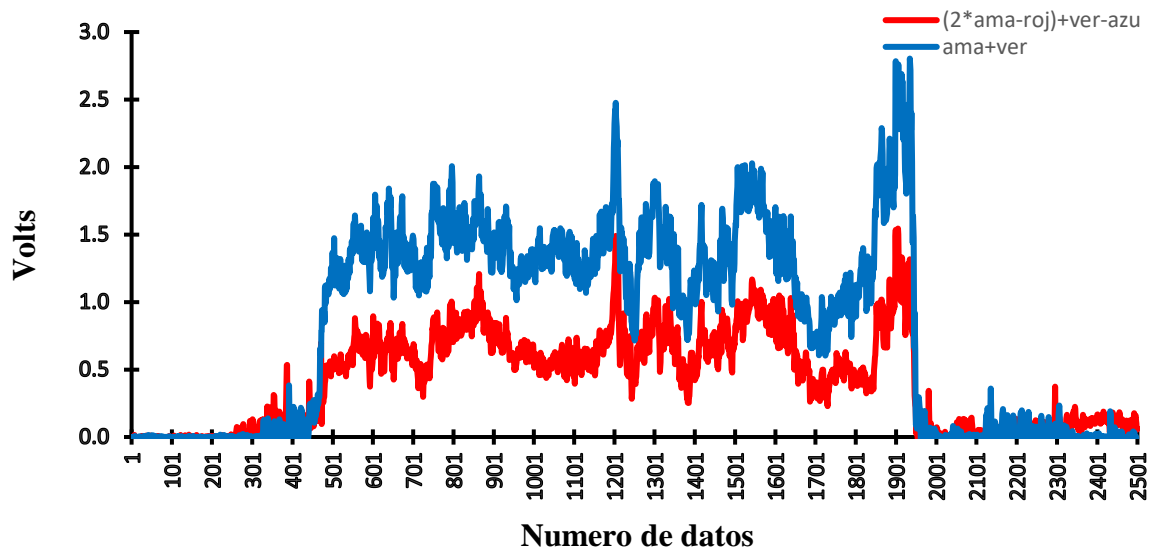
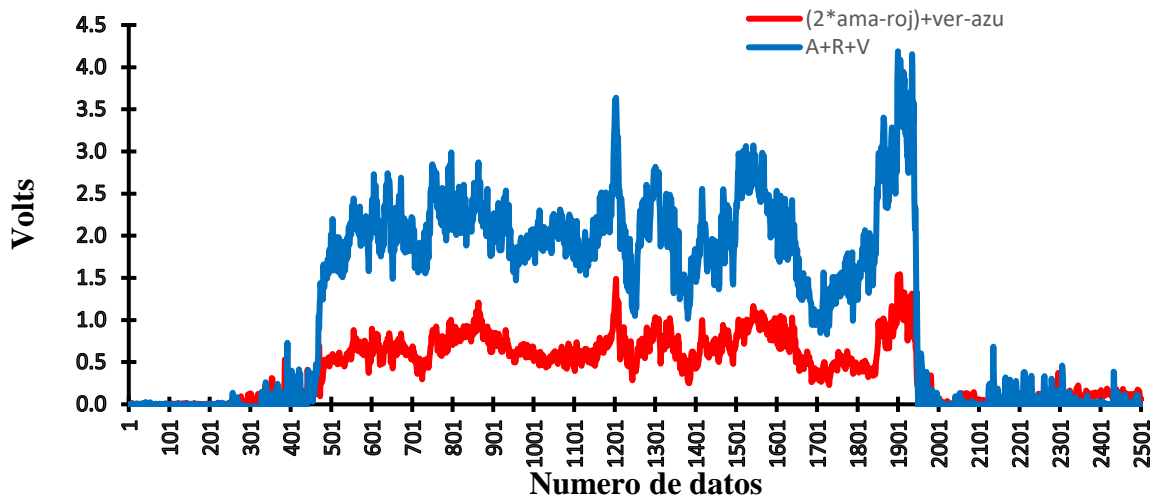


Figura (6.10): Arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad.

En la figura (6.11) se muestra la gráfica integrada por la suma de dos veces la magnitud de la deformación en (V) del sensor amarillo-rojo [2] con la magnitud del sensor verde-azul [2] contrastándolo con la suma de las deformaciones (V) de los sensores verde [3] + amarillo [4] + rojo [5]. para un arreglo de trabajo de dos cinceles delanteros a 0.30 m y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad.



**Figura 6.11: Arreglo de dos cinceles delanteros a 0.30 m y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad.**

Para una profundidad de trabajo de 0.30 m en ambos cinceles, frontales y trasero, Se aprecia que el arreglo que mejor predice la magnitud real de la fuerza de reacción del suelo es el promedio de los voltajes de los sensores amarillo [4] + verde [3] comparado con la suma de 2 veces el amarillo [2] -rojo + el azul-verde [2]. Con un de error de predicción del 1.70 al 22.42% previo a la aplicación del factor de corrección del 10% obtenido bajo condiciones de laboratorio, lo cual disminuye la estimación hasta un 0.0 % de error bajo condiciones de campo como se puede apreciar en los cuadros (5.8 y 5.9).

**Cuadro 5.8: voltajes obtenidos por el método espectral para una profundidad de trabajo de 0.30 m en dos cinceles frontales y un cincel trasero a 0.30 m sin alas.**

<b>Rep.</b>	<b>[A]</b>	<b>[D]</b>	<b>[C]</b>	<b>[D]</b>	<b>Error</b>	<b>Error con 10% de corrección</b>
	Volt	Volt	Volt	Volt	%	%
1	0.989	1.979	3.027	0.8672	14.09	4.09
2	0.783	1.566	2.381	0.8296	-5.62	0.0
3	0.687	1.374	2.084	0.6754	1.70	0.0
4	0.829	1.657	2.481	0.6768	22.42	12.42

[A]: (Amarillo+Verde)/2, [B]: Amarillo+Verde, [C]: Amarillo+Rojo+Verde, [D]: 2\*(Ama-Roj)+(Ver-Azu)

**Cuadro 5.9: Resumen de los voltajes obtenidos por el método de energía de las combinaciones de los sensores para una profundidad de trabajo de 0.30 m en los cinceles frontales y un cincel trasero a 0.30 m sin alas.**

<b>Rep.</b>	<b>[A]</b>	<b>[D]</b>	<b>[C]</b>	<b>[D]</b>	<b>Error</b>	<b>Corrección</b>
	Volt	Volt	Volt	Volt	%	-10%
1	1080.6	2161.20	3315.70	906.0	19.2	9.26
2	1025.4	2005.60	3038.40	1000.2	2.5	0.00
3	742.5	1585.10	2546.50	669.01	10.9	0.99
4	1150.6	2301.2	3555.80	899.0	27.9	17.98

[A]: (Amarillo+Verde)/2, [B]: Amarillo+Verde, [C]: Amarillo+Rojo+Verde, [D]: 2\*(Ama-Roj)+(Ver-Azu)

Los métodos de análisis, espectral y energía, para la estimación de predicción del porcentaje de error entre el sensor integral y los sensores individuales, no presentan diferencias significativas en la estimación presentando ambos errores alrededor 0.0 % como se muestran en los cuadros (5.9) y (5.10).

El análisis de varianza para el método espectral y de energía para el porcentaje de error indica que no existe diferencias significativas entre ambas mediciones, el análisis se muestra en el Anexo (C.2). el diseño estadístico fue por bloques al azar con cuatro repeticiones por cada factor (espectral y área bajo la curva), con una confiabilidad del 95%.



## **VII. CONCLUSIONES**

- La calibración de los sensores del dinamómetro muestran una linealidad superiores al 99%
- El dinamómetro se ve afectado por la profundidad de laboreo obteniendo estimaciones entre el 13 y 40% de error.
- No existe diferencia significativa en la utilización de los métodos de análisis para la medición de fuerza en campo

## VIII. BIBLIOGRAFIA

- Agamennoni, R. 1996. Rotaciones y labranzas en la región semiárida bonaerense sur. En Labranzas en la Región Semiárida Argentina. D. Buschiazzo, J. Panigatti y F. Babinec. Ed. INTA CERLAP- San Luis.
- Al-Jalil, H. F., Khdair, A., and Mukahal, W. (2001). Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. *Soil and Tillage Research* 62: 153-156.
- Afzalnia, S. y M. Roberge. 2009. An Extended Octagonal Ring Transducer for the Compression Chamber of a Large Square Baler, *J. Agr. Sci. Tech.* Vol. 11: 377-389 pp.
- Barber, R.G., Navarro, F. y Orellana, M. 1993. Labranza Vertical. Centro de Investigación Agrícola Tropical, Misión Británica en Agricultura Tropical y Proyecto de Desarrollo Tierras Bajas del Este del Banco Mundial, Santa Cruz, Bolivia.
- Bonifaz del Carpio, A. 2012. Evaluación de un transductora integral para determinar las magnitudes de las fuerzas que actúan en los implementos de labranza. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Camacho-Tamayo, J. H. y G. A. Rodríguez-B. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua en el suelo. *Agric. Téc.* 67: 60-67.
- amos, M.S.G, B. Wills and Cadena Z. M. 1992. Consideraciones para el diseño de transductores octagonales y su aplicación en la evaluación de implementos de labranza. Memorias del II Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola (AMIA). Irapuato, Gto., México.

