



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

EVALUACIÓN DE LA Sonda TDR PARA EL SEGUIMIENTO DE LA
HUMEDAD DE UN SUELO FRANCO BAJO EL CULTIVO DE BANANO

GUAMAN BRITO IVAN EDUARDO
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2022



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

EVALUACIÓN DE LA SONDA TDR PARA EL SEGUIMIENTO DE
LA HUMEDAD DE UN SUELO FRANCO BAJO EL CULTIVO DE
BANANO

GUAMAN BRITO IVAN EDUARDO
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2022



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TRABAJO TITULACIÓN
TRABAJO EXPERIMENTAL

EVALUACIÓN DE LA SONDA TDR PARA EL SEGUIMIENTO DE LA HUMEDAD
DE UN SUELO FRANCO BAJO EL CULTIVO DE BANANO

GUAMAN BRITO IVAN EDUARDO
INGENIERO AGRÓNOMO

CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE

MACHALA, 22 DE SEPTIEMBRE DE 2022

MACHALA
2022

Evaluación de la sonda TDR para el seguimiento de la humedad del suelo Franco bajo el cultivo de Banano

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.buenastareas.com Fuente de Internet	1%
2	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
3	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	Dagoberto Durán Hernández, Olivia Tzintzun Camacho, Onécimo Grimaldo-Juárez, Daniel González-Mendoza et al. "Compendio Científico en Ciencias Agrícolas y Biotecnología (Vol 2)", Omnia Publisher SL, 2019 Publicación	1%
6	rid.unrn.edu.ar Fuente de Internet	1%

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, GUAMAN BRITO IVAN EDUARDO, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado EVALUACIÓN DE LA SONDA TDR PARA EL SEGUIMIENTO DE LA HUMEDAD DE UN SUELO FRANCO BAJO EL CULTIVO DE BANANO, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 22 de septiembre de 2022



GUAMAN BRITO IVAN EDUARDO
0704826858

DEDICATORIA

A mis amados padres: Elizabeth Brito e Iván Guamán Méndez y en especial a mi abuelo Ángel Guamán, quienes en todo momento estuvieron pendientes de mí y de mi formación tanto en la vida como en la universidad, dedicarle este logro a ellos quien ya no están en este mundo, pero no tengo la menor duda que seguramente estarán felices de que lo haya podido lograr.

A Dios, por brindarme salud, sabiduría y fortaleza durante mi etapa como estudiante, además

A mis compañeros y amigos, quienes me han ayudado a lograr cumplir cada meta que me forjo.

Iván Eduardo Guamán Brito

AGRADECIMIENTO

En él presente trabajo agradezco a la “Universidad Técnica de Machala”, a su prestigiosa Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA) por su acogida y haberme forjado como profesional.

De manera muy especial agradezco a mi tutor de tesis Ing. Julio Enrique Chabla Carrillo, PhD por darme la grata oportunidad de aprender de su prestigiosa experiencia profesional y académica, al Ing. Abrahan Cervantes, Mgs, Ing. Salomón Barrezueta, PhD por los conocimientos compartidos al realizar mi proyecto de investigación.

Al Ing. Víctor Chabla Carrillo por permitir el acceso y uso de su predio agrícola “Finca Márquez” para la realización del presente proyecto de investigación.

Al Ing. Gustavo Pazmiño, representante de la empresa Yara, por permitir la investigación mediante la facilitación de los instrumentos ocupados y estar pendientes en todo el proceso de realización.

A mis amigos y colegas Franklin Estrada y Diego Nagua que fueron parte fundamental en todo el proceso de investigación con sus muestras de apoyo y motivación.

RESUMEN

Autor

Iván Eduardo Guamán Brito

Tutor

Julio Chabla Carrillo, PhD

En la agricultura el agua es un principal factor que afecta directamente en la producción, el riego suplementario es aplicado para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos con el fin no solo de incrementar la productividad, sino también para lograr disminuir la variabilidad interanual en el rendimiento de los cultivos, en especial en la época donde no existen mayores precipitaciones, teniendo en cuenta estos periodos de bajas precipitaciones en la provincia de El Oro, debido a esto resulta de suma importancia poder conocer en tiempo real los contenidos de agua que existen en el suelo para así poder comprender el comportamiento de los cultivos frente a las variaciones del mismo. Dentro de los métodos de medición de agua en el suelo se encuentra la sonda de capacitancia TDR que es un equipo de medicación directa que permite obtener de manera precisa y al instante los contenidos de humedad existentes en el suelo. Con el objetivo de poder determinar un manejo eficiente del agua de irrigación en la finca bananera “El Márquez” ubicada en la parroquia La Peaña del cantón Pasaje, se efectuaron lecturas de contenidos de humedad durante 12 semanas, georreferenciando cada sitio de muestreo, se efectuó una toma de datos cada 15 días durante los meses de agosto a noviembre, la toma de muestras y registro de lecturas fue completamente al azar por todo el predio de la finca, se tomaron lecturas con la sonda de capacitancia TDR con las varillas de 20cm de longitud y obtener los contenido volumétrico de agua en tiempo real, para la comparación de los datos, se tomaron muestras de suelo a los 20cm de profundidad en los mismos sitios se determinó el contenido de humedad gravimétrico, que considerando su densidad aparente se calculó su contenido volumétrico, en el laboratorio de suelos de la universidad de Machala . Para la determinación de ciertas propiedades físicas del suelo como densidad aparente (D_a), densidad real (D_r) y porosidad total, se utilizaron las mismas muestras de suelo. Se dibujo mapas temáticos de la zona con los contenidos de agua en el suelo a 20cm de profundidad con los valores obtenidos tanto con la sonda TDR, así como los obtenidos en laboratorio, utilizando el software ArcGIS, lo que permitió visualizar los diversos sectores con contenidos de humedad en el suelo en los meses de agosto y

septiembre. Con esta información, permite realizar una adecuada planificación del diseño agronómico, calculando entre otros, los tiempos y frecuencias de riego en cada zona específica del predio, ayudando a disminuir los costos de aplicación de las láminas por esas diferencias de los niveles de humedad. Para evaluar el comportamiento de las lecturas de la sonda TDR con los valores obtenidos por el método gravimétrico se evaluó el coeficiente de correlación de Pearson (0.991). El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8298$), y la ecuación de regresión lineal ($y = 1.033x - 1.2015$), lo que indica que la sonda TDR en comparación con el método gravimétrico, es un instrumento fiable para la determinación de la lámina de agua en el perfil del suelo y es ideal para las estimaciones del riego.

Palabras clave: Densidad aparente del suelo; método gravimétrico; lámina de agua; perfil del suelo.

SUMMARY

Author

Iván Eduardo Guamán Brito

Tutor

Julio Chabla Carrillo, PhD

In agriculture, water is a main factor that directly affects production, supplemental irrigation is applied to meet the water needs of crops in order not only to increase productivity, but also to reduce the inter-annual variability in crop yields, especially in times of low rainfall in the province of El Oro, because of this it is very important to know in real time the water content in the soil in order to understand the behavior of crops in response to variations in it. Among the methods for measuring water in the soil is the TDR capacitance probe, which is a direct measurement instrument that allows us to accurately and instantly obtain the moisture content in the soil. In order to determine an efficient irrigation water management in the banana farm "El Márquez" located in the parish La Peaña of the Pasaje canton, moisture values were taken during 12 weeks, in which data were taken every 15 days during the months of August and November, the sampling was completely random throughout the property of the farm, Readings were taken with the TDR capacitance probe with 20cm rods in order to have data on volumetric water content in real time. For the comparison of the data, soil samples were taken at 20cm depth in order to determine the moisture content of the soil using the gravimetric method, which was carried out in the laboratory. The same soil samples were used to determine the physical properties of the soil, such as bulk density (D_a), true density (D_r) and porosity. Thematic maps of the area were made with the water content in the soil at 20 cm depth with the values obtained with the TDR probe, this helped us to differentiate that the highest moisture content in the soil were in the months of August and September, being represented by graphs we can differentiate the areas where there is greater presence of moisture, This is of great help to be able to have a planning in the hours of irrigation and to be a sectorized irrigation to be able to give priority to areas where low levels of moisture can be evidenced, this also affects the costs of irrigation because less hours will be irrigated in areas where there are higher levels of moisture. To evaluate the behavior of the TDR probe readings with the values obtained by the gravimetric method, the Pearson correlation coefficient (0.991) was evaluated. The coefficient of determination

($R^2=0.8298$), and the linear regression equation ($y= 1.033x-1.2015$), indicating that the TDR probe in comparison with the gravimetric method, is a reliable instrument for the determination of the water sheet in the soil profile and is ideal for irrigation estimations.

Key words: Bulk density of soil; gravimetric method; water film; soil profile.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objetivo general.....	12
1.2. Objetivo específico	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Propiedades físicas del suelo	13
2.1.1 Textura del suelo.....	13
2.1.2 Densidad aparente.....	13
2.1.3 Densidad real	14
2.1.4 Porosidad.....	14
2.1.5 Humedad en suelos	14
2.2 Propiedades químicas del suelo	15
2.2.1 pH.....	15
2.2.2 Conductividad eléctrica	15
2.3 Sonda TDR 300.....	15
2.3.1 Información del equipo.....	16
2.3.2 Funcionamiento de la sonda	16
2.3.3 Ventajas y desventajas	17
3. MATERIALES Y METODOS.....	19
3.1 Ubicación geográfica del ensayo	19
3.2 Climatología y ecología	19
3.3 Equipos, reactivos y materiales.....	20
Determinación de las propiedades físicas.....	20
Determinación de la humedad por medio de la Sonda TDR.....	20
3.4 Metodología para ubicación de los sitios de muestreo y toma de lecturas	20
3.4.1 Localización de los sitios de muestreo	20
3.5 Métodos para la determinación de las propiedades físicas del suelo.....	21
3.5.1 Determinación de la clase textural del suelo.....	21
3.5.2 Determinación de la densidad aparente (Da)	22
3.5.3 Densidad Real (Dr).....	23
3.5.4 Porosidad total (Pt)	23
3.5.5 Porcentaje de humedad del suelo (Wg)	24
3.6 Determinación de pH y conductividad eléctrica (CE)	24
3.7 Método para la calibración de la sonda TDR.....	25
3.8 Registro del contenido de humedad a través de la sonda TDR 300.....	25

