

“Análisis de la humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca con sensores de radar de apertura sintética (SAR)”

Presentado por:

Elkin Arango

Trabajo como requisito para optar al título profesional de:

Agrónomo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia Cead Palmira

Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente

Programa: agronomía

Palmira - Valle

2020

“Análisis de la humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca con sensores de radar de apertura sintética (SAR)”

Presentado por:

Elkin Arango

Trabajo dirigido por:

Milton César Ararat Orozco

Ingeniero Agrónomo, PhD.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia Cead Palmira

Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente

Programa: agronomía

Palmira - Valle

2020

Dedicatoria

Dedicado a: Rosa M. Escobar.

Agradecimientos

1. A Dios por darme sabiduría.
2. A mis hijos Santiago e Isaac por ser el motor de mi vida.
3. A mi madre y esposa que estuvieron prestas a darme su apoyo.
4. A director Milton César Ararat, por su apoyo y asesoría constante
5. A DR. Mauricio Castro y la Ing. Doris Cruz por brindarme su conocimiento y orientación en este proceso tan importante.
6. A Grupo SAN JOSÉ por brindarme el espacio y la facilidad de capacitarme.

Tabla de Contenido

Resumen	11
Abstract	12
1. Introducción	13
2. Justificación	14
3. Objetivos	16
3.1. Objetivo General.	16
3.1.1. Objetivos Específicos.....	16
4. Marco Teórico Y Conceptual	17
4.1. Determinación Humedad Del Suelo.	17
4.2. Métodos de detección de humedad del suelo.	18
4.2.1. Método Gravimétrico.....	18
4.3. Métodos In situ	18
4.3.1. Métodos dieléctricos.....	18
4.3.2. Método tensiómetro.....	19
4.3.3. Determinación humedad gravimétrico.	20
4.4. Densidad Aparente (Da)	20
4.5. Teledetección.....	21
4.6. Fundamentos SAR.	21
4.6.1. El concepto de Radar y el sistema SAR.....	21
4.6.2. Polarización:.....	21
4.7. Plataformas satelitales sensores de radar de apertura sintética (SAR):	22
4.8. Estudio De Caso:	23
5. Metodología.....	25
5.1. Localización Del Lote Experimental.....	25
6. Resultados y discusiones.....	32
7. Conclusiones	44

8.	Recomendaciones	45
9.	Referencias bibliográficas.....	46

Índice De Tablas.

Tabla 1 Identificación profundidad de horizontes en 10 sitios de muestreo	28
Tabla 2 Distribución de 8 sitios de monitoreo en la suerte 18 (lote experimental)	29
Tabla 3 Fechas en las que se tomaron muestras de Humedad, Densidad aparente y retrodispersión. ...	30

Índice De Figuras.

Figura. 1 NDVI media (a) y gamma VV (b) y VH (c) series temporales de retrodispersión para maíz, soja, pasto y frijol (Navarro, et al. 2016).	24
Figura. 2 Ubicación a escala subregional lote experimental Suerte 18 Hacienda la Josepilla, geolocalización de sitios de monitoreo en áreas con mayor y menor CEa en zona con pivot y sin pivot.	26
Figura. 3 Organigrama estructural ejecución del proyecto	27
Figura. 4 Distribución CEa, sitios de monitoreo, área regada con pivote y área regada por gravedad y perfil de sitios de monitoreo (M, Castro. 2020)	32
Figura 5. Disponibilidad de imágenes en función del tiempo en dos satélites de observación terrestre llamados Sentinel 1 y Sentinel 2 durante el año 2019.	35
Figura. 6 grado de relación lineal existente entre Retrodispersión y Tensiometría por M, Castro. 2020	36

Lista de Acrónimos

SAR	Radar de Apertura Sintética
ESA	Agencia Espacial Europea
Sentinel	Satélite de monitoreo terrestre.
CEa	Conductividad Eléctrica Aparente
RDT	Reflectometría en el dominio temporal
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
Vf	Volumen de poros
Va	Volumen de solido
Vw	Volumen de agua
Da	Densidad aparente
Vt	Volumen de la muestra
D	Diámetro del cilindro
OEM	Onda Electromagnética
HH	Transmisión y recepción Horizontal,
HV	Transmisión Horizontal, recepción Vertical,
VH	Transmisión Vertical, recepción Horizontal,
VV	Transmisión y recepción Vertical