- Campos, M.S.G. 1993. Development of minimum maize planter for Mexican agriculture, unpublished Ph.D. Thesis, Newcastle University, England, 167p.
- Cook N.H. and E. Rabinowicz. 1963. Physical measurement and analysis, N.Y.: Addison Wesley, pp. 160–164. Sakurai, H. 1996. An application of strain gages to the agricultural machinery. Edit. Farm machinery section. 2nd Training Division. Tsukuba International Centre (TBIC). Japan International Cooperation Agency (JICA).
- Cook N.H. and E. Rabinowicz. 1963. Physical measurement and analysis, N.Y.: Addison Wesley, pp. 160–164.
- Cook N.H. and E. Rabinowicz. 1963. Physical measurement and analysis, N.Y.: Addison Wesley, pp. 160–164.
- Cooper D.W. and Helfrick D.A. 1991. Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición, p. 101.
- FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Roma, Italia, P. 204.
- FAO. 2003. “Manual de prácticas integradas de manejo de conservación de suelos”.], [Documento en línea] <[http://www.fao.org/ag/ags/agse/agse\\_s/7mo/iita/iita.htm](http://www.fao.org/ag/ags/agse/agse_s/7mo/iita/iita.htm)>
- FAO. 2003. Agricultura de conservación, uniendo producción con sostenibilidad.
- Garner, T.H.; Dodd, R. B.; Wolf Dan; Peiper, U. M. 1988. Force analysis and application of a Three – point hitch dynamometer. Transaction of the ASAE. 31(4):1047-1053.
- Godwin R J; Spoor G; Soomro M S (1984). The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. Journal of Agricultural Engineering Research, 30, 47–56.

- Godwin, R. J. 1975. An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. *J. Agric. Eng. Res.*, 20: 347-352.
- Hinojosa G., M.; 2003. Desarrollo de un transductor de fuerzas para la evaluación de implementos integrales en tractores categoría II basado en el diseño octagonal extendida, tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila.
- Hoogmoed, W.B. 1999. Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. *Tropical Resource Management Papers 24*, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. Wageningen, The Netherlands
- Kepner, R.A., R. Bainer and E.L. Barger. 1978. Principles of farm machinery. Avi Pub. Co., Westport, Connecticut, EE. UU. P. 527
- Khan, J., R.J. Godwin, J. Kilgour and B.S. Blackmore. 2007. Design and calibration of a bi-axial extended octagonal ring transducer system for the measurement of tractorimplement forces. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2(1) Bedford, England, U.K.: Pp. 16-20.
- Korkut, I. 2003. A Dynamometer design and its construction for milling operation. *Materials and Design*, 24(8). Technical Education Faculty, Gazi University. Besevler, Ankara, Turkey: Pp. 631-637.
- Mojica, L. E. D. 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y abresurco para labranza de conservación, empleando equipo multiusos de tracción animal, tesis, Licenciatura, Instituto Tecnológico de Veracruz, Ver.; México
- REYNOLDS-CHÁVEZ, M. A. 2012. Protocolo de proyectos de investigación (programas doctorales) de ingeniería en el sistema de producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

S. Campos, M., A. Aragón, R., y M. Cadena Z. 2000. Diseño y comportamiento de tres Transductores de fuerzas para la evaluación de herramienta de labranza. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. CLIA. X Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola AMIA 2000.

Thomson, N. P., and K.J. Shinnars. 1989. A portable instrumentation system for measuring draft and speed. *Applied Engineering in Agriculture* 5(2): 133-137.

Valera, V.S. 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y dibujos patentes. Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México.

## IX. ANEXOS

### 9.1.ANEXO A

#### 9.1.1. Anexo A1. comportamiento de los voltajes de deformación de los sensores oae en laboratorio.

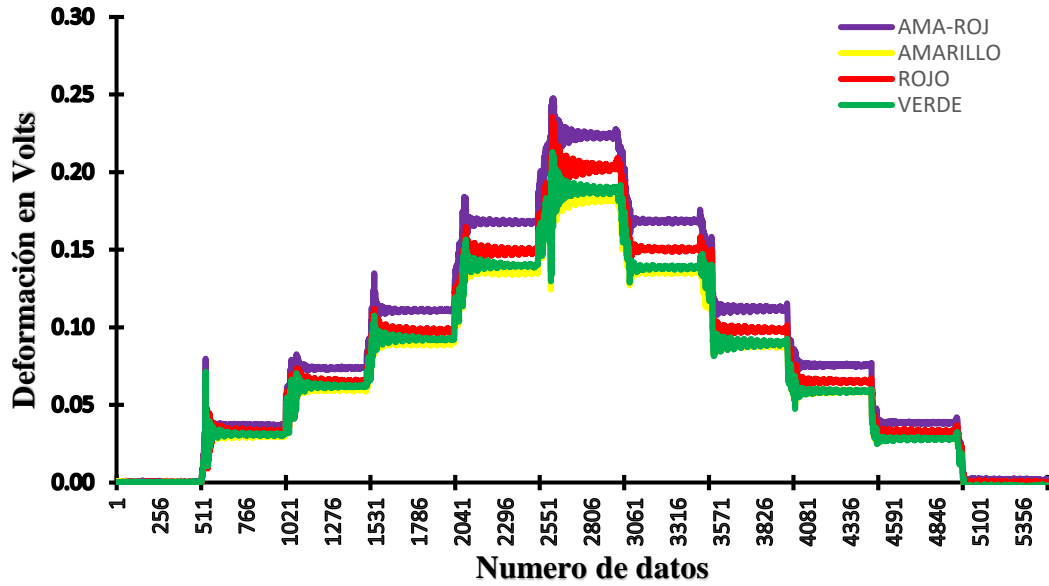
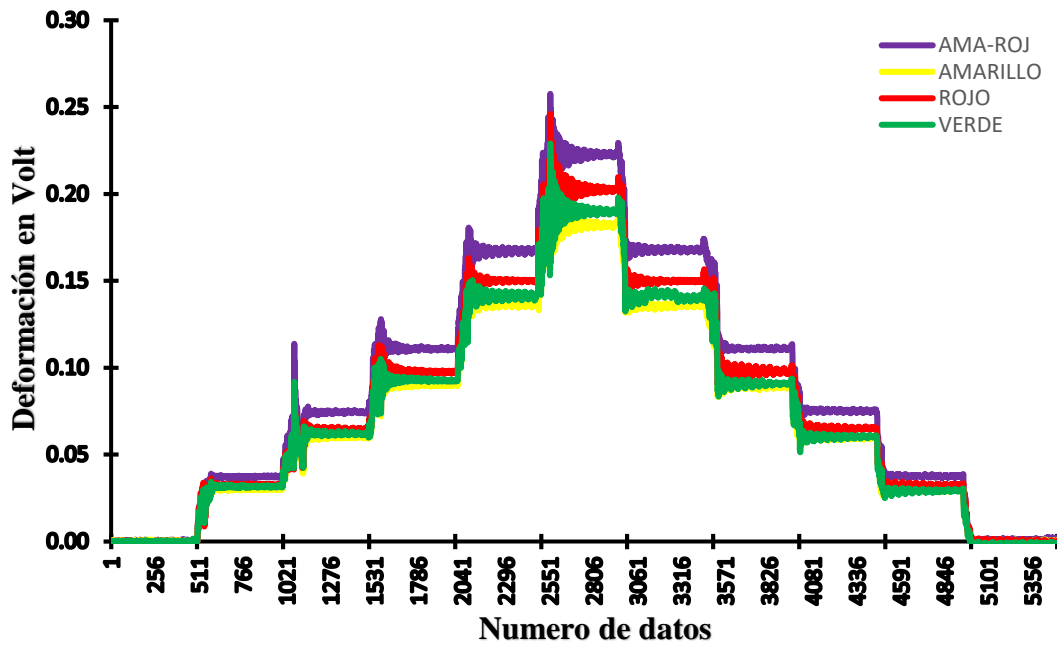
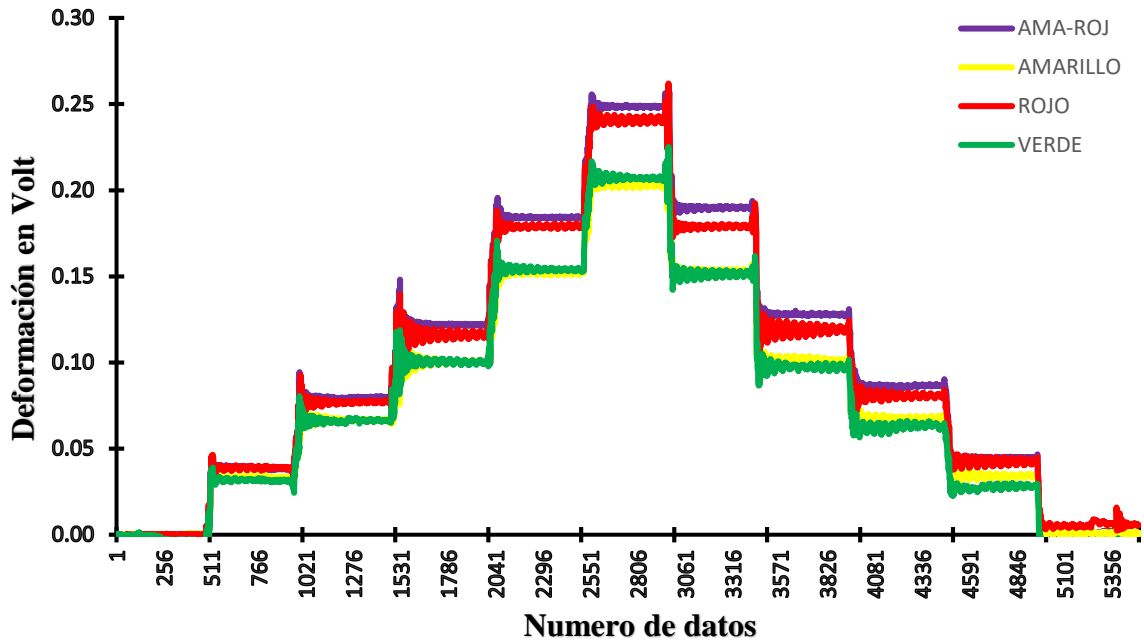