4. RESULTADOS Y DISCUSION	26
4.1 Análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo en la finca La flor.	26
4.2 Análisis descriptivo de las propiedades químicas del suelo en la finca “El Márquez”	26
4.3 Análisis de los contenidos de humedad utilizando el diagrama de cajas y bigote	27
4.4 Análisis descriptivo del contenido de humedad volumétrica obtenidos por medio de la sonda TDR.....	28
4.5 Análisis descriptivo del contenido de humedad volumétrica obtenidos por medio de análisis en laboratorio	29
4.6 Análisis de la lamina de humedad calculada en (mm), con los datos determinados tanto con la sonda TDR y en laboratorio	30
4.7 Análisis de correlación entre el contenido de humedad obtenido por la sonda TDR y por el método gravimétrico	31
4.8 Análisis comparativo de los métodos utilizados para la determinación del contenido de humedad en el suelo, utilizando la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	32
4.9 Análisis de correlación de Pearson entre las variables tomadas en cuenta en el proyecto.....	33
4.10 Distribución del pH y conductividad eléctrica (CE) en la finca El Márquez.	35
4.10.1 Distribución de los valores obtenidos de pH.	35
4.8.2 Distribución de los valores obtenidos de conductividad eléctrica (CE). .	36
4.11 Distribución del contenido de humedad en el suelo obtenido por medio de la sonda TDR en la finca El Márquez.....	36
4.11.1 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 34 del mes de agosto	36
4.11.2 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 36 y 38 del mes de septiembre.....	37
4.11.3 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 40 y 42 del mes de octubre.	38
4.11.4 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 44 del mes de noviembre.	39
5. CONCLUSIONES.....	41
6. RECOMENDACIONES	42
7. BIBLIOGRAFÍA	43
8. ANEXOS	46

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad de agua en el suelo en función de la textura	13
Tabla 2. Análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo	26
Tabla 3. Análisis descriptivo de las propiedades químicas del suelo	27
Tabla 4. Análisis descriptivo por semanas del contenido de humedad obtenida por la sonda.....	29
Tabla 5. Análisis descriptivo por semanas del contenido de humedad obtenido por el método gravimétrico.....	29
Tabla 6. Resumen del método estadístico de regresión.....	31
Tabla 7. Resumen de contrastes de prueba de hipótesis.....	32
Tabla 8. Resumen de la prueba U de Mann-Whitney.....	33
Tabla 9. Resumen de análisis de correlación de Pearson entre las variables	34

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sonda TDR 300.....	16
Figura 2. Mapa de ubicación de la finca El Márquez.....	19
Figura 3. Puntos de muestreo en la finca El Márquez.....	21
Figura 4. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas	22
Figura 7. Grafica de los valores obtenidos en la prueba U de Mann-Whitney	32
Figura 8. Distribución del pH en la finca El Márquez	35
Figura 9. Distribución de la conductividad eléctrica en la finca El Márquez	36
Figura 10. Distribución del contenido de humedad en la semana 34 del mes de agosto	37
Figura 11. Distribución del contenido de humedad en las semanas 36 y 38 del mes de septiembre.....	38
Figura 12. Distribución del contenido de humedad en las semanas 40 y 42 del mes de octubre	39
Figura 13. Distribución del contenido de humedad en la semana 44 del mes de noviembre	40

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Velocidad de propagación	16
Ecuación 2. Velocidad de propagación en función a la longitud de las varillas	17
Ecuación 3. Velocidad de propagación en función a la velocidad de la luz y una constante K	17
Ecuación 4. Constante K.....	17
Ecuación 5. Contenido de humedad volumétrica del suelo	17
Ecuación 6. Densidad aparente (Da)	22
Ecuación 7. Densidad real (Dr)	23
Ecuación 8. Porosidad total	23
Ecuación 9. Porcentaje de humedad del suelo.....	24
Ecuación 10. Porcentaje de humedad volumétrica del suelo.....	24

1. INTRODUCCIÓN

El conocer en tiempo real, la variación espacial, temporal del agua en el suelo, es de gran importancia para las técnicas relacionadas con la agricultura de precisión y en consiguiente el manejo adecuado del recurso hídrico. Existen una gran variabilidad de factores que influyen en el contenido de agua en el suelo, tales como la topografía, el tamaño de las partículas, los contenidos de arcilla, el contenido de materia orgánica.

Dentro de los métodos indirectos, para medir la cantidad de agua en el suelo, está la sonda de neutrones y otras, basados en la medición de la constante dieléctrica del medio como las sondas de capacitación TDR y FDR. La sonda de neutrones se la puede considerar como un método muy confiable, el inconveniente es que requiere una calibración local y el uso de fuentes de radiación.

Las sondas TDR y FDR, miden la constante dieléctrica del suelo la cual es una propiedad intrínseca de esta. Además, la sonda TDR mide la humedad del suelo, mediante la respuesta a los diversos cambios en la constante dieléctrica del medio, empleando la técnica de reflectometría en dominio de frecuencia. Estas sondas, han permitido detectar situaciones de déficit y exceso de agua en el perfil del suelo. El seguimiento de dicha evolución, sirve de apoyo en el conocimiento de las necesidades hídricas de la planta, lo que permite una programación del riego más eficiente (Martí, Turégano, & González-Altozano, 2011).

El uso de la sonda FDR y TDR permite grandes ventajas con respecto a un antiguo método (método gravimétrico), debido a la probabilidad de obtener una gran cantidad de medidas en una forma continua y sin disturbar las propiedades del suelo. Se puede establecer un estatus óptimo de humedad de suelo para lograr la máxima dinámica y productividad del cultivo.

La programación de riego consiste en estimar la cantidad de agua requerida por el cultivo para su desarrollo, para ser aplicada en el momento adecuado y maximizar la producción (Ferreyra, 2018), con la ayuda de la Sonda TDR 300 se ajustará los tiempos de riego y para ello se han planteado los siguientes objetivos.

1.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de la sonda TDR en diferentes condiciones de humedad, profundidad y localización para un suelo de una finca bananera en la parroquia La Peaña, del cantón Pasaje, provincia de El Oro.

1.2. Objetivo específico

- Calibrar de la sonda TDR para las condiciones climatológicas de la zona de “La Peaña”
- Comparar los valores obtenidos por la sonda TDR y el método gravimétrico, temporal de contenido de agua en un suelo Franco
- Inferir el efecto de los sistemas de manejo de suelo en los contenidos de humedad a lo largo del tiempo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Propiedades físicas del suelo

2.1.1 Textura del suelo.

La textura se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños, como arena, limo y arcilla. Se considera la principal propiedad física del suelo porque afecta directamente la fertilidad, la aireación, el drenaje, el contenido de materia orgánica y otras propiedades. (FAO, 2018).

La caracterización de un suelo es esencial para determinar su apropiado manejo y realizar planificación agrícola. La textura influye en otras propiedades como la densidad aparente, la porosidad y, por lo tanto, el movimiento y el almacenamiento de fluidos (agua y aire) en el suelo (Lacasta, Meco, & Maire, 2005).

Tabla 1. Disponibilidad de agua en el suelo en función de la textura

Grupo de textura	Capacidad de campo		Punto de marchitez permanente		Agua disponible	
	%	cm	%	cm	%	cm
arenoso	6.8	3.1	1.7	0.8	5.1	2.3
Franco-Arenoso	11.3	5.1	3.4	1.1	7.9	3.6
Franco	18.1	8.1	6.8	3.1	11.3	5.1
Franco-Arcilloso	21.5	9.7	10.2	4.6	11.3	5.1
Arcilloso	22.6	10.2	14.7	6.6	7.9	3.6

Fuente: (Sanchez, 2000)

2.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente se define como la relación de la masa de suelo seco por unidad de volumen del mismo (g.cm^{-3} o Mg.m^3). Es importante destacar que la D_a está íntimamente relacionada con el volumen de partículas sólidas y espacio poroso. (Hemríguez & Cabalceta, 2012). Se utiliza para estimar la compactación, la porosidad total, la micro y macro porosidad y humedad a saturación; sus valores y las texturas del suelo son influyentes en el crecimiento de las plantas (Lopez & Estrada, 2015). Cuando existe un incremento en la densidad aparente del suelo, la compactación y las condiciones de retención de humedad aumentan y se ven afectadas lo cual limita el crecimiento de las raíces (Salamanca, Sadeghian, & Amezquita, 2005).

2.1.3 Densidad real

La densidad real en el suelo se la conoce como la densidad de las partículas de forma independiente a su espacio poroso. Se corresponde al valor entre el peso de las partículas y el volumen que las mismas ocupan. También se la suele llamar gravedad específica o el peso específico del suelo, se expresa de igual forma que la D_a , en gramos por centímetro cúbico ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (Lazano-Rivas, 2016).

2.1.4 Porosidad

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse (FAO, 2022).

La porosidad del suelo en los primeros centímetros de profundidad determina en gran medida la infiltración y el escurrimiento del agua que condiciona su transporte hacia niveles superficiales o profundos (González-Barrios, González-Cervantes, Sánchez-Cohen, López-Santos, & Valenzuela-Núñez, 2011).

2.1.5 Humedad en suelos

Los suelos tienen la capacidad de retener diferentes cantidades de agua esto depende de la textura y estructura del mismo, el límite máximo de almacenamiento de agua se lo denomina “capacidad de campo” (CC), mientras que el límite mínimo es denominado “punto de marchites permanente” (PMP). Cuando existe algún evento que incorpore agua al suelo ya sea por medio de un riego programado o una lluvia el suelo tiende a saturarse, pero existe un rápido movimiento descendente del agua en el suelo denominado (drenaje), durante este proceso la humedad del suelo disminuye continuamente. Esta disminución de humedad en el suelo se la relaciona directamente con la conductividad hídrica de los suelos. Es decir, el drenaje en suelos con mucha más porosidad será más rápida que en un suelo más compacto (Zotarelli, Dukes, & Morgan, 2013).

Es importante el monitoreo de la humedad en suelos debido a que de este depende que el cultivo tenga la cantidad correcta de agua para la absorción de las plantas, esta es diferente a la capacidad de campo y se expresa en (volumen de agua/volumen de muestra de suelo). Tener niveles altos de humedad en el suelo no es favorable debido a que las plantas solo absorberán la cantidad que realmente necesitan de ella y un exceso de riegos puede ser

perjudicial para el cultivo llegando a producir pudrición radicular y la muerte del mismo, también influye en los costos y en la pérdida de fertilizantes debido a la lixiviación de los mismo.

2.2 Propiedades químicas del suelo

2.2.1 pH

El pH del suelo expresa el grado de acidez del suelo, es decir la concentración (en forma logarítmica) de hidrogeniones H^+ que existen en el suelo. En la escala de pH el valor máximo es de 14, siendo el valor de $pH=7$, el correspondiente a un suelo neutro. Son ácidos todos aquellos que tienen valores inferiores a 7, y básicos todos los superiores a éste (Soriano Soto, 2018).

2.2.2 Conductividad eléctrica

La concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato se mide mediante la CE. La CE es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales. Se recomienda que la CE de un sustrato sea baja, en lo posible menor a $1dS\ m^{-1}$ ($1+5\ v/v$). Una CE baja facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo (Barbaro, Karlanian, & Mata, 2014).