SPOT-5	Satélite de observación terrestre
dB	Decibeles
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
EO	Observación de la tierra.
CC	Cenicaña Colombia
CE	Conductividad Eléctrica
pH	Potencial de Hidrogeno
M.O	Materia Orgánica
P	Fosforo
K	Potasio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio
Fe	Hierro
Mn	Manganeso
Cu	Cobre
Zn	Zinc
B	Boro

Resumen

La teledetección a través de sensores remotos, constituye una excelente herramienta de gran envergadura para la implementación de programas de monitoreo de humedad en suelos con distintos cultivo entre otros usos, con el fin de poder hacer uso eficiente del recurso hídrico en cultivos industriales como el de la caña de azúcar, la cual tienen como objetivo analizar la humedad en suelos propios del valle geográfico del río Cauca sembrados con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), teniendo como sistemas de riego pivot central y gravedad con ventanas. Se utilizaron imágenes de sistema Radar de Apertura Sintética (SAR) las cuales se encuentran disponibles en “la Agencia Espacial Europea” (ESA) Copernicus Open Access Hub, logrando obtener imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-1B cada 6 y 12 días, a nivel de campo se evaluó la humedad por métodos gravimétrico y volumétrico para determinar la humedad de suelos en los 8 sitios determinados como objeto de evaluación en un lote comercial cultivado con caña de azúcar, la información de campo obtenida fue sometida a filtros estadísticos para dar un mayor soporte a las conclusiones.

De esta manera se logró determinar que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada relativo (NDVI_r) durante el periodo evaluado tuvo un avance en el tiempo debido al aumento de la biomasa y aumento de la clorofila, no obstante, VH/VV tuvo un muy buen avance en el crecimiento de la biomasa del cultivo, del mismo modo, la retrodispersión en VV y la humedad volumétrica fueron similares con excepción de una fecha donde hubo precipitación y en simultánea hubo un evento de riego

Palabras claves: teledetección, imágenes satelitales, métodos de monitoreo, Sentinel-1 y Sentinel-1B y suelos del valle del Cauca

Abstract

Remote sensing through remote sensors is an excellent tool of great importance for the implementation of moisture monitoring programs in soils with different crops, hence the importance of this thesis which aims to compare moisture monitoring methods in soils of the geographical valley of the Cauca River planted with sugar cane (*Saccharum officinarum*), having as central pivot and gravity irrigation systems with windows Synthetic Opening Radar (SAR) system images were used which were obtained directly from the agency the European Space Agency (ESA) Copernicus Open Access Hub, which allowed to obtain images of Sentinel-1 and Sentinel-1B every 6 days. Within the following document you can see descriptive statistical analyzes, which support the information obtained during the execution period.

Keywords: Soil moisture, SAR data, Sugarcane (*Saccharum officinarum*), monitoring methods, Sentinel-1 and Sentinel-1B.

Introducción

El valle del río Cauca es una región que puede ser considerada de humedad media con suelos de textura fina, donde se siembra y cosecha caña de azúcar durante todo el año. El riego se ha tomado como una práctica habitual y en el 95% del área cultivada se aplican riegos suplementarios. En años normales la precipitación oscila entre 800 y 2600 mm con dos períodos lluviosos que abarcan los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre. La disponibilidad de agua para riego ha decrecido notablemente durante los últimos años tanto por cambios en la cantidad y la frecuencia de las lluvias como por las mayores demandas de agua para usos municipal e industrial (Cruz, 2015).

Entre los desafíos del sector agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, se encuentra el desarrollo de alternativas tecnológicas para el mejorar las condiciones edáficas, al tiempo que mitiguen los impactos ambientales sobre el suelo y los recursos hídricos (Sanclemente *et al*, 2015), así como también la inclusión de tecnologías que generen valor agregado al proceso productivo del cultivo.

Lo anterior conlleva a la necesidad que el monitoreo del agua sea eficiente y eficaz, en el sector agroindustrial de la caña de azúcar existen varios métodos y procedimientos para determinar la humedad del suelo en campo y por ende la calidad y eficiencia de la aplicación de riegos suplementarios, sin embargo, algunos métodos suelen ser imprácticos y dispendiosos los equipos de medición pueden ser muy costosos para un pequeño y mediano productor, de ahí la importancia de validar e innovar con equipos y métodos de fácil acceso y prácticos para el monitoreo de humedad.