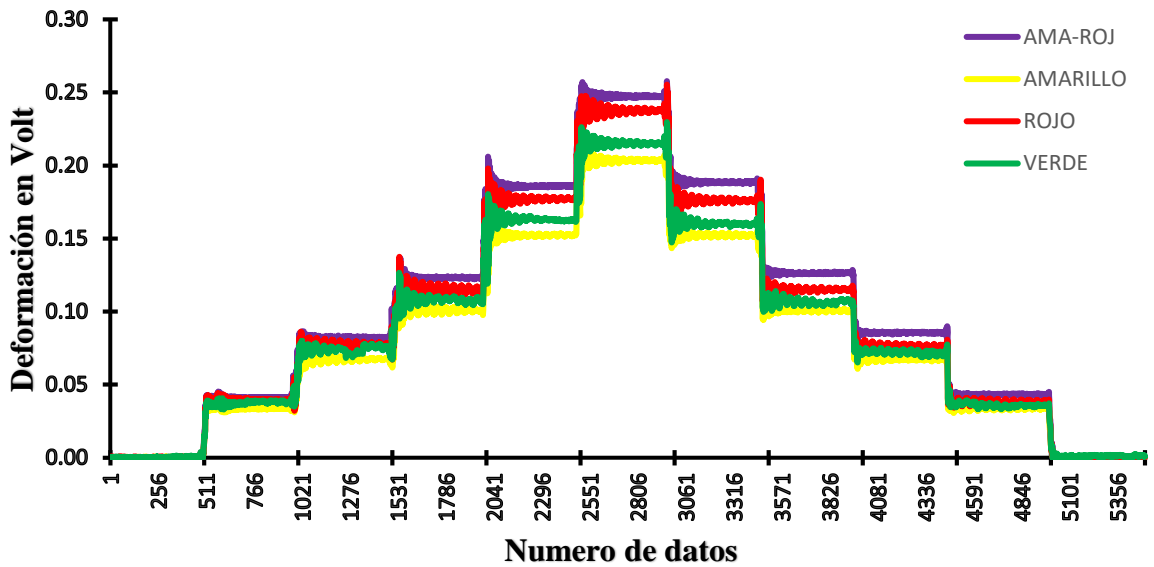
Figura 9.1: Segunda repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE, en voltaje, para un brazo de palanca de 0.60 m.



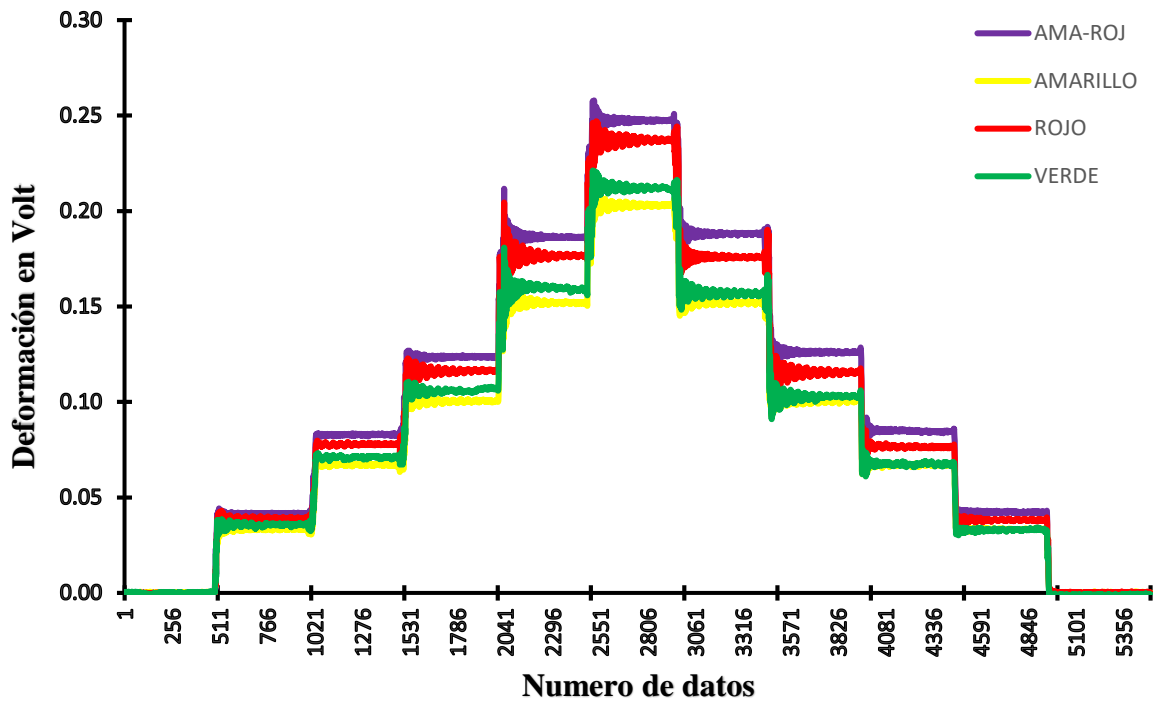
**Figura 9.2:** Tercera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE, en voltaje, para un brazo de palanca de 0.60 m.