2.3 Sonda TDR 300.

El método TDR ("Time Domain Reflectometry") consiste básicamente en medir la velocidad de transmisión de una onda en una línea de transmisión. La señal TDR se mide a la salida de un generador de impulsión y representa la suma de las tensiones incidentes y reflejadas. La amplitud de esta señal es dependiente del tiempo ya que a cada instante la onda encuentra diferentes discontinuidades de impedancia durante la propagación en el medio, una fracción de la energía es reflejada hacia el generador (Sánchez et al., 1999).

Las sondas TDR y FDR trabajan mediante un método que a través de la constante dieléctrica o permitividad del suelo nos permiten conocer su contenido de humedad. Estos instrumentos se basan en la reflectometría del sistema aire-agua-suelo las sondas TDR (Time Domain Reflectometry) en la relación respecto al tiempo. Estas sondas obtienen el contenido de humedad del suelo en función del tiempo (Ferrándiz & Puerto, 2017).

2.3.1 Información del equipo

Esta sonda fue diseñada para una rápida y fácil medición, el registro de la humedad con precisión por medio de la tecnología TDR y GPS (Serna, 2017).



Figura 1. Sonda TDR 300

Fuente: (Spectrum Technologies, 2005)

- Unidades de medición: Porcentaje volumétrico de agua
- Precisión: más menos 3.0% de contenido volumétrico de agua con una conductividad <2 mS/cm.
- Rango: 0% a saturación (alrededor del 50% volumétrico de agua).
- Batería y duración: 4 pilas alcalinas AAA, aproximadamente 12 meses de duración de la batería.
- Incluye un juego de sondas de (1.5",3",4.8" 0 8").
- Incluye funda protectora.
- Data Logger: 3,250 mediciones sin GPS; 1350 con GPS/DGPS.

2.3.2 Funcionamiento de la sonda

La técnica TDR utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda electromagnética introducida en el suelo, la constante dieléctrica de éste y el contenido volumétrico de humedad (Cassel, Kachanoski, & Topp, 1994). La constante dieléctrica del suelo es la propiedad que determina dicho tiempo de tránsito. La velocidad de propagación, V_p , de la onda generada por el TDR o ecómetro viene dada por

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Ecuación 1. Velocidad de propagación

siendo L la distancia a la que viaja la onda a lo largo de la línea de transmisión y t el tiempo requerido. Como quiera que el ecómetro registra el viaje de ida y vuelta a lo largo de las líneas de transmisión, quedaría

$$V_p = \frac{2l}{t} \quad (2)$$

Ecuación 2. Velocidad de propagación en función a la longitud de las varillas siendo l la longitud de las varillas de la sonda o líneas de transmisión. La velocidad de propagación de una onda también puede escribirse como

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (3)$$

Ecuación 3. Velocidad de propagación en función a la velocidad de la luz y una constante K

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y K la constante dieléctrica relativa del medio. Igualando las ecuaciones (2) y (3), y despejando K, resulta:

$$K = \left(\frac{ct}{2l} \right)^2 \quad (4)$$

Ecuación 4. Constante K

A partir de la experimentación con un amplio rango de materiales porosos y contenidos de humedad, obtuvieron la siguiente ecuación empírica que relaciona K y el contenido de humedad volumétrica del suelo, θ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$):

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (5)$$

Ecuación 5. Contenido de humedad volumétrica del suelo

La universalidad de esta ecuación ha permitido la utilización del TDR en suelos muy diferentes y ambientes contrastados (Martinez J & Ceballos Barbancho , 2001).

2.3.3 Ventajas y desventajas

Ventajas:

- Es un modelo de sonda de un uso sencillo, la conexión directa de las varillas al ecómetro, sin interpretación de un transformador de impedancias ofrece una señal sencilla y nítida que agiliza el proceso de medición en el campo.

- La robustez de la sonda permite que su uso se de en suelos difíciles (arcillas, gravas, etc.). Al poder del golpeada directamente puede prescindirse del uso de una guía, tal como se ha propuesto en otros casos.

Desventajas:

- Alta inversión en equipos, por lo que se requiere consultar por un servidor para varios usuarios.
- Requiere buen contacto entre el suelo y las varillas de acero insertadas.
- Presenta problemas en suelos con altos contenidos de sal y materia orgánica, en suelos de textura gruesa y fina especialmente si son muy secos.
- No aptos para suelos rocosos o pedregosos, porque se produce un mal contacto entre la superficie de las varillas de acero y el suelo que rodea, generando bolsas de aire.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Ubicación geográfica del ensayo

El trabajo de investigación se llevo acabo en la Finca “El Marquez” la cual es propiedad del Ab. Victor Damian Chabla Cuenca en la via Machala – Pasaje, parroquia La Peaña, perteneciente al canton Pasaje, provincia de El Oro

Las coordenadas del predio son:

Latitud: 3°19'02" S

Longitud: 79°05'15" W

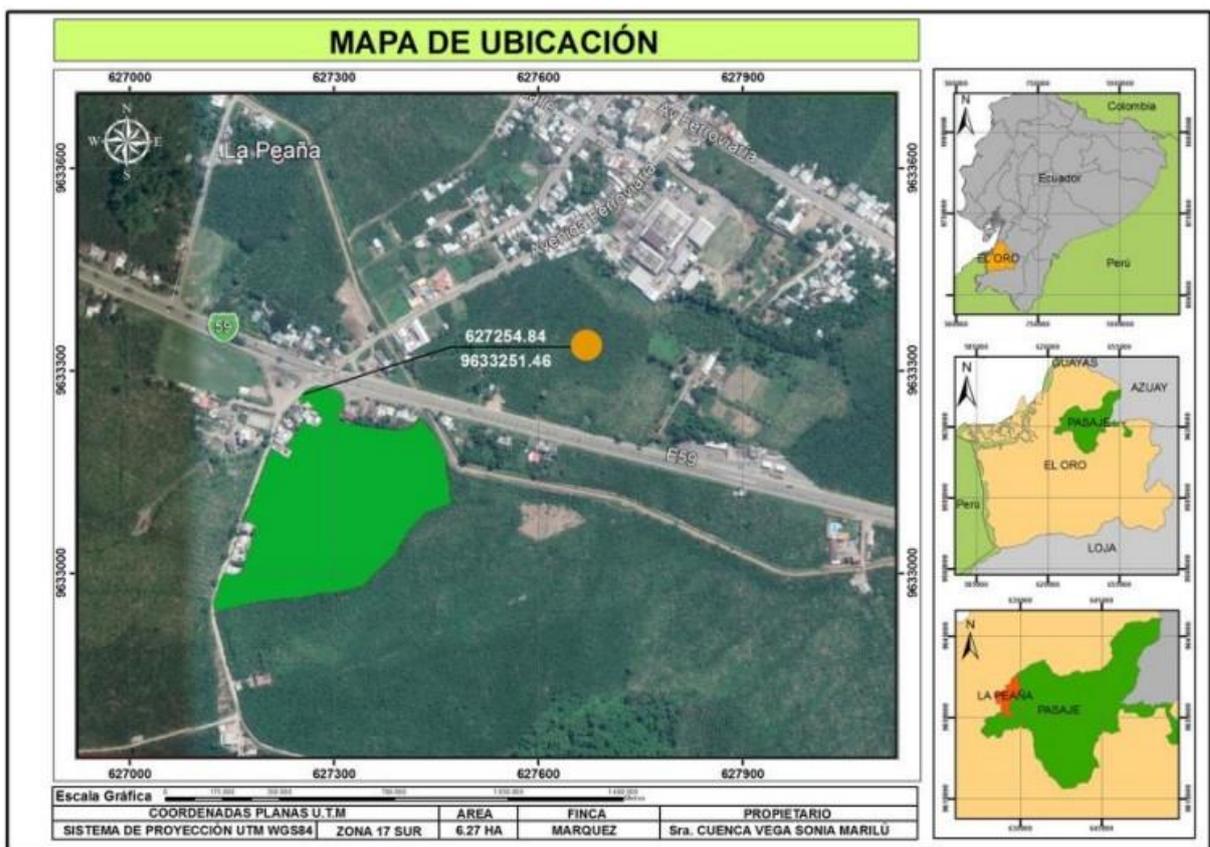


Figura 2. Mapa de ubicación de la finca El Márquez

Fuente: El autor

3.2 Climatología y ecología

Según los registros meteorológicos que se pudieron obtener de la estación meteorológica de la Granja Santa Inés son que la zona posee una temperatura media anual de 25°C, una precipitación media anual de 600 mm, el promedio de horas luz es de 2.8 y la humedad relativa es del 83%.

3.3 Equipos, reactivos y materiales.

Determinación de las propiedades físicas

- Palas
- Espátulas
- Cinta métrica
- Fundas plásticas
- Cilindros de hierro galvanizados (d= 5.4cm, h=5cm)
- Balanza digital
- Estufa
- Probetas
- Hornos
- Balones
- GPS

Determinación de la humedad por medio de la Sonda TDR

- Sonda TDR 300
- Varillas electrostáticas
- GPS
- Pilas
- Agua destilada

3.4 Metodología para ubicación de los sitios de muestreo y toma de lecturas

3.4.1 Localización de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo se distribuyeron de forma aleatoria por todo el predio de la finca, tomando 25 muestras por cada toma de datos con la sonda TDR en los meses de agosto a noviembre y en total se tomaron 149 muestras en el transcurso de la investigación.