En ese orden de ideas, el presente estudio presentará una posible oportunidad de mejora relacionada con el monitoreo de humedad de modo remoto, utilizando imágenes de satelitales de libre acceso por medio de las cuales se puede obtener una radiografía del suelo y su contenido de humedad.

Justificación

Los sensores de radar de apertura sintética (SAR), utilizados para el monitoreo cuantitativo basado en modelos de predicción de respuesta física o estadística (El Hajj et al., 2016), permiten representar la estructura espacio temporal de la humedad del suelo a escala de lote (Bousbih et al., 2018), además tienen la ventaja de realizar estimaciones rápidas, precisas y económicas, constituyéndose en una alternativa tecnológica para aumentar la eficiencia de aplicación de riego y manejo de cultivos comparada con los métodos convencionales.

Recientemente, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó la constelación satelital Sentinel-1, la cual tiene un sensor de radar en la banda C (Mattia et al., 2015), y aunque se han realizado numerosos trabajos utilizando los SAR, en los cuales se han monitoreado diversos procesos hidrológicos y de biomasa de los cultivos (De Zan, Parizzi, Prats-Iraola, & López-Dekker, 2014; Gorraeb, Zribi, Baghdadi, & Chabaane, 2016), determinando la variabilidad de múltiples características del suelo, con un número limitado de muestras (Castro Franco, Costa, Peralta, & Aparicio, 2015), no se tiene evidencia de trabajos que estimen la dinámica espacio-temporal de humedad del suelo a partir de datos SAR obtenidos con Sentinel-1, en condiciones agro productivas de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca; de ahí la importancia de este estudio.

De acuerdo a lo anterior es pertinente evaluar el potencial de los datos SAR Sentinel-1, para estimar esta dinámica a escala de lote comercial y en condiciones locales, debido a que, las imágenes obtenidas pueden asegurar la eficiencia de monitoreo de humedad y determinar el efecto del esquema de monitoreo sobre esta estimación lo que hace que estudio sirva como base para nuevos estudios con temas relacionados.

Según Ararat (2014) la valoración agronómica de parámetros del suelo, pueden estar asociados a los objetivos del rendimiento del sistema del cultivo y en este caso sirven como herramienta en la observación de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El agua es esencial para la vida. Pero para muchos millones de personas en todo el mundo es un recurso escaso; por eso luchan diariamente para conseguir agua apta para el consumo y para atender a sus necesidades básicas. Millones de niños siguen muriendo todos los años a causa de enfermedades transmitidas por el agua que se pueden prevenir. Los desastres naturales relacionados con el agua, como son las inundaciones, las tormentas tropicales y los tsunamis, cobran un alto precio en vidas y sufrimiento humanos, es por eso que el monitoreo de este líquido vital es un pilar para la humanidad (Alba Tamarit, E. et al 2012)

Objetivos

Objetivo General.

Analizar la humedad del suelo cultivado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en lote comercial bajo dos sistemas de riego por diferentes métodos.

Objetivos Específicos.

Estimar la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo a partir de un equipo sistematizado in situ del lote comercial sembrado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

Determinar la humedad del suelo por gravimetría del lote comercial sembrado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) bajo el sistema de riego pivotante y riego sin pivote.

Medir la humedad del suelo con Sistema Radar de Apertura sintética (SAR) por medio de la plataforma Copernicus Open Access Hub, en lote cultivado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) bajo el sistema de riego con máquina pivote y sin pivote.

Comparar la humedad del suelo obtenida por el Sistema Radar de Apertura sintética (SAR), y el método volumétrico en cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) sometido a riego pivotante y gravedad

Marco Teórico Y Conceptual

Determinación Humedad Del Suelo.

Convencionalmente, la humedad del suelo se mide in-situ a través de diversos sensores y técnicas. Los sitios y métodos in-situ suelen ser seleccionados al azar o de acuerdo a información disponible de cartografía de suelos a escalas menores a 1:10.000 (Carbonell González, Quintero Durán, Osorio Murillo, & Isaacs Echeverri, 2011; Quintero Duran, Muñoz Arboleda, Torres Aguas, & Osorio Murillo, 2008). Es ampliamente conocido que la dinámica de humedad del suelo es sensible a los patrones de propiedades del suelo. Por lo tanto, las mediciones in-situ no suelen ser suficientes para determinar la dinámica espacial de la gran mayoría de propiedades del suelo. También es importante en este tipo de determinaciones, tener en cuenta la consociación de suelo, entendida como una unidad cartográfica que tiene un solo componente en forma dominante, el cual puede ser unidad taxonómica o área miscelánea. Cuando se trata de unidades en las que predominan suelos, las inclusiones que completan la unidad ya sea que se trate de otros suelos o de áreas misceláneas, no deben representar más del 15 % de la unidad. Cuando se trate de unidades en las que predominan áreas misceláneas, las inclusiones si están constituidas por suelos, no deben sobrepasar el 15 % de la unidad, y si están constituidas por otros grupos de áreas misceláneas, estas inclusiones no deben sobrepasar el 25 % de la unidad (Torres, 1994).