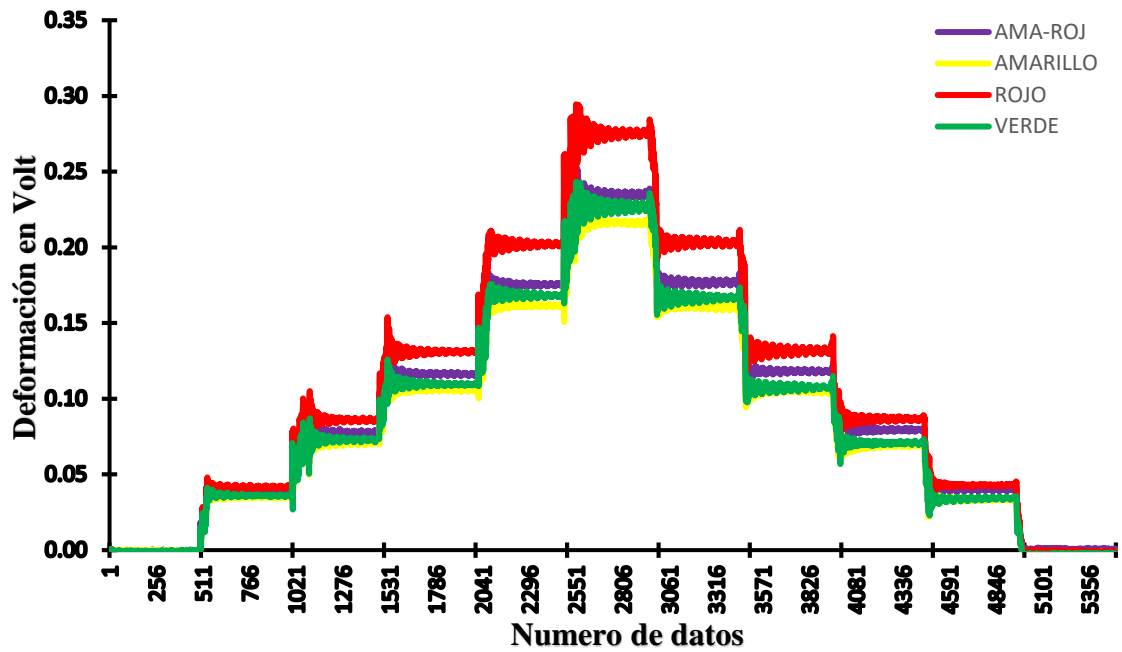
**Figura 9.3:** Primera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.70 m.