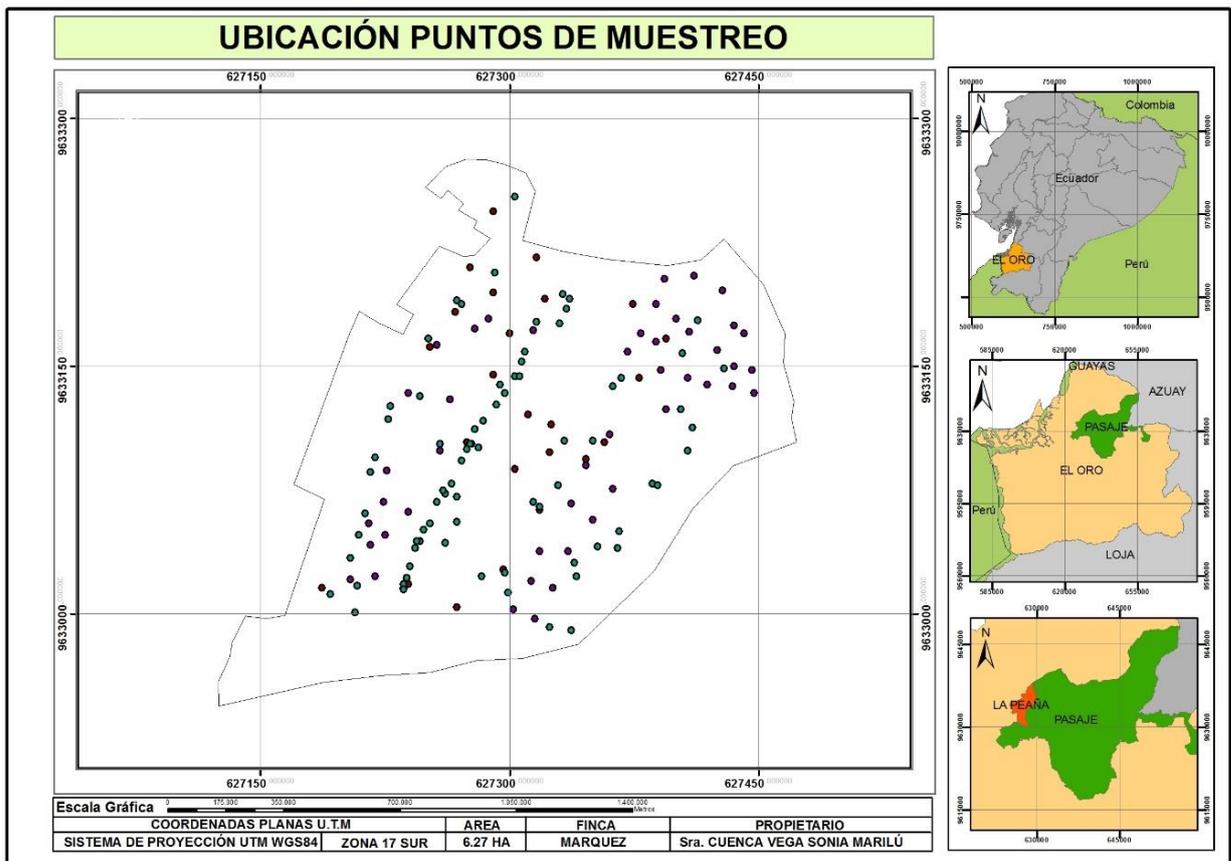


Figura 3. Puntos de muestreo en la finca El Márquez

Fuente: El autor

3.5 Métodos para la determinación de las propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo se las determinaron con la finalidad de sustentar la variabilidad de los contenidos de humedad en el suelo.

3.5.1 Determinación de la clase textural del suelo

La recolección de los datos se hizo de forma aleatoria tomando 25 muestras de suelo en el predio El Márquez a una profundidad de 20 cm, la determinación de las texturas de los suelos fue por medio del método Bouyoucos (FAO, 2018).

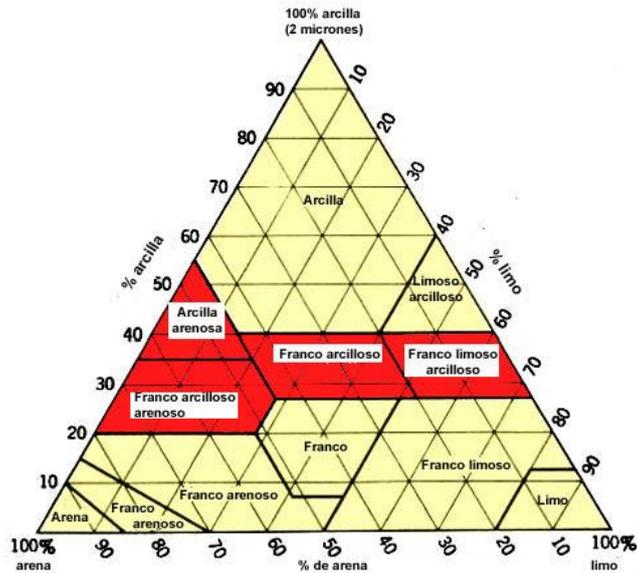


Figura 4.Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas

Fuente: (FAO, 2018)

3.5.2 Determinación de la densidad aparente (Da)

Mediante un cilindro de volumen conocido (vc) de hierro galvanizado, previamente pesado (mc), se introdujo en el suelo sin alterar la muestra y enrasado los bordes del cilindro, se llevó al laboratorio para ser secado en la estufa a 105°C por 24 horas, posterior al tiempo de secado, las muestras se pesan con el valor de suelo seco (mss). Despreciando el peso del cilindro se obtiene el valor del peso seco de la muestra y mediante la relación del peso seco con el volumen del cilindro se obtiene la densidad aparente.

$$Da = \frac{mss - mc}{vc} \quad (6)$$

Ecuación 6. Densidad aparente (Da)

Donde:

mss = masa del suelo seco a 105°C , expresado en g.

mc = masa del cilindro. expresada en g.

vc = volumen del cilindro, en cm^3

3.5.3 Densidad Real (Dr)

En el método del balón aforado (50 ml de capacidad) se agregan 5 g de suelo seco y tamizado a 2 mm en un balón previamente pesado (mpv), posterior del peso del balón con el suelo (mb+s), se llena el balón con agua destilada hasta la mitad de capacidad de este, para luego succionar con una bomba de vacío las burbujas que se forman en su interior, se enraza el balón y se pesa (mb+s+a). Para determinar el volumen de desplazamiento se debe pesar aforar el balón hasta el enrase con agua destilada y obtener su masa (mb+a). Una vez obtenidos todos los pesos se obtiene la densidad real utilizando la siguiente ecuación (Sandoval Estrada, Dörner Fernández, Seguel Seguel, Cuevas Becerra, & Rivera Salazar, 2012).

$$Dr = \frac{[(mb + a) - mbv]. pa}{[(mb + a) - mbv] - [(mb + s + a) - (mb + s)]} \quad (7)$$

Ecuación 7. Densidad real (Dr)

Donde:

mbv = masa del picnómetro vacío.

mb+a = masa del picnómetro más agua.

mb+s = masas del picnómetro más suelo.

mb+s+a = masa del picnómetro más suelo y más agua.

pa = densidad del agua a temperatura del ensayo.

3.5.4 Porosidad total (Pt)

La porosidad total se expresa como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros, se determinó a través de la relación entre la densidad aparente (Da) y la densidad real (Dr) y la diferencia de la parte sólida del suelo.

$$Pt = \left[1 - \frac{Da}{Dr}\right] \times 100 \quad (8)$$

Ecuación 8. Porosidad total

Donde:

Pt = porcentaje de porosidad total

Da = densidad aparente g.cm-3

Dr = densidad real g.cm-3

3.5.5 Porcentaje de humedad del suelo (Wg)

Para establecer el porcentaje de humedad se relacionó la masa de agua libre en un volumen de suelo, respecto a la masa de sólidos del mismo, expresado en porcentaje.

$$Wg(\%) = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (9)$$

Ecuación 9. Porcentaje de humedad del suelo

Donde:

Ph = peso del suelo húmedo (g)

Ps= Peso del suelo seco (g)

Wg (%) = Porcentaje de humedad del suelo

3.5.6 Porcentaje de humedad volumétrica del suelo (%)

El porcentaje de humedad volumétrica del suelo se lo determina con los datos de porcentaje de humedad gravimétrica y la densidad aparente, el mismo que se lo expresa en porcentaje.

$$\theta g(\%) = Wg(\%) \cdot Da \quad (10)$$

Ecuación 10. Porcentaje de humedad volumétrica del suelo

Donde:

Wg(%)= es el porcentaje de humedad gravimétrica del suelo.

Da= densidad aparente

$\theta g(\%)$ = Contenido de humedad volumétrica del suelo (%)

3.6 Determinación de pH y conductividad eléctrica (CE)

Se determino el pH y la conductividad eléctrica en solución de ClK 1 M, esto se lo realizo en laboratorio utilizando una muestra de 10 gr de suelo (TFSA), con el doble de su peso

con agua destilada (1:2), se preparó una pasta saturada y con la ayuda de una bomba al vacío se procedió a extraer solución de filtrado y en ella la determinación tanto el pH como la conductividad eléctrica.

3.7 Método para la calibración de la sonda TDR.

La calibración de la sonda es una parte fundamental para tener una lectura precisa del contenido volumétrico de agua que existe en el suelo, para esto primero se colocó las varillas de 20cm de longitud, luego se procedió a la calibración del equipo, colocando primero el equipo con las varillas en el aire para así poder tener una lectura en seco, fue de 1 y luego sumergiendo las varillas en agua destilada para poder tener la calibración en ese medio y su valor fue de 80, que son las constantes dieléctricas del aire y agua respectivamente, una vez calibrado el panel de control envía el mensaje de que la calibración de la sonda esta correcta y se procedió a utilizarla en la toma de datos.

3.8 Registro del contenido de humedad a través de la sonda TDR 300

Con esta sonda una vez calibrada se realizó las lecturas con la sonda TDR, in situ en tiempo real del contenido volumétrico en 25 sectores diversos, cada 15 días y en esos mismos sitios se recolecto la muestra a una profundidad de 20cm para hacer la determinación en laboratorio del contenido volumétrico del agua. Los sitios de muestreos fueron georreferenciados en los diversos sectores de la finca y completamente al azar.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo en la finca La flor.

Las distintas propiedades físicas de un suelo condicionan, favorecen o perjudican en la capacidad de almacenamiento o retención de humedad. (Garcia, Jiménez, Muriel, Perea, & Vanderlinden, 2005). En el análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo nos da como resultado una media de la densidad aparente de 1.4916 g/cm^3 , con un coeficiente de variación de 7.787% lo cual nos demuestra que no existen valores dispersos, es decir las densidades del suelo se mantenían en su totalidad homogéneas. Según el análisis el valor máximo de densidad aparente es de 1.60 g/cm^3 , una alta densidad aparente nos indica que el suelo esta compacto lo cual no favorece en el crecimiento de las raíces del cultivo y también influye directamente en la capacidad de retención del agua que puede llegar a tener ese suelo. Los suelos de clase textural franco presentan la media de densidad aparente más baja (1.4916 g/cm^3) y un porcentaje de porosidad más alto.

Tabla 2. Análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo

Estadístico	Da (g. cm^{-3})	Dr (g. cm^{-3})	Porosidad %
Media	1.4916	2.1249	29.7641
Máximo	1.6	2.40	48.99
Mínimo	1.01	1.3	16.84
S	0.11615	0.15449	5.66963
Asimetría	-1.719	-1.253	0.212
Curtosis	3.323	4.015	0.800
CV%	7.787	7.266	19.049

Fuente: El autor

4.2 Análisis descriptivo de las propiedades químicas del suelo en la finca “El Márquez”

Las propiedades químicas del suelo tanto el pH como la conductividad eléctrica de un suelo nos da una valiosa información acerca de la dinámica y disponibilidad de agua y

nutrientes existentes en el mismo, para el desarrollo de las plantas y la biota presente en el suelo (Cremona & Enriquez, 2020), los análisis descriptivos de los resultados de las toma de muestras de pH y CE nos dieron como resultado que en la finca “El Márquez” el pH mínimo es de 5.63 y su valor máximo es de 8.46, teniendo así una media de pH de 7.6159, estos valores están dentro de lo normal para una buena disponibilidad de nutrientes, en cambio los valores obtenidos de CE son de un mínimo de 0.18 y un máximo de 1.6, teniendo así una media de 0.464 lo cual es bajo y se puede decir que existe poca presencia de sales solubles en el suelo.