Métodos de detección de humedad del suelo.

Método Gravimétrico.

El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su desecado y calcular su contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105°C. Se han construido numerosos tipos de equipo de muestreo, así como hornos de secado y balanzas especiales, para ser utilizados en esta determinación. El método gravimétrico es el más preciso para medir el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los demás métodos. Sin embargo, no puede usarse para obtener un monitoreo continuo de la humedad del suelo de un lugar determinado, porque es necesario extraer muestras del suelo para su análisis en el laboratorio (Flores & Alcalá, 2010).

Métodos In situ

Métodos dieléctricos

La constante dieléctrica aparente (permisividad) de un volumen de suelo varía con la cantidad de humedad contenida en el suelo. El suelo es una mezcla compleja de partículas de diferentes composiciones químicas en una matriz de aire y agua. La constante dieléctrica de las partículas del suelo varía entre dos y siete, mientras que las del aire y agua son uno y 80, respectivamente. De esta manera, si la densidad aparente de un suelo seco permanece constante, es decir, el porcentaje del suelo incluido en la matriz permanece constante, su constante dieléctrica aparente será una función de la cantidad de

humedad en la matriz. Esta característica permite la conversión de las mediciones de la constante dieléctrica aparente en mediciones del contenido volumétrico de la humedad del suelo.

Los dos principales métodos dieléctricos son:

- a) reflectometría en el dominio temporal (RDT)
- b) método de capacitancia.

Método del tensiómetro

El tensiómetro consiste en un cono o taza porosa (generalmente de cerámica) conectado por medio de un tubo a un manómetro. El aparato se llena de agua que, al penetrar en el cono o taza, establece un equilibrio con la humedad del terreno circundante. Al secarse el suelo, el agua fluye de la taza originando así una tensión mayor, o inversamente, al aumentar la humedad del suelo y disminuir la tensión, entra el agua en la taza. Estas variaciones de la presión o tensión se señalan en un dispositivo de medición. El empleo de varios tensiómetros múltiples, ubicados a distintas profundidades, permite obtener el perfil de humedad del terreno. Los tensiómetros suministran datos sobre el potencial hídrico del terreno (componente de la presión). Si se utiliza con el fin de determinar la humedad, se precisa contar con una curva de calibración (Topp, G. et al., 1980).

Determinación humedad gravimétrico.

El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su desecado y calcular su contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105°C. Se han construido numerosos tipos de equipo de muestreo, así como hornos de secado y balanzas especiales, para ser utilizados con este método. El método gravimétrico es el más exacto para medir el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los demás métodos. Sin embargo, no puede usarse para obtener un registro continuo de la humedad del suelo de un lugar determinado, porque es necesario extraer muestras del suelo para su análisis en el laboratorio (IDEAM, n.d.) es de anotar que este método es ideal para medir la masa en campo ya que disminuye el error de estimación de humedad ya que en el traslado de la muestra al laboratorio puede perder peso.

Densidad Aparente (Da)

Para determinar la D_a es necesario realizar un mínimo de tres repeticiones para obtener un valor representativo. Seleccione la superficie de suelo a muestrear, ya sea vertical u horizontal. Se introduce la barrena con el cilindro, teniendo cuidado de no compactar el suelo y tener un volumen conocido con la estructura de campo. Se sella herméticamente el cilindro para que no haya pérdida de humedad, y péselo. La muestra se lleva a secar en estufa (110° C) durante 24 horas o hasta peso constante, y determine la humedad. También, determine el volumen del cilindro midiendo el diámetro y la altura del mismo (medidas internas) Se expresa en mega gramos por metro cúbico ($Mg\ m^{-3}$) (Flores, L et., al 2010).

Teledetección.

La Teledetección se define como la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor, siendo la fuente de radiación proveniente del sol o del propio sensor (Belmonte & Caamaño, 2009) Fundamentos SAR.