**Figura 9.4:** Segunda repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.70 m.

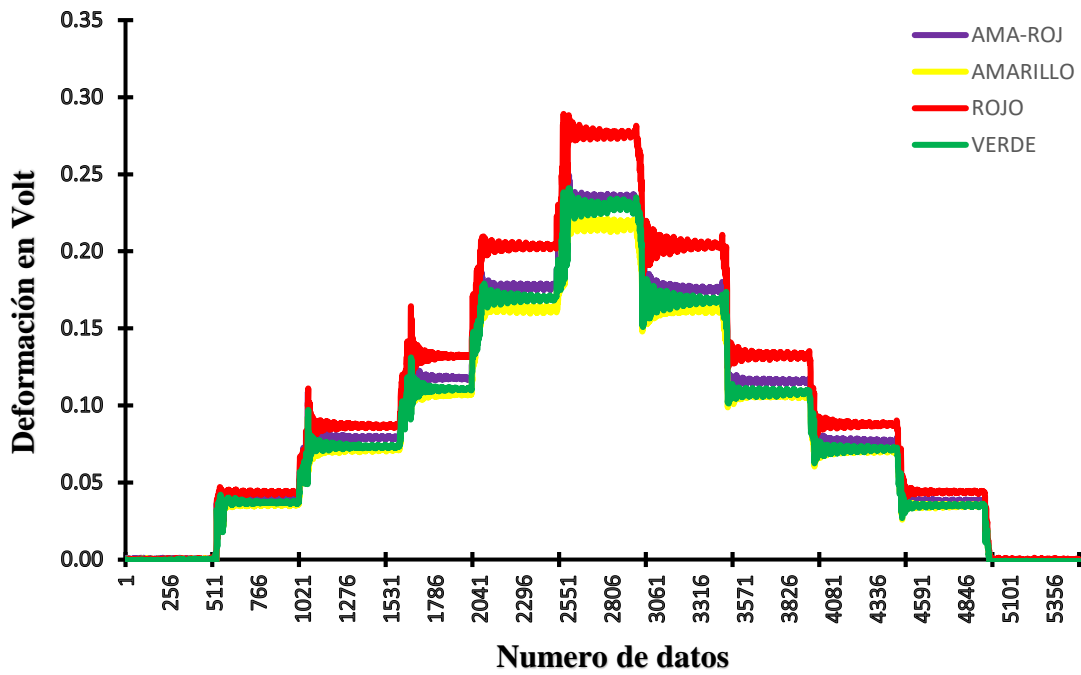


**Figura 9.5:** Tercera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.70 m.

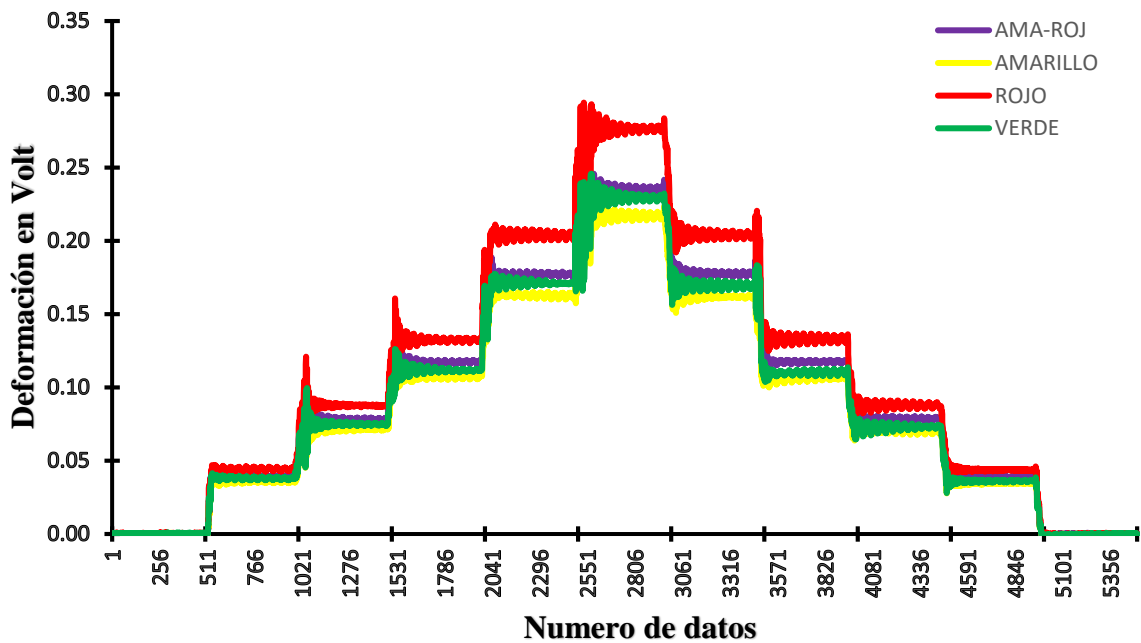


**Figura 9.6:** Primera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.80 m.

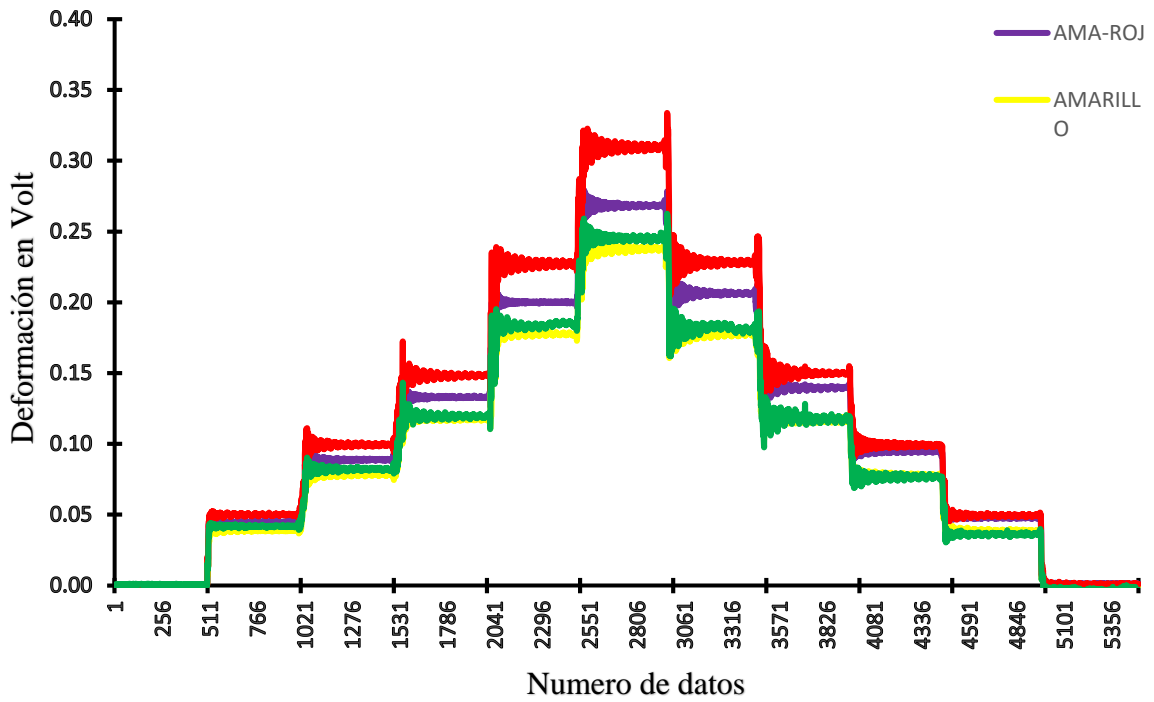




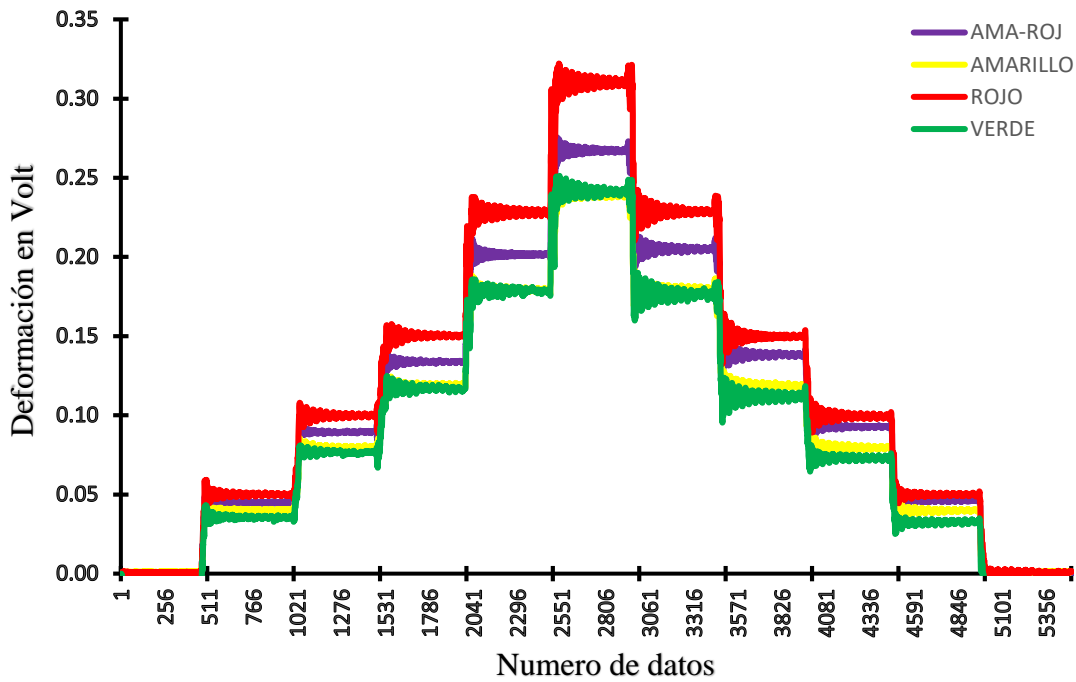
**Figura 9.7:** Segunda repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.80 m.



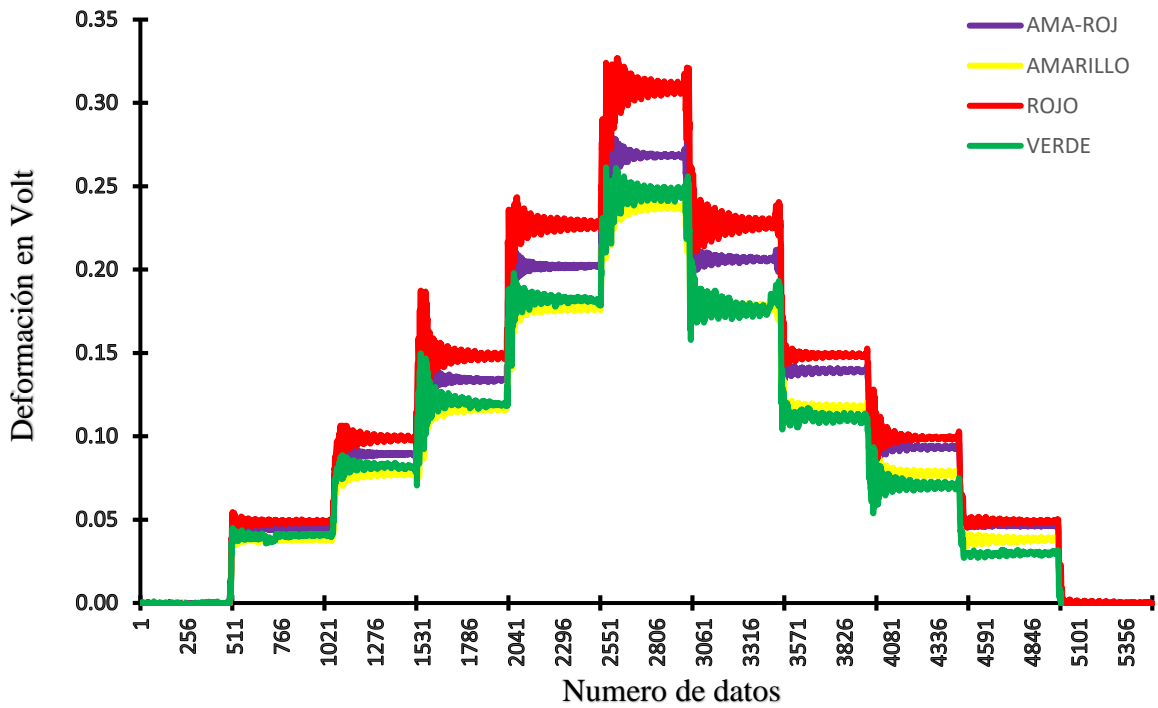
**Figura 9.8:** Tercera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.80 m.



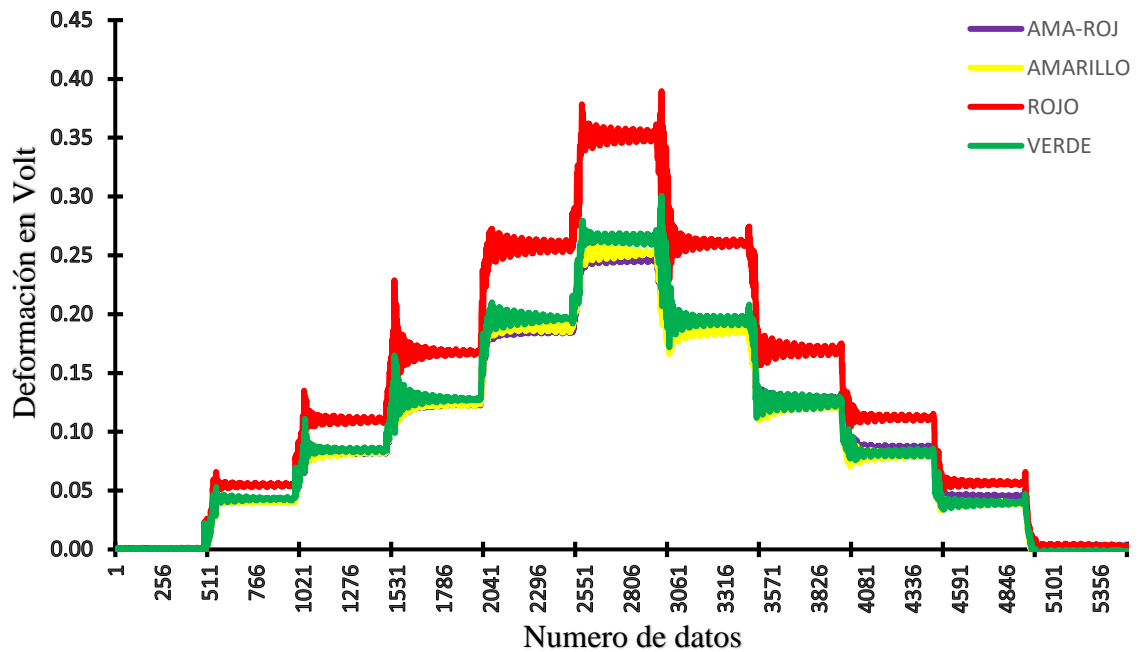
**Figura 9.9:** Primera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.90 m.