Tabla 3. Análisis descriptivo de las propiedades químicas del suelo

Estadístico	pH	CE (mS/m)
media	7.6159	0.464
Máximo	8.46	1.6
Mínimo	5.63	0.18
S	0.33148	0.24759
Asimetría	-1.835	1.97
Curtosis	8.877	6.099
CV%	4.352	53.36

Fuente: El autor

4.3 Análisis de los contenidos de humedad utilizando el diagrama de cajas y bigote

En el análisis descriptivo de cajas y bigotes da como resultado que entre los resultados obtenidos por medio de la sonda TDR y los resultados obtenidos en laboratorio, no existe diferencias significativas entre los métodos de determinación de contenido de humedad en el suelo, pese a que el método de laboratorio tiene un mayor rango entre los resultados de las muestras, la media de los dos se mantiene igual, lo que se puede señalar que en realidad los valores obtenidos son relativamente iguales. Sin embargo, la mayor dispersión de los datos se ve reflejado, con la determinación de humedad en laboratorio.

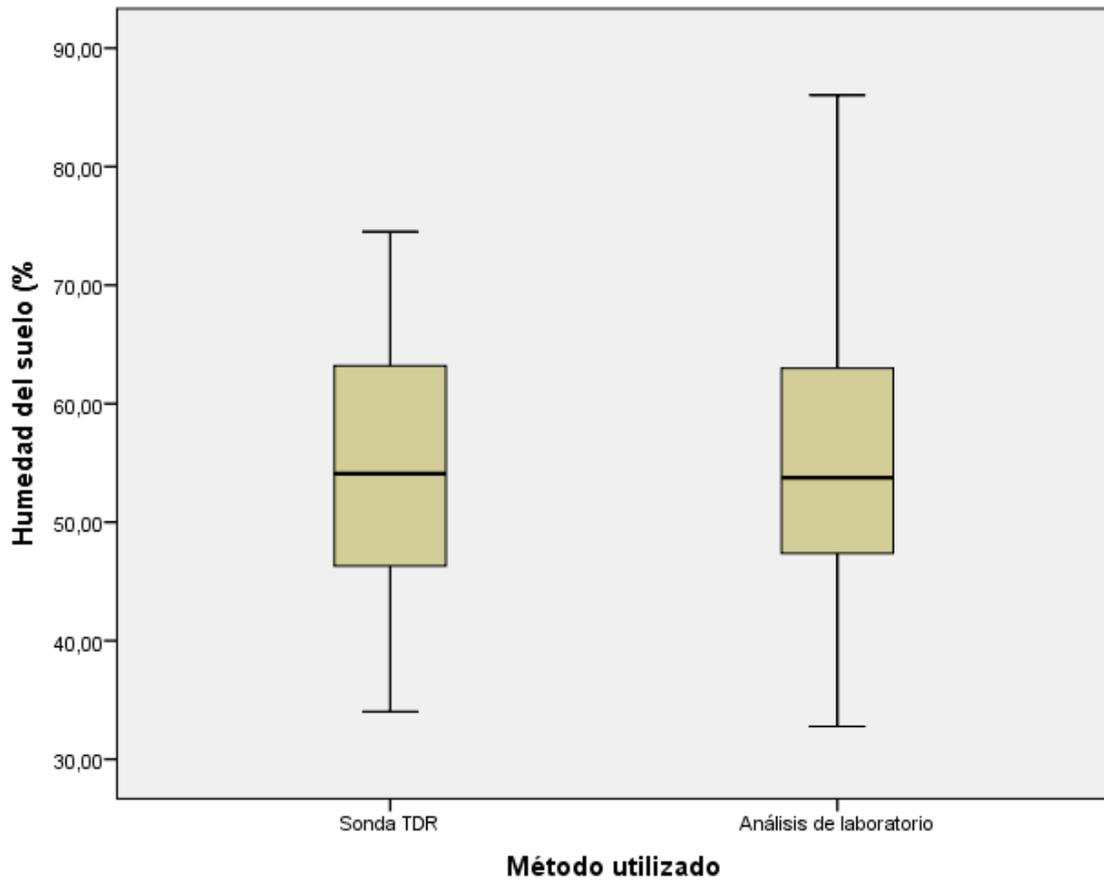


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes del contenido de humedad en el suelo y los métodos utilizados

Fuente: El autor

4.4 Análisis descriptivo del contenido de humedad volumétrica obtenidos por medio de la sonda TDR

La tabla nos muestra valores del contenido de humedad semanales, según los valores obtenidos por medio de la sonda los contenidos de humedad siguen una distribución normal según las semanas, su media máxima es de 57.988 y la media mínima de 50.415 esto en el transcurso del tiempo en el que se realizó la investigación, en las distintas tomas de muestras no se muestra una variabilidad significativa entre los datos debido a que en todas nos arrojan valores inferiores al 20% que según Pearson se considera que son valores homogéneos.

Tabla 4. Análisis descriptivo por semanas del contenido de humedad obtenida por la sonda

Estadístico	Semanas					
	34	36	38	40	42	44
media	56.742	54.496	57.988	54.942	50.415	51.624
Máximo	64	68.7	74.5	68.8	68.2	69.5
Mínimo	42.9	36.6	40.7	34	35.9	40
S	7.6044	10.5069	8.848	10.7431	8.4901	8.8401
Asimetría	-0.505	-0.048	-0.331	-0.489	0.749	0.453
Curtosis	-1.374	-1.456	-0.718	-0.639	0.324	-1.067
CV%	13.402	19.28	15.258	19.554	16.84	17.124

Fuente: El autor

4.5 Análisis descriptivo del contenido de humedad volumétrica obtenidos por medio de análisis en laboratorio

Según el análisis de los contenidos de humedad por semana obtenidos en laboratorio se puede evidenciar que siguen una distribución normal en el tiempo en que se realizó, su media máxima obtenida por semanas es de 58.7392 y su media mínima es de 51.8636, según los estadísticos descriptivos de la humedad en suelo por medio de laboratorio no se muestran variabilidad significativa en la semana 34,36,38. entre las muestras de las semanas 40,42,44 se puede evidenciar debido a que los valores del coeficiente de Pearson superiores al 20% que existe una variabilidad entre las muestras.

Tabla 5. Análisis descriptivo por semanas del contenido de humedad obtenido por el método gravimétrico

Estadístico	Semanas					
	34	36	38	40	42	44
media	54.1288	57.1673	58.7392	55.7458	52.4935	51.8636

Máximo	68.92	73.13	78.7	72.56	86.04	76.35
Mínimo	37.53	37.53	40	32.77	37.53	35.12
S	9.32467	11.37073	9.53536	11.80955	11.08264	10.60635
Asimetría	-0.273	-0.019	0.059	-0.415	1.672	0.768
Curtosis	-1.288	-1.396	-0.389	-0.75	3.555	0.084
CV%	17.227	19.89	16.233	21.185	21.112	20.45

Fuente: El autor

4.6 Análisis de la lámina de humedad calculada en (mm), con los datos determinados tanto con la sonda TDR y en laboratorio

El análisis de los valores de lamina de agua obtenidos por los dos métodos el de la sonda TDR y el método de laboratorio, se puede observar que existe la misma tendencia entre los métodos, siguen las mismas curvas se incremento y perdida, los rangos que manejan de las diferencias son aceptables por los márgenes de error que existen entre cualquiera de los dos métodos, los mismos que son 99% confiables al momento de desear tener una lectura de los contenidos de agua presentes en el suelo.

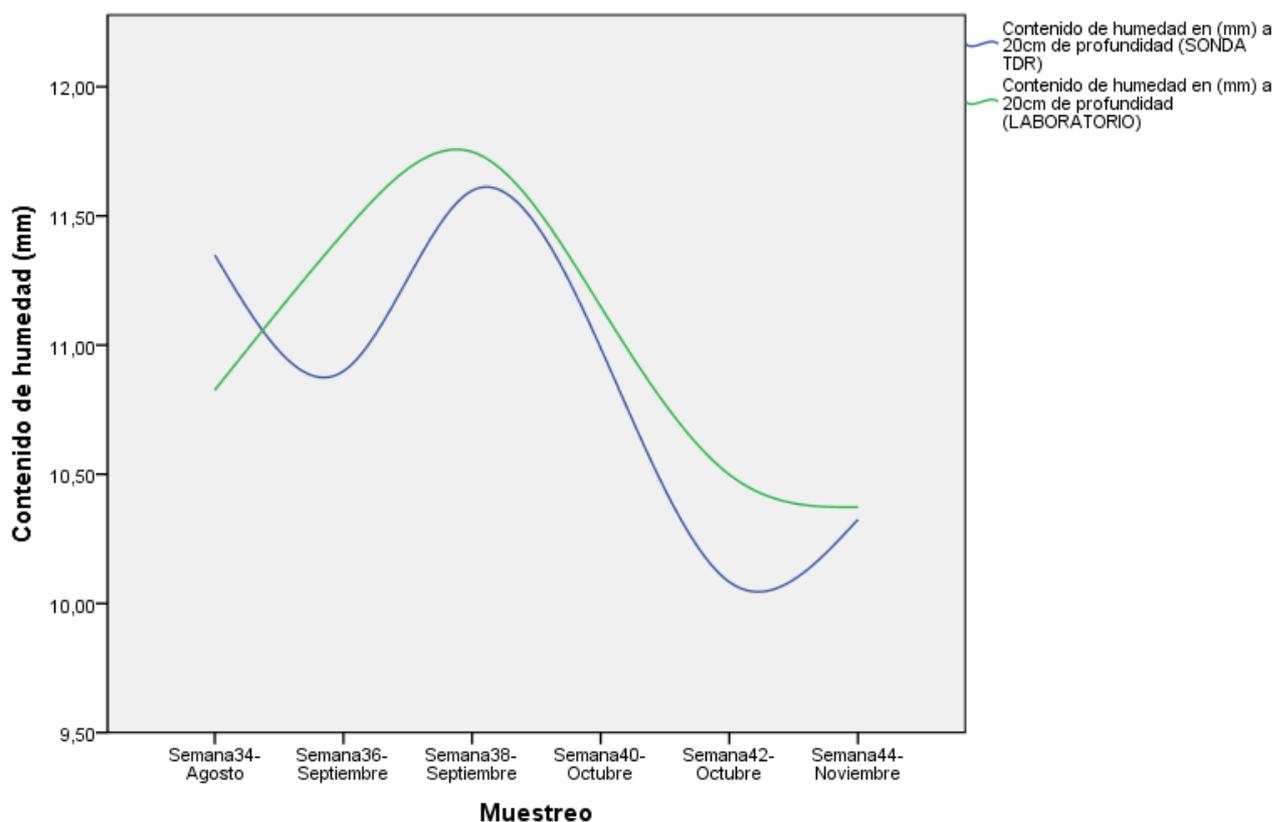


Figura 6. Contenidos de humedad(mm) obtenidos por la sonda TDR y laboratorio

Fuente: El autor

4.7 Análisis de correlación entre el contenido de humedad obtenido por la sonda TDR y por el método gravimétrico

De acuerdo a la tabla 6, el análisis estadístico de regresión lineal, existe una alta correlación entre los métodos de determinación de humedad del suelo, teniendo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.991 y un $R^2 = 0.83$ que según (Hidalgo, Pastor, Hidalgo, & Caja, 2003), es un valor razonablemente alto para este tipo de investigaciones. Esto determina que el uso de la sonda TDR, es totalmente confiable y sobre todo sus determinaciones son rápidas y en tiempo real.