El concepto de Radar y el sistema SAR.

El Radar es un sistema activo de iluminación que posee componentes y equipamiento para la emisión y medición de radiación electromagnética con el objetivo de detectar y localizar elementos en la superficie terrestre. El instrumento consiste en un transmisor que envía ondas de radiofrecuencia, y un objeto receptor que recibe la energía después de haber sido reflejada. El transmisor y el receptor pueden estar localizados en dos plataformas distintas, cuya configuración es denominada "bistática". Asimismo, transmisor y receptor pueden estar ubicados en la misma plataforma, compartiendo la misma antena para irradiar y recibir la energía retrodispersada por el blanco. Este es el caso de los sensores de configuración "monostática", los más utilizados en aplicaciones de sensoramiento remoto (Richards, 2009).

Polarización:

Como ya se ha mencionado, un sistema SAR funciona a partir de la emisión de un pulso electromagnético, midiendo el tiempo y la intensidad del eco reflejado con mediciones en amplitud fase. Esa OEM emitida está compuesta por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (M), que poseen una naturaleza transversal entre ellos (Lusch, 1999).

El término Polarización depende de la configuración de la antena y hace referencia a la orientación espacial del campo eléctrico, en este caso en una onda electromagnética plana, y que frecuentemente está orientada horizontal o verticalmente, durante su propagación, mientras el campo oscila (Richards y Jia, 2006).

Para el caso de los sistemas SAR actuales, las antenas de emisión de la OEM están diseñadas para controlar la dirección del campo eléctrico emitido. De allí que un sistema SAR puede transmitir las ondas de radar en polarizaciones Horizontal (H) y Vertical (V). Asimismo, el sensor puede recibir el retorno de la onda en ambos canales H o V, y en algunos casos, en ambas polarizaciones inclusive. Esto produce señales co-polarizadas (HH y VV) en el primer caso y señales cross-polarizadas (HV y VH) en el segundo caso (ESA). De acuerdo a la configuración del sistema, las siguientes son las combinaciones posibles:

HH: transmisión y recepción horizontal,

HV: transmisión horizontal, recepción vertical,

VH: transmisión vertical, recepción horizontal,

VV: transmisión y recepción vertical.

Plataformas satelitales sensores de radar de apertura sintética (SAR):

Proveen datos, que tienen el potencial de estimar, a partir de mediciones continuas, la dinámica espacio-temporal de humedad de suelos cultivados (Bousbih et al., 2018). Esta estimación se puede hacer utilizando modelos de respuesta física o estadística (El Hajj et al., 2016).

Los tipos de radar SAR son un sistema de radares que se emplean en vehículos espaciales y aéreos que utiliza el movimiento relativo entre la antena y una región de interés con el fin de obtener una

resolución espacial más fina de la que se obtendría si el radar y la región de interés estuvieran fijos uno con respecto al otro. El SAR es un tipo de radar que produce imágenes de vista lateral, es decir los pulsos electromagnéticos son enviados hacia el terreno en dirección perpendicular al vuelo del vehículo y se implementa mediante una antena montada en una plataforma móvil desde la cual se ilumina repetidamente una escena objetivo con pulsos de ondas de radio que pueden tener longitudes de onda desde un metro hasta milímetros Muñoz, 2017).

Con la metodología SAR, se han realizado numerosos trabajos en los cuales se han monitoreado diversos procesos hidrológicos y de biomasa de los cultivos (De Zan. et, al 2014; Gorrab. et, al. 2016), determinado a variabilidad de múltiples características del suelo, con un número limitado de muestras (Castro & Aparicio, 2015).

Estudio De Caso

De acuerdo con la investigación realizada por (Navarro et al., 2018). con la investigación realizada en “Crop Monitoring Based on SPOT-5 Take-5 and Sentinel-1A Data for the Estimation of Crop Water Requirements” (Monitoreo de cultivos basado en datos de SPOT-5 Take-5 y Sentinel-1A para la estimación de los requisitos de agua de cultivos. Las series de tiempo de la retrodispersión NDVI y VV + VH promedio para los tipos de cultivo seleccionados se muestran en la figura 1, la retrodispersión VV promedio es mayor que la retrodispersión VH promedio. El rango dinámico de la retrodispersión de VV es de -12.31 dB a -5.49 dB, mientras que el rango de retrodispersión de VH es de -19.37 dB a -11.97 dB. Los valores de NDVI varían de 0.23 a 0.73.