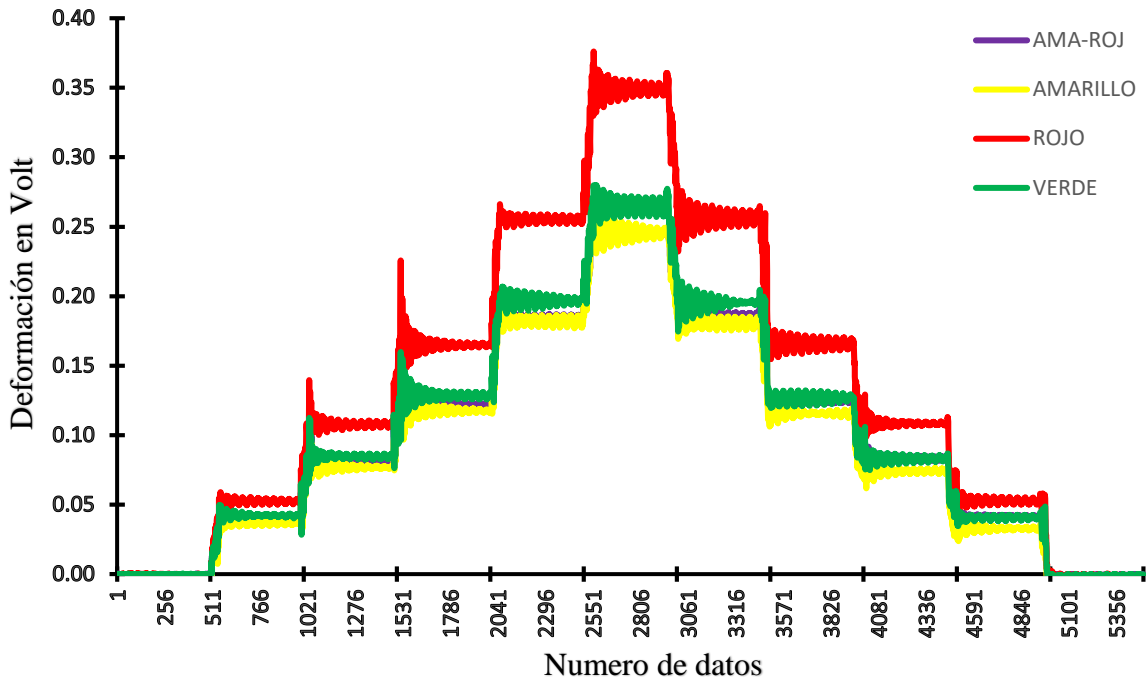
**Figura 9.10:** Segunda repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.90 m.



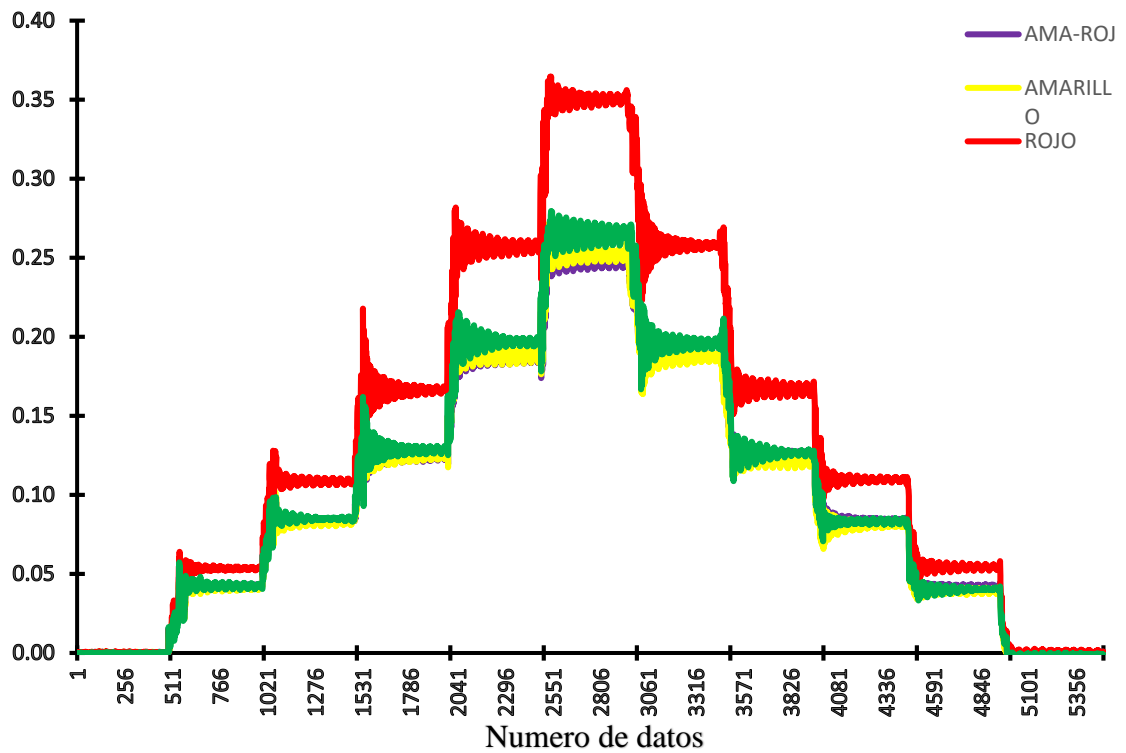
**Figura 9.11:** Tercera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 0.90 m.



**Figura 9.12:** Primera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 1.05 m.



**Figura 9.13:** Segunda repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 1.05 m.



**Figura 9.14:** Tercera repetición del efecto de 5 cargas acumuladas sobre la deformación de los OAE en voltaje, para un brazo de palanca de 1.05 m.

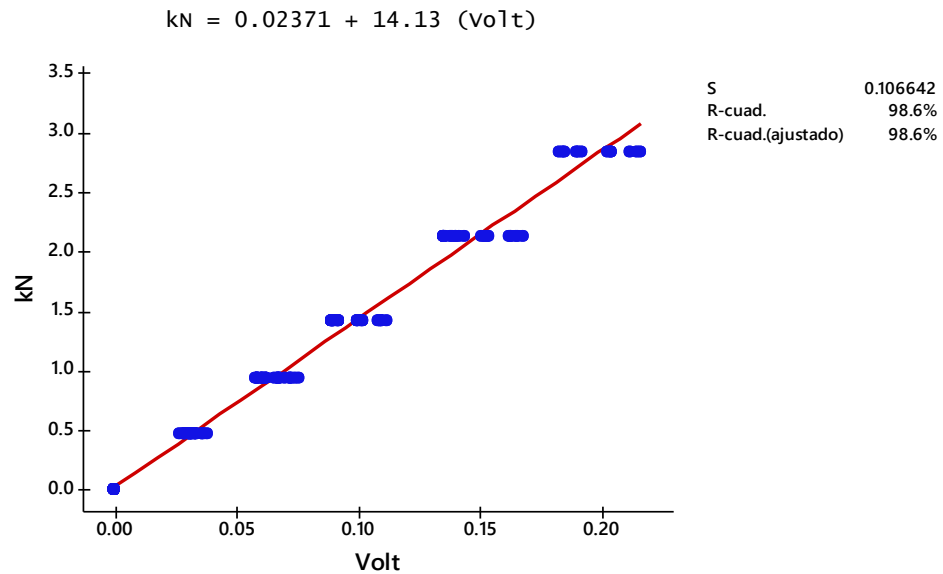
**9.1.2 A.2. deformación máxima de los sensores para cada posición de brazo de palanca.**

**Cuadro 9.1:** Concentrado de voltaje de deformación en los sensores para cada posición de brazo de palanca sometidos a una carga máxima de 2,845.0 N.

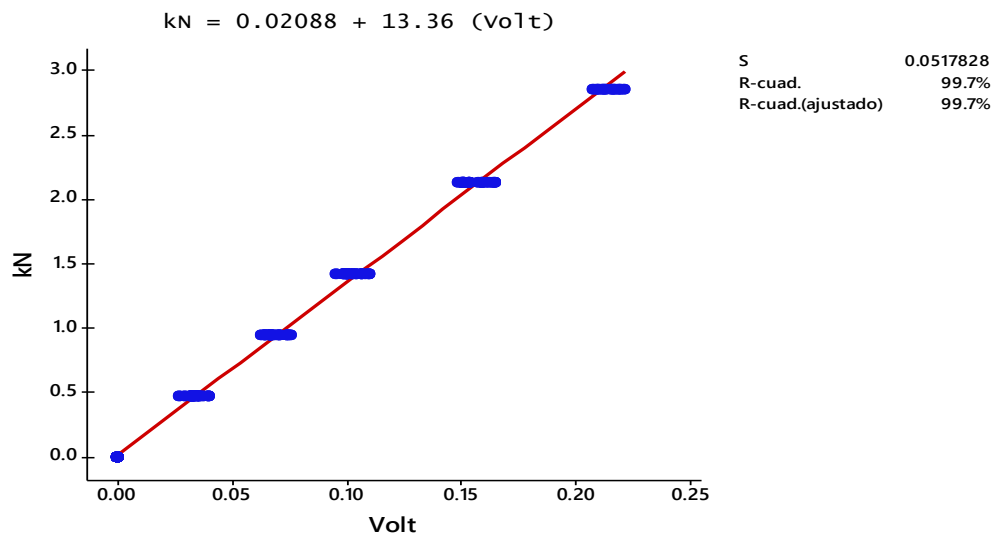
Brazo de palanca m	Rep.	Sensor Verde Volt	Sensor Amarillo Volt	Sensor de trabajo Volt
0.60	1	0.203	0.215	0.225
	2	0.204	0.212	0.223
	3	0.204	0.216	0.223
	4	0.191	0.185	0.234
	5	0.190	0.183	0.226
	6	0.192	0.184	0.229
0.70	1	0.216	0.219	0.230
	2	0.218	0.222	0.229
	3	0.214	0.220	0.230
	4	0.208	0.212	0.242
	5	0.217	0.211	0.240
	6	0.213	0.210	0.242
0.80	1	0.246	0.254	0.237
	2	0.247	0.261	0.236
	3	0.249	0.263	0.236
	4	0.230	0.217	0.252
	5	0.234	0.220	0.254
	6	0.232	0.217	0.250
0.90	1	0.250	0.247	0.245
	2	0.250	0.246	0.244
	3	0.247	0.249	0.244
	4	0.247	0.245	0.254
	5	0.245	0.243	0.252
	6	0.249	0.246	0.253
1.05	1	0.270	0.253	0.249
	2	0.270	0.250	0.245
	3	0.271	0.256	0.250
	4	0.286	0.301	0.254