Tabla 6. Resumen del método estadístico de regresión

Estadística de regresión	
Coeficiente de correlación de Pearson	0.991
Coeficiente de determinación (R^2)	0.83
R^2 ajustado	0.829
Error estándar	3.892

Fuente: El autor

4.8 Análisis comparativo de los métodos utilizados para la determinación del contenido de humedad en el suelo, utilizando la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes

El análisis que se realizó para comparar los valores obtenidos por medio de los dos métodos que se utilizaron para determinar el contenido de humedad en el suelo fue la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes con un porcentaje de variabilidad del 5% y un nivel de significancia de 0.796 lo que es muy cercano a 1 lo que nos da como resultado que la hipótesis previamente planteada de que si los valores obtenidos son iguales, es verdadera, la distribución de los valores en los dos métodos son relativamente iguales aceptando el margen de error permitido por la misma sonda TDR que es de más menos el 5%, esto se debe a los diversos factores climáticos que pueda interferir en la lectura.

Tabla 7. Resumen de contrastes de prueba de hipótesis

Hipótesis nula	Prueba	Sig	Decisión
La distribución de humedad del suelo(%) es la misma entre las categorías de Método Utilizado	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	,796	Conserve la hipótesis nula

Fuente: El autor

Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes

Método utilizado

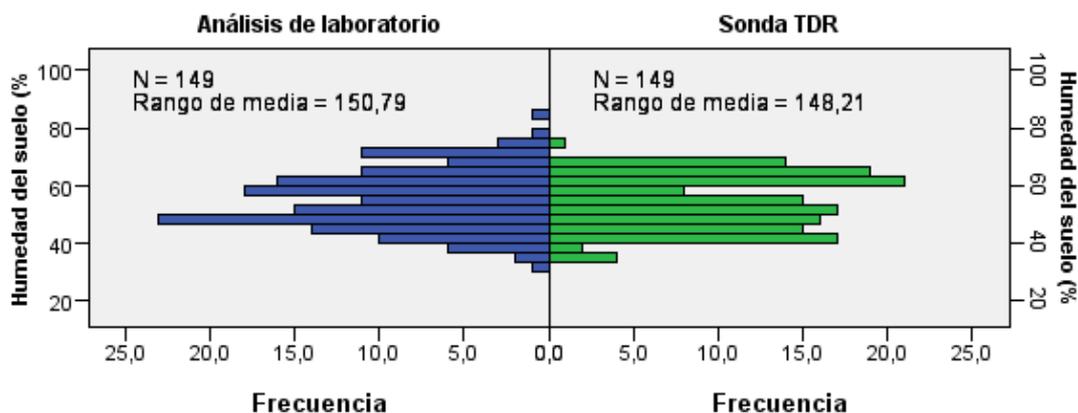


Figura 5. Grafica de los valores obtenidos en la prueba U de Mann-Whitney

Fuente: El autor

Tabla 8. Resumen de la prueba U de Mann-Whitney

N total	293
U de Mann-Whitney	11.293,000
W de Wilcoxon	22.468,000
Estadístico de contraste	11.293,000
Error estándar	743,717
Estadístico de contraste estandarizado	,259
Significación asintótica (prueba bilateral)	,796

Fuente: El autor

4.9 Análisis de correlación de Pearson entre las variables tomadas en cuenta en el proyecto

Se realizó un análisis de correlación entre todas las variables que se tomaron en cuenta en el proyecto como el contenido volumétrico de agua en el suelo por medio de la sonda TDR y por medio del laboratorio, también se tomó en cuenta la densidad real, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica y porosidad, para saber si las variables influyen en la lectura de los resultados que se obtuvieron por el método de la sonda se realizó esta correlación, dándonos como resultado los siguientes valores:

El contenido de humedad (%) obtenido por medio de la sonda y el contenido de humedad (%) gravimétrica, método utilizado en laboratorio, obtuvieron un coeficiente de correlación de Pearson de 0.911, lo cual indica que existe una alta correlación y al tener un nivel de significancia menor a 0.01 da como resultado que es una correlación muy significativa y se puede afirmar un 99% de confianza de que las variables contenido de humedad y contenido volumétrico son altamente correlacionables.

El contenido de humedad (%) obtenido por la sonda TDR y la densidad aparente tienen un coeficiente de correlación de Pearson de -0.412 es una correlación negativa y un nivel de significancia menor al 0.01 lo que indica que es una muestra con el 99% de confianza. En definitiva, a mayor contenido de humedad disminuye el valor de la densidad aparente.

El contenido de humedad (%) obtenido por la sonda TDR y la densidad real tienen un coeficiente de correlación de Pearson de -0.80 lo que indica que las muestras poseen un nivel de correlación negativa considerable, sin embargo, existe un nivel de significancia de 0.332 lo que da para interpretar que no existe relación entre el contenido de humedad y los valores de densidad real.

El contenido de humedad (%) obtenido por la sonda TDR y la porosidad tienen un coeficiente de correlación de Pearson de 0.162 lo que indica que existe una correlación débil positiva, y el nivel de significancia de las muestras es de 0.49, lo que se puede interpretar que con el 95% de confiabilidad que las muestras se correlacionan.

El contenido de humedad (%) obtenido por la sonda TDR y el pH tienen un coeficiente de correlación de Pearson de -0.15 lo que nos indica que existe una correlación negativa muy débil entre las variables, sin embargo, el nivel de significancia es superior a 0.05 que es el requerido para poder validar la hipótesis de una posible correlación entre las variables.

El contenido de humedad (%) obtenido por la sonda TDR y la conductividad tienen un coeficiente de correlación de Pearson de -0.100 lo que nos dice que existe una correlación negativa muy débil entre las variables, sin embargo, el nivel de significancia es superior al permitido para aceptar las hipótesis por lo cual se descarta que relación entre las variables.

Tabla 9. Resumen de análisis de correlación de Pearson entre las variables

	Contenido de humedad (%)	Contenido volumétrico (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad del suelo (%)	pH en agua	Conductividad eléctrica (ds/m)
Contenido de humedad (%)	1						
Contenido volumétrico (%)	,911**	1					
	.000						
	-,412**	-,530**	1				

Densidad aparente (g/cm ³)	.000	.000					
Densidad real (g/cm ³)	-.080	-.142	,413**	1			
Porosidad del suelo (%)	,162*	,184*	-,210*	,753**	1		
pH en agua	-.015	.079	-.137	-,178*	-.090	1	
Conductividad eléctrica (ds/m)	-.100	-.073	.086	.041	-.013	-,239**	1
	.223	.379	.298	.616	.877	.003	

Fuente: El autor

4.10 Distribución del pH y conductividad eléctrica (CE) en la finca El Márquez.

4.10.1 Distribución de los valores obtenidos de pH.

Se obtuvieron valores dentro del rango casi neutro con una media de pH de 7.62, con un casi 50% de la finca con un pH que fluctúa 7.61 a 7.62 figura 8, la determinación de las zonas con pH más elevado mediante gráficos es de suma importancia para así poder tener un mayor control sobre el manejo de los fertilizantes a utilizarse.

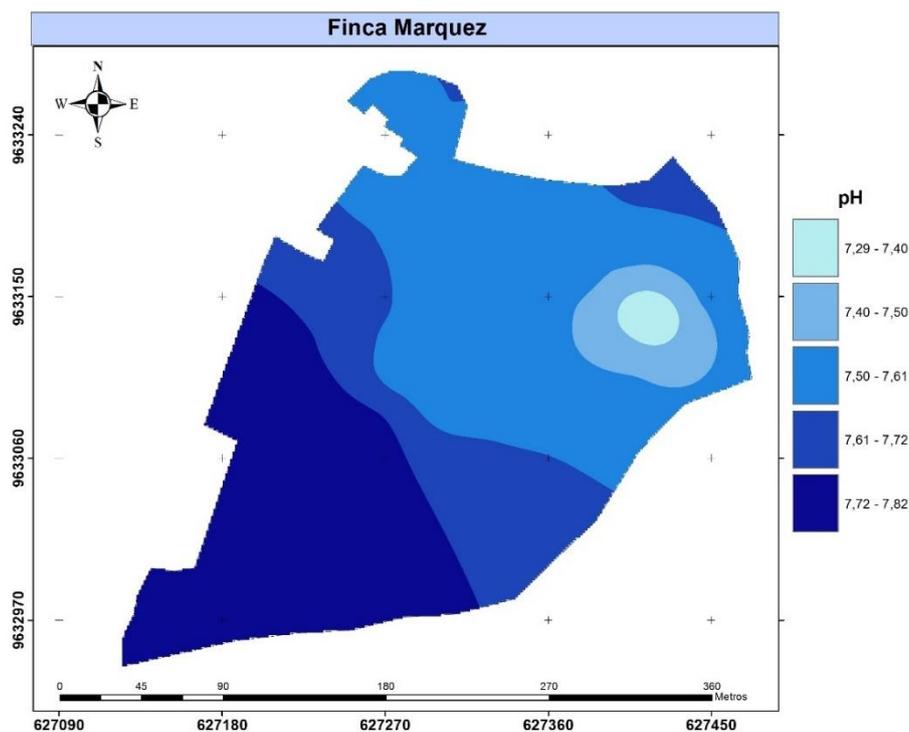


Figura 6. Distribución del pH en la finca El Márquez

Fuente: El autor

4.8.2 Distribución de los valores obtenidos de conductividad eléctrica (CE).

Se realizó la toma de muestras de CE en todo el predio correspondiente a la finca, se obtuvieron valores relativamente bajos y se graficaron los sitios donde hubo incrementos de los valores de la CE.