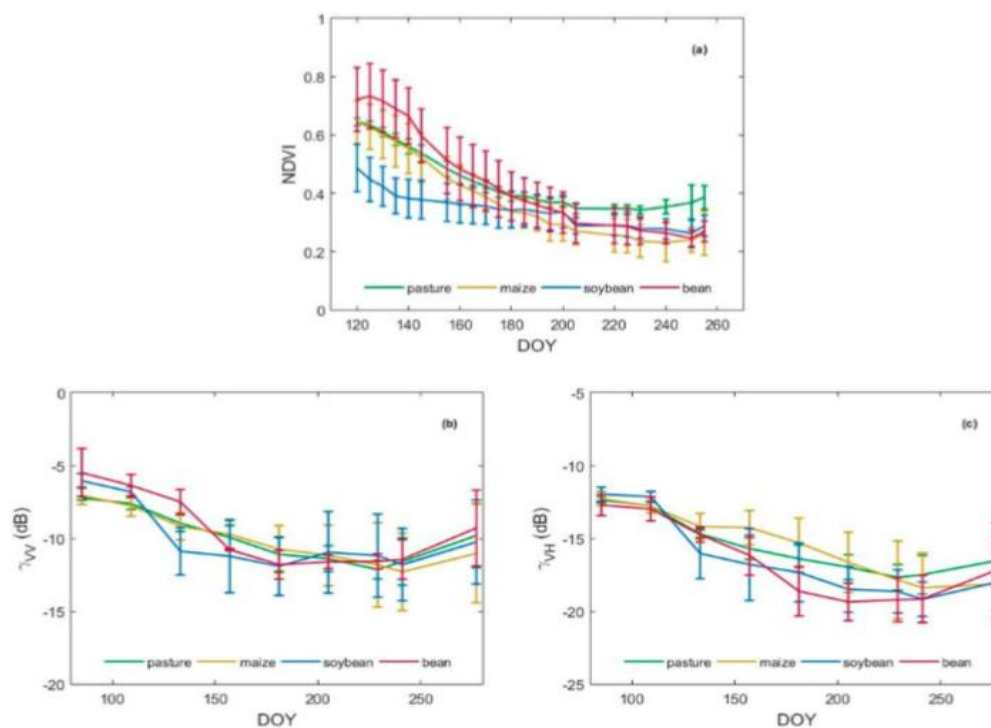


Figura. 1 NDVI media (a) y gamma VV (b) y VH (c) series temporales de retrodispersión para maíz, soja, pasto y frijol (Navarro, et al. 2016).

Debido a que los parámetros del cultivo se estimaron a partir de las series de tiempo NDVI y VV + VH, se puede ver en la Figura 1 que, el período cubierto por los datos de observación de la tierra (EO) corresponde a la segunda mitad de la temporada de crecimiento. La falta de datos para el comienzo de la temporada de crecimiento impide la estimación de los requisitos de riego de cultivos estacionales y su análisis respectivo. Debido a esta limitación, el enfoque de este estudio fue solo en la estimación de los requerimientos de agua de los cultivos.

Se obtuvo un cuadrado del coeficiente de correlación momento-producto (R^2) de Pearson del 79% al comparar la retrodispersión de VV con los valores de NDVI, mientras que se obtuvo un valor ligeramente menor de aproximadamente 71% al comparar los valores de retrodispersión de VH y NDVI Figura 2 (Navarro, et al. 2016).