	5	0.284	0.305	0.252
	6	0.285	0.303	0.253

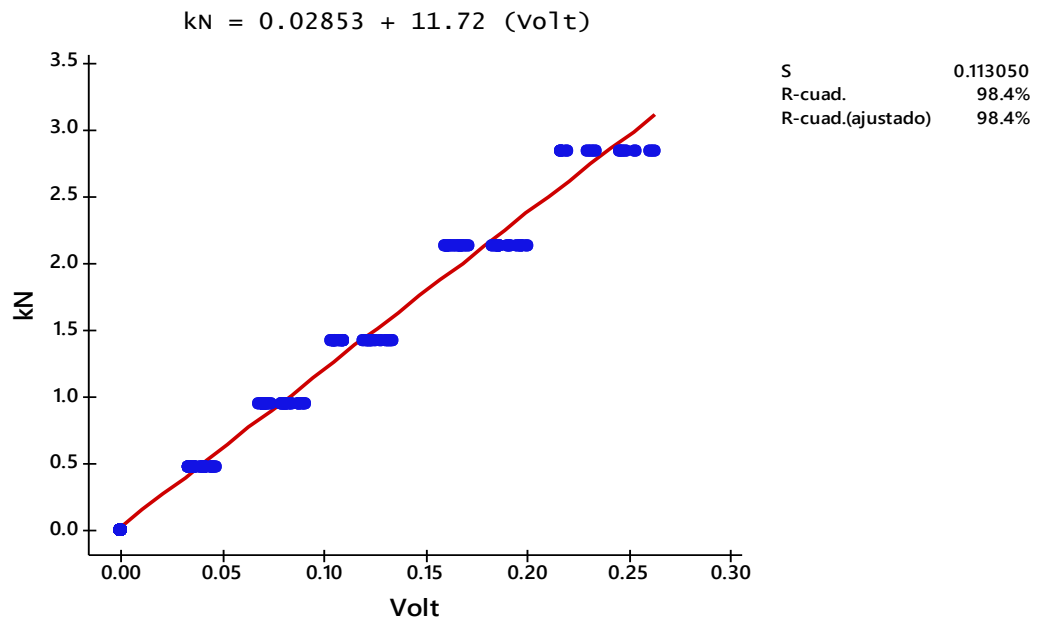
**9.1.3 A.3. Regresión lineal para los sensores verde y amarillo en 5 posiciones de brazo de palanca, sometido a una carga máxima de 2,845.0 N.**



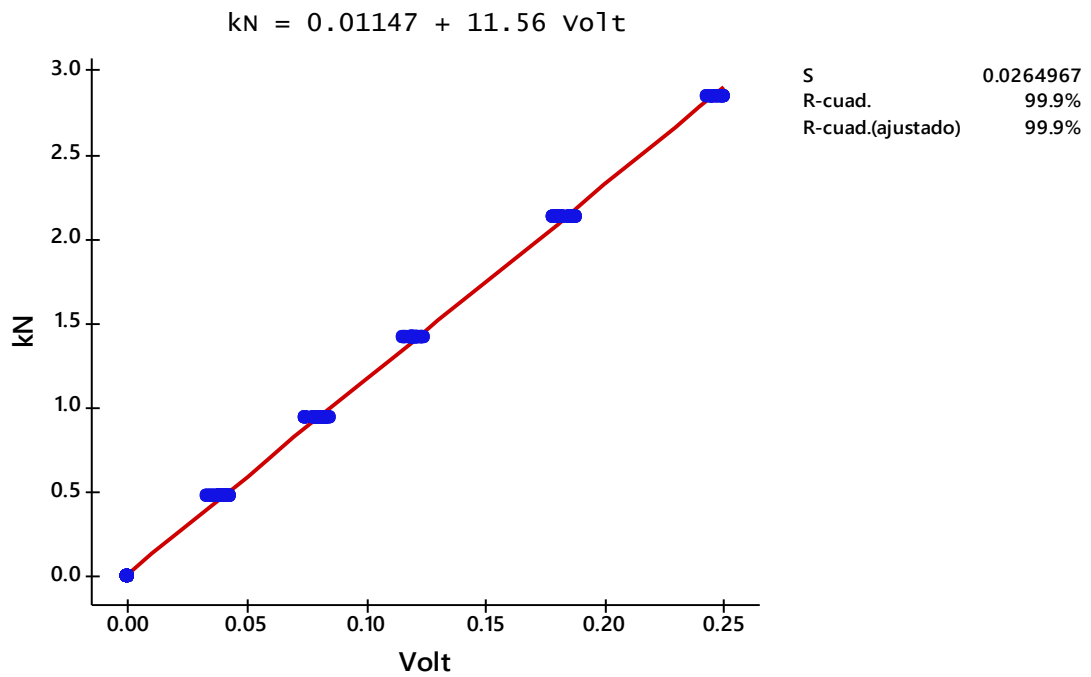
**Figura (9.15):** Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 0.60 m.



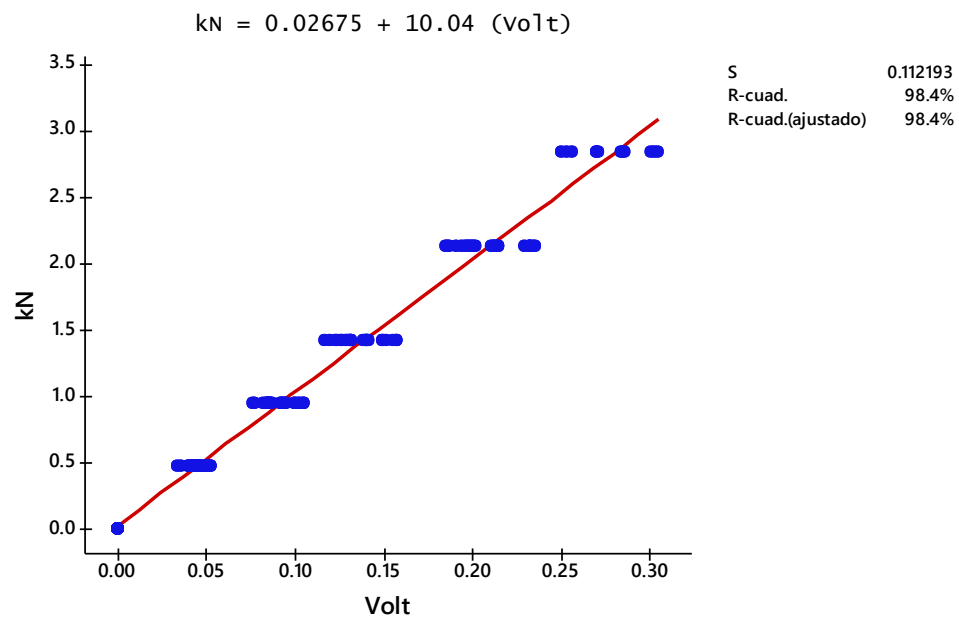
**Figura (9.16):** Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 0.70 m.