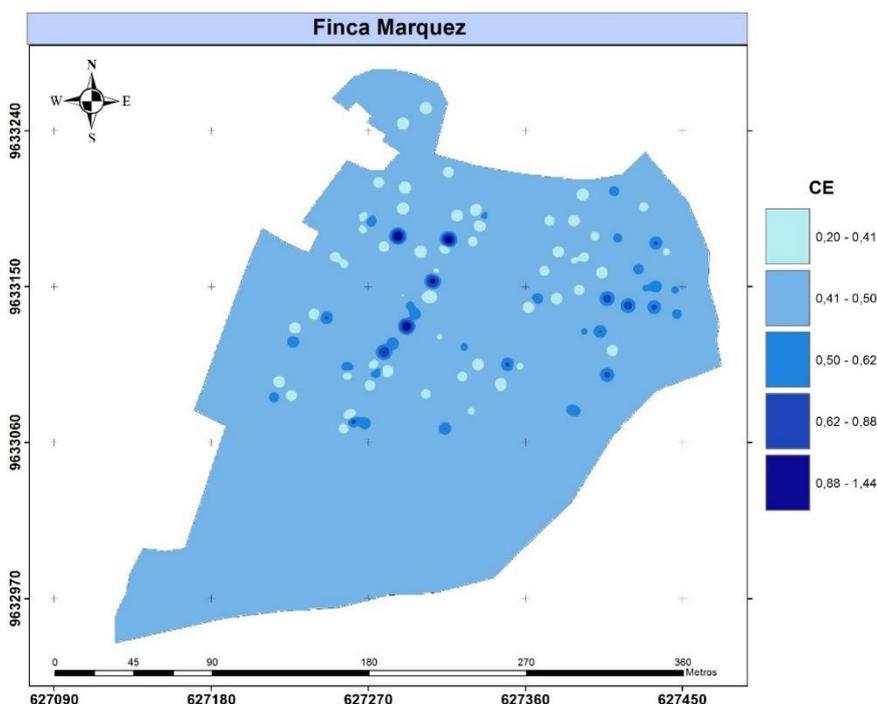


Figura 7. Distribución de la conductividad eléctrica en la finca El Márquez

Fuente: El autor

4.11 Distribución del contenido de humedad en el suelo obtenido por medio de la sonda TDR en la finca El Márquez.

4.11.1 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 34 del mes de agosto

El contenido volumétrico de agua en el suelo, dándonos como resultado valores entre los mínimos que son de 9.11 a 9.86 mm y valores máximos de contenido de agua de 12.4 a 12.84 mm, en el gráfico podemos ver las zonas donde existe una mayor presencia de agua y que representan más del 50% de área de la finca.

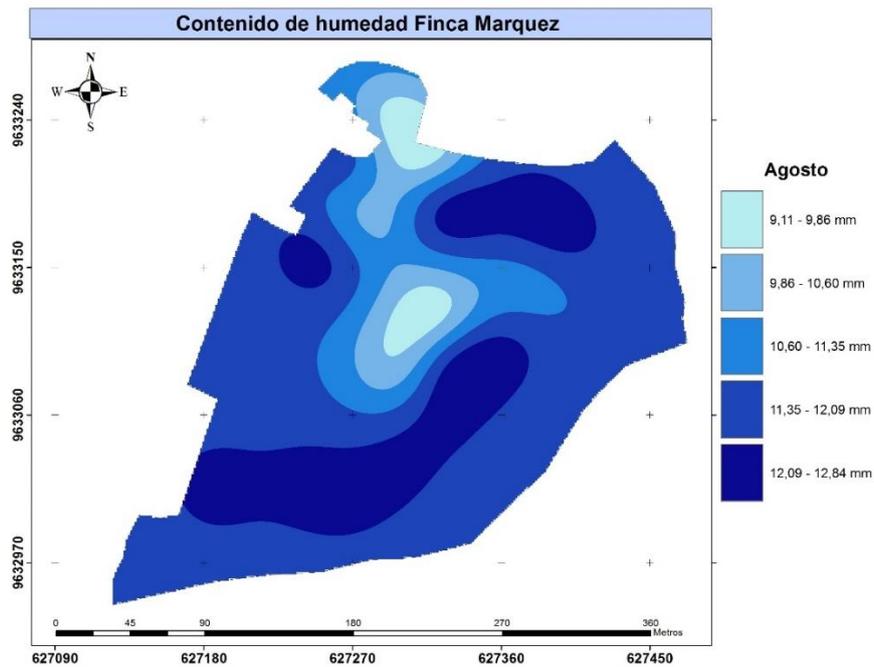


Figura 8. Distribución del contenido de humedad en la semana 34 del mes de agosto

Fuente: El autor

4.11.2 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 36 y 38 del mes de septiembre.

Los valores de contenido volumétrico de agua en el suelo, dándonos como resultado valores entre los mínimos que son de 6.72 a 8.30 mm y valores máximos de contenido de agua de 13.05 a 14.63 mm, en el grafico podemos ver e movimiento del agua en el transcurso del mes de septiembre.

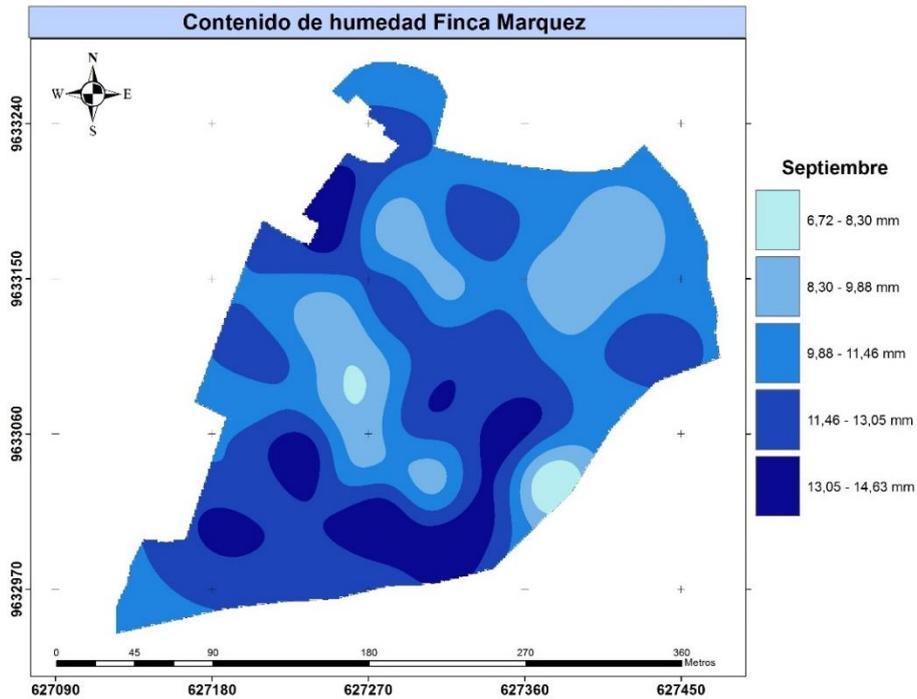


Figura 9. Distribución del contenido de humedad en las semanas 36 y 38 del mes de septiembre

Fuente: El autor

4.11.3 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 40 y 42 del mes de octubre.

Los contenidos volumétricos de agua en el suelo en estas semanas, da como resultado valores entre los mínimos que son de 7.19 a 8.45 mm y valores máximos de contenido de agua de 12.22 a 13.48 mm, en el grafico podemos ver e movimiento del agua en el transcurso del mes de octubre y también se puede apreciar que si bien es cierto el contenido de humedad mínimo es más alto pero los contenidos en general de los valores de este mes se mantuvieron más bajos que los anteriores.

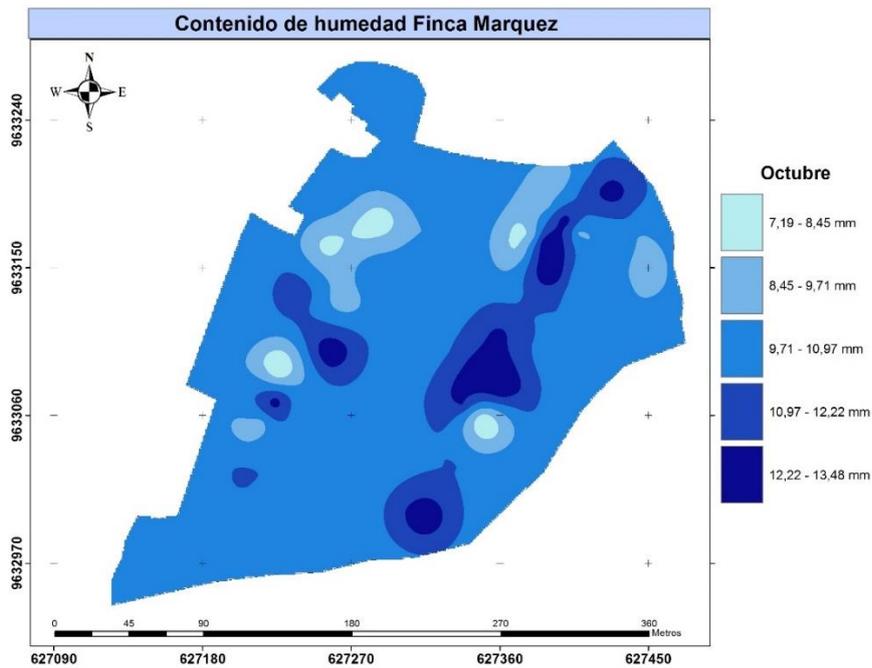


Figura 10. Distribución del contenido de humedad en las semanas 40 y 42 del mes de octubre

Fuente: El autor

4.11.4 Distribución del contenido volumétrico de humedad por la sonda TDR en la semana 44 del mes de noviembre.

Los contenidos volumétricos de agua en el suelo representados en la figura 13, da como resultado valores entre los mínimos que son de 8.21 a 9.33 mm y valores máximos de contenido de agua de 12.69 a 13.61 mm, con ayuda del grafico se puede observar el movimiento del agua en la primera semana del mes de noviembre, también podemos ver que existe en una sola zona una presencia de agua elevada.