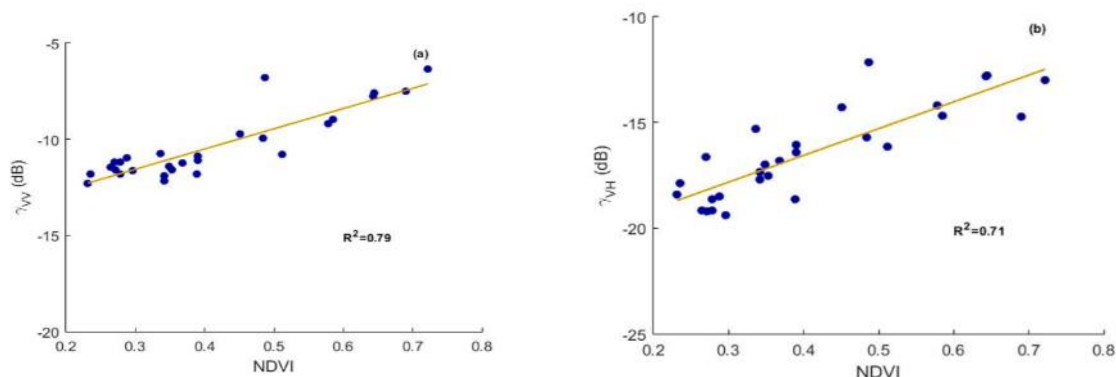


Figura 2. Dispersión de la regresión lineal entre las bandas gamma VV + VH Sentinel-1A y la banda NDVI, (Navarro et al., 2016)

Metodología.

Localización Del Lote Experimental.

El ensayo se llevó a cabo en hacienda La Josepilla- Suerte 18, la cual tiene un área productiva de 16,10 ha. La Suerte se encuentra en el mega ambiente Semiseco y está sembrada con la variedad de caña de azúcar CC 01-1940 desde mayo-2016; las zonas agroecológicas predominantes son: 15H1, 18H0, 21H0 y 6H1. Los suelos predominantes pertenecen en un 15,18,21 y 6 % a la consociación Florida (FL) con 1.6 ha, Guachal (GH) con 1.3ha, Josepilla (JP) con 9.4ha, Margarita (MA) 3.63 ha y Tesoro (TE) con 1.8ha (Cenicaña, Geoportal 2018). Las condiciones meteorológicas de producción sobre el área del lote experimental se caracterizaron por presentar entre 2006-2018 una precipitación media anual de 2000 mm, temperatura media anual de 23,6°C, humedad relativa media anual de 78 % y evapotranspiración media anual (Penman) de 5,1 (Cenicaña, 2011).

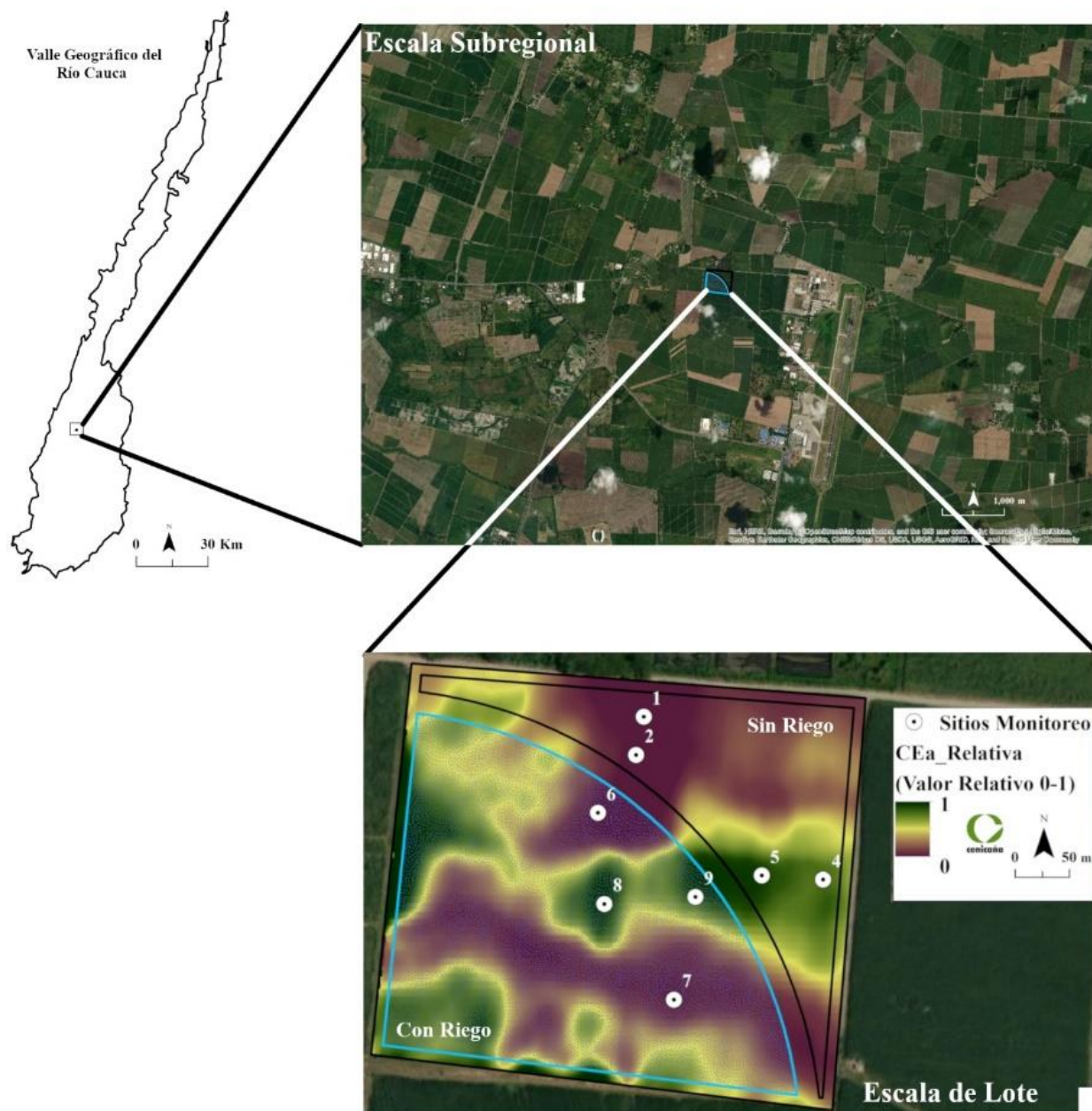
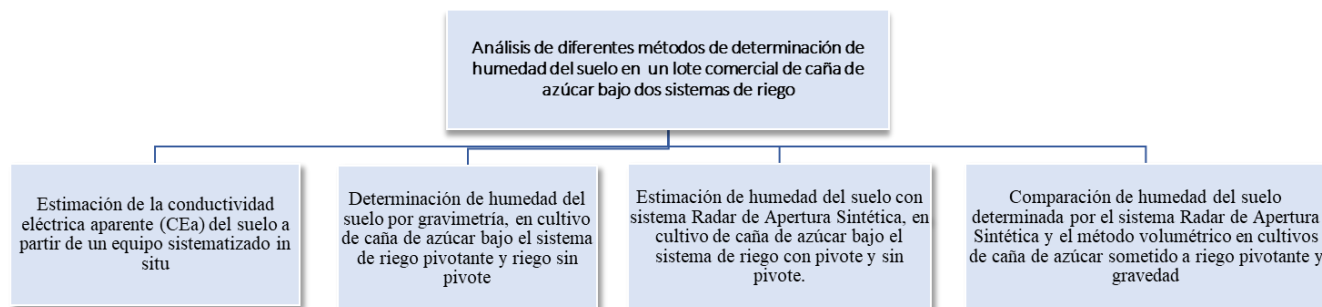