**Figura (9.17):** Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 0.80 m.



**Figura (9.18):** Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 0.90 m.



**Figura (9.19):** Regresión lineal de los sensores verde [3] y amarillo [4] para un brazo de palanca de 1.05 m.



#### 9.1.4 A.4. Constantes de los sensores verde y amarillo para cada posición de brazo de palanca.

En el cuadro (4.1) se concentran las constantes de calibración para cada posición de brazo de palanca, los sensores verde y amarillos muestran valores similares en cada posición, no así en las posiciones del brazo de palanca. El valor de la constante disminuye cuando el brazo de palanca va aumentando.

**Cuadro (9.2):** Concentrado de repeticiones de las constantes para los 5 diferentes brazos de palancas en las calibraciones de los sensores verde y amarillo.

Brazo de palanca m	Calibración Verde-Azul		Calibración Rojo-Amarillo	
	Verde	Amarillo	Verde	Amarillo
	kN V <sup>-1</sup>	kN V <sup>-1</sup>	kN V <sup>-1</sup>	kN V <sup>-1</sup>
0.60	13.87	12.57	15.00	15.09
0.70	12.90	12.92	13.81	13.83
0.80	11.29	11.39	12.12	12.08
0.90	11.52	11.18	11.67	11.87
1.05	9.59	9.32	10.11	11.16

**m:** metros, **kN:** kilo Newton, **V:** Volt.

#### 9.1.2. A.5. Promedio de voltajes y error en los sensores en cada posición de brazo de palanca.

El error general producto de la media de los valores en la medida de los sensores rojo-amarillo y verde-azul con relación a la media de los valores obtenidos por los sensores verde y amarillo se muestra en el cuadro (5.1). Los sensores verde-azul y amarillo-rojo igualmente muestran un comportamiento similar. Este aumento de la medición con respecto al brazo de palanca es producto de la ubicación de los nodos de deformación que detectan este comportamiento.

**Cuadro (9.3):** Concentrado de medias y del error de las 6 repeticiones de los sensores octagonales para cada posición de brazo de palanca a una carga máxima de 2,845 N.

<b>Brazo de palanca</b> m	<b>[A]</b> Volt	<b>[B]</b> Volt	<b>[C]</b> Volt	<b>[D]</b> Volt	<b>[E]</b> Volt	<b>[F]</b> Volt	<b>Error</b> %
0.60	0.199	0.197	0.198	0.230	0.233	0.231	-14.459
0.70	0.216	0.214	0.215	0.241	0.239	0.240	-10.454
0.80	0.239	0.240	0.240	0.252	0.245	0.249	-3.506
0.90	0.246	0.248	0.247	0.253	0.254	0.253	-2.518
1.05	0.278	0.278	0.278	0.253	0.258	0.255	8.823

[A]: Sensor Amarillo, [B]: Sensor Verde, [C]: Promedio de A y B, [D]: Sensor verde-azul, [E]: Sensor Rojo-Amarillo, [F]: Promedio de D y E.

$$Error(\%) = \frac{F - C}{F} * 100$$

La magnitud en voltaje del error que detecta el sensor integral producto de la longitud del brazo de palanca se muestra en el cuadro (5.1). El error mostrado está en relación al sensor acoplado a la herramienta de trabajo (verde-azul y amarillo-rojo) con los sensores verde y amarillo que están acoplados en el bastidor del banco de prueba simulando los brazos de acoplamiento del tractor.

## 9.2.ANEXO B

### 9.2.1. B.1. Medidas del sensor octagonal de anillo extendido

En la figura (9.20) se muestra las dimensiones del sensor octagonal de anillo extendido con el cual se trabajará en campo.

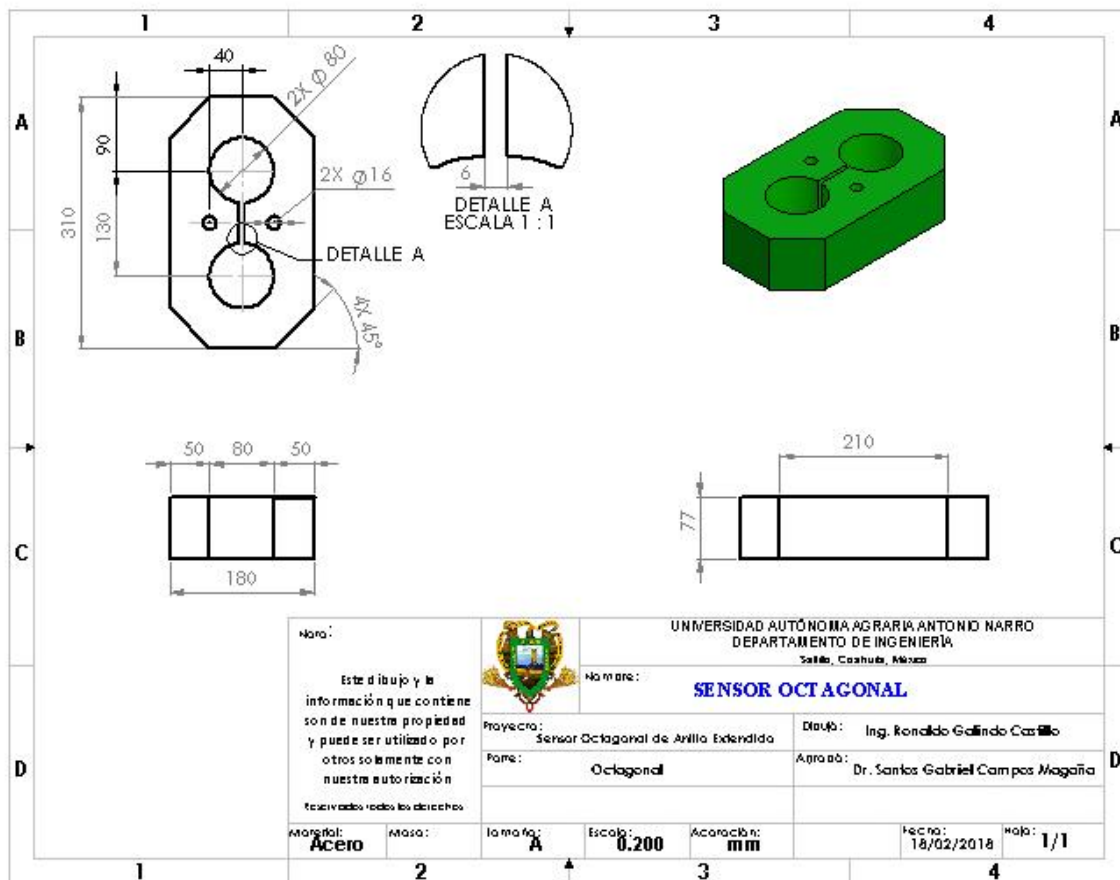


Figura (9.20): Medidas y especificaciones del sensor octagonal de anillo extendido.

### 9.3.ANEXO C

#### 9.3.1. C1. Analisis de varianza para los metodos de energia y espectral para el analisis de resultdos a una profundidad de trabajo de 0.20-0.20 m.

**Cuadro 9.4.** Análisis de varianza para los métodos espectral y energía en los resultados del error, a una profundidad de trabajo de 0.20-0.20 m, arreglo por bloques al azar con 4 repeticiones por cada método.

[FV]	[GL]	[SC]	[CM]	[Fc]	[Sig.]
Métodos	1	2.738	2.738	1.289	0.339
Bloques	3	95.569	31.856	14.994	0.026
Error	3	6.374	2.125		
Total	7	104.681			

[FV]: Fuente variación, [GL]: Grados de libertad, [SC]: Suma de cuadrados, [CM]: Cuadrado medio, [Fc]: F calculada, [Sig.]: Significancia a un 95 %.

**Cuadro 9.5.** Medias de los métodos espectral y energía para la profundidad de 0.20-0.20 m

Métodos	Media
Espectral	31.795
Energía	30.625

#### 9.3.2. C2. Analisis de varianza para los metodos de energia y espectral para el analisis de resultdos a una profundidad de trabajo de 0.30-0.30 m.

**Cuadro 9.6.** Análisis de varianza para los métodos espectral y energía en los resultados del error, a una profundidad de trabajo de 0.30-0.30 m, arreglo por bloques al azar con 4 repeticiones por cada método.

[FV]	[GL]	[SC]	[CM]	[Fc]	[Sig.]
Métodos	1	34.736	34.736	2.572	0.207
Bloques	3	571.917	190.639	14.114	0.028
Error	3	40.522	13.507		
Total	7	647.175			

[FV]: Fuente variación, [GL]: Grados de libertad, [SC]: Suma de cuadrados, [CM]: Cuadrado medio, [Fc]: F calculada, [Sig.]: Significancia a un 95 %.

**Cuadro 9.7.**Medias de los métodos espectral y energía para la profundidad de 0.30-0.30 m.

<b>Métodos</b>	<b>Media</b>
Espectral	10.958
Energía	15.125