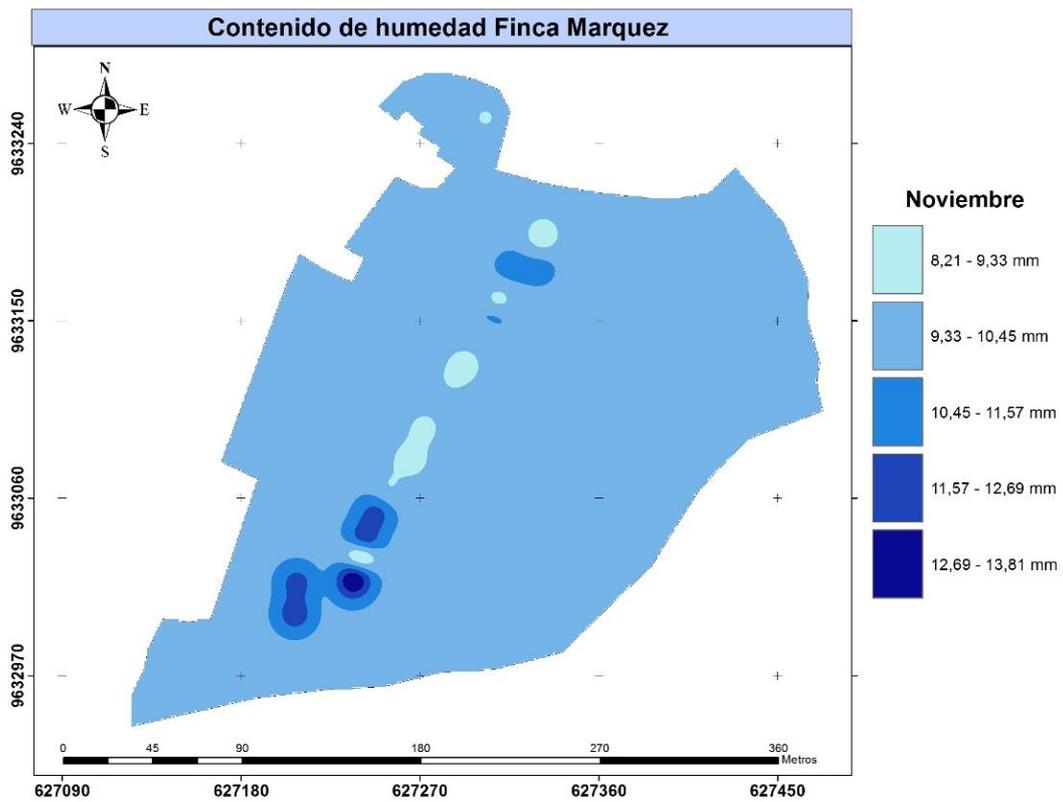


Figura 11. Distribución del contenido de humedad en la semana 44 del mes de noviembre

Fuente: El autor

5. CONCLUSIONES

- El coeficiente de determinación y la correlación de Pearson demuestra que la sonda TDR es un método eficiente para la determinación del contenido volumétrico de agua en el suelo, pese a las distintas condiciones físicas y químicas del suelo, esta presenta una eficaz medición en tiempo real.
- Al comparar la humedad volumétrica obtenida por la sonda TDR y la humedad gravimétrica obtenida por medio de laboratorio, se concluye que los valores se adaptan al margen de error de un más menos 3%, mismos que son permitidos por el instrumento.
- La utilización de la sonda puede inferir directamente en el manejo de los contenidos de humedad en el suelo, debido a que se pueden obtener registros de una manera rápida y fácil a lo largo del tiempo.
- Realizar una correcta calibración de la sonda TDR en las condiciones específicas de cada zona es de suma importancia para tener una buena lectura de los valores de contenido de humedad presentes en el suelo en tiempo real.
- La correlación entre los contenidos de humedad obtenidos por la sonda TDR y los valores de humedad obtenidos en el laboratorio dieron como resultado la siguiente ecuación ($y = 1.033x - 1.2015$), donde (y) se representan los valores de laboratorio y (x) los valores obtenidos por la sonda.

6. RECOMENDACIONES

- El uso de la sonda TDR para la determinación del contenido de humedad y la lámina de agua presente en el suelo, para la optimización de recursos como el tiempo, debido a que la misma hace las mediciones en tiempo real.
- Previo a la utilización de la sonda asegurarse que la calibración de la misma sea la correcta conforme a los parámetros establecidos por el fabricante para así poder tener una lectura adecuada y real.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Barbaro, L., Karlanian, M., & Mata, D. (2014). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. *Presidencia de la Nación, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)*, 1-11.
- Cassel, D. K., Kachanoski, R. G., & Topp, G. C. (1994). Practical considerations for using a TDR cable tester. *Soil technology*, 7(2), 113-126.
- Cremona, M. V., & Enriquez, A. S. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El Ph y la conductividad eléctrica. *Presencia*, 5-8.
- FAO. (3 de Junio de 2018). Obtenido de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
- FAO. (2022). Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Ferrándiz, J., & Puerto, H. (2017). *Estudio del manejo del agua de riego mediante sensores de humedad*. Elche: Universida Miguel Hernández de Elche.
- Ferreya, R. (2018). Programación y control del riego basado en la lectura de sensores. *INIA*, 1-6.
- García, I., Jiménez, J., Muriel, J., Perea, F., & Vanderlinden, K. (2005). Evaluación de sondas de capacitancia para el seguimiento de la humedad de un suelo arcilloso bajo distintas condiciones y tipos de manejo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII*, 101-107.
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 369-377.
- Hemríguez, C., & Cabalceta, A. (2012). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola* (2 ed.). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

- Hidalgo, J., Pastor, M., Hidalgo, J. C., & Caja, S. (2003). Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 7, 171-175.
- Lacasta, C., Meco, R., & Maire, N. (9-11 de Noviembre de 2005). Evolución de las producciones y de los parámetros químicos y bioquímicos del suelo, en un agrosistema de cereales sometido a diferentes manejos de suelo durante 21 años. *El Reto de la Agricultura, el Medio Ambiente, la Energía y la Nueva Política Agraria Común*, 429-436.
- Lazano-Rivas, W. (2016). *Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio* (1 ed.). (JSTOR, Ed.) Colombia: Universidad Piloto.
- Lopez, M., & Estrada, H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrobiencias*, 8(1), 3-11.
- Martí, P., Turégano, J., & González-Altozano, P. (7-8 de Junio de 2011). Utilización de las sondas FDR como herramienta de apoyo para la gestión del Riego. *In XXIX Congreso Nacional de Riegos. Córdoba. España*, 1.
- Martinez J, & Ceballos Barbancho , A. (2001). Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. *Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca*, 1-7.
- Salamanca, A., Sadeghian, S., & Amezquita, E. (2005). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *Cenicafé*, 330-340.
- Sánchez Pérez, J. M., Laurent, J. P., Bohy, M., Auzet, A. V., & Thony, J. L. (1999). Evaluación de un nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR. *Estudios de la zona no saturada del suelo. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.*, 33-38. Obtenido de https://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v4/i-05.pdf
- Sanchez, J. (2000). Factores, Aplicaciones. Seminario de Fertirrigación. *Apukai-Comex*, 1-26.

- Sandoval Estrada, M., Dörner Fernández, J., Seguel Seguel, O., Cuevas Becerra, J., & Rivera Salazar, D. (2012). Metodos de analisis fisicos de suelos. *Publicaciones - Departamento de Suelos y Recursos*, 46-194.
- Serna, R. G. (2017). SONDA TDR. *SCRIBD*, 1-4.
- Soriano Soto, M. (2018). pH del suelo. *Universitat Politècnica de València*, 1-10.
- Spectrum Technologies, I. (2005). *Kosmos.mx*. Obtenido de Kosmos.mx: https://www.kosmos.com.mx/wp-content/uploads/2018/01/6430FS_TDR300.pdf
- White, R. (2005). Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource. *Cuarta edicion. Oxford: Blackwell*, 384.
- Zotarelli, L., Dukes, Y., & Morgan, T. (2013). Interpretacion del contenido de la humedad del suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en suelos Arenosos utilizando sensores de humedad. *The Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS) Extension University of Florida*, 2-5.
- Castro G, G., & P. Chiquillo, H. (2016). Evaluación de tres alternativas de fertiriego. *Revista Ingeniería y Región*, 49-55. doi:<https://doi.org/10.25054/22161325.1298>

8. ANEXOS







Gráfico Q-Q normal de Humedad del suelo (%)
para Método= Sonda TDR

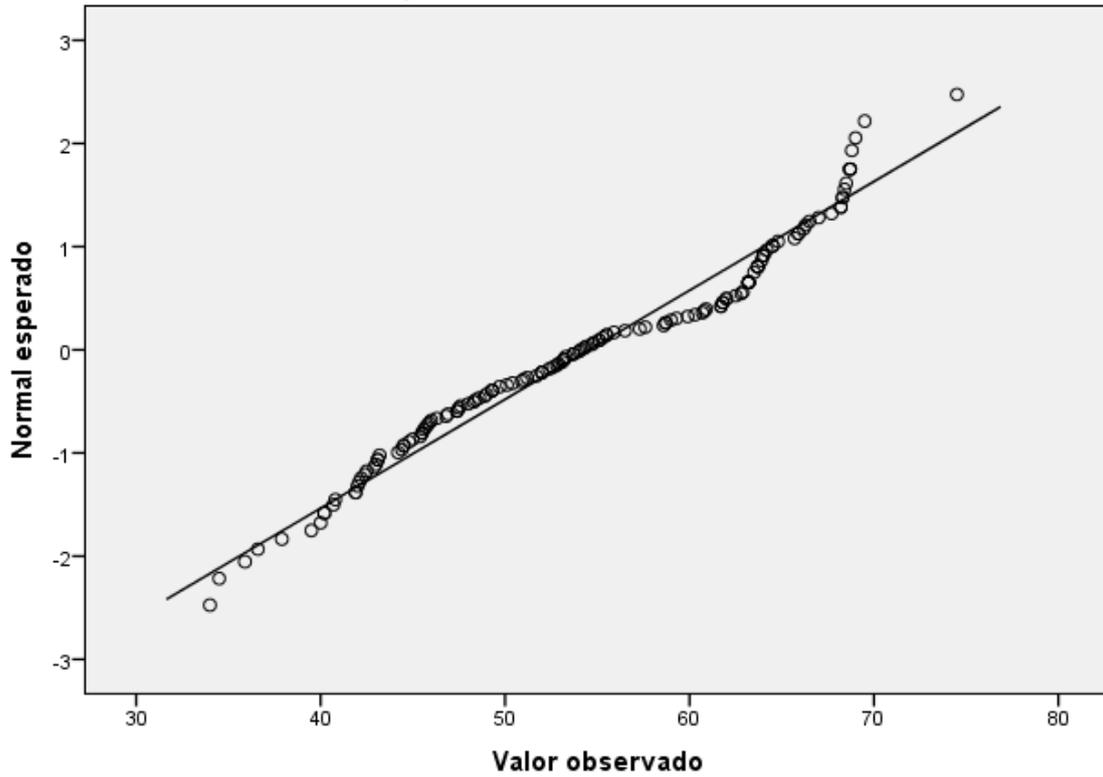


Gráfico Q-Q normal de Humedad del suelo (%)
para Método= Análisis de laboratorio