Figura. 2 Ubicación a escala subregional lote experimental Suerte 18 Hacienda la Josepilla, geocalización de sitios de monitoreo en áreas con mayor y menor CEa en zona con pivot y sin pivot.

Tal como se observa en la figura 3, Inicialmente se realizó el análisis de conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo a partir de un equipo sistematizado in situ a 0.7 m.

Figura. 3 Organigrama estructural ejecución del proyecto



Posteriormente, se extrajo un mapa de distribución espacial de la Conductividad eléctrica aparente (CEa), de esta manera quedó georreferenciada toda el área de trabajo, tal como se ilustra en la **figura 3** en la cual se identifica claramente la zona que comprende el equipo de riego pivotante que se identifica siendo todo lo que está dentro de la línea azul, la zona sin pivote, que se identifica siendo todo lo que está dentro de la línea negra, los sitios de monitoreo los cuales son los puntos bancos dentro del mapa con su respectivo número, las zonas con mayor CEa las cuales se representan con el color verde oscuro y las zonas de menor CEa que se representan con el color marrón oscuro.

Con base en los resultados obtenidos del mapa de distribución espacial de CEa, se determinaron 10 sitios de muestreo los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera: 5 sitios dentro de la zona beneficiada por el riego con pivote y 5 en la zona donde no se benefician de riego con pivote.

En cada uno de los 10 sitios se realizó cateo y tomaron muestras de suelo que fueron analizadas en el laboratorio de suelos en Cenicaña Colombia (CC), para determinar por cada sitio CE, pH, M.O, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B, y Textura y textura del suelo.

No obstante, en campo se determinaron los horizontes de suelo y los valores obtenidos se relacionan en la **tabla No 1**. donde se puede ver que las profundidades varían de acuerdo a cada sitio, se evidencian variación entre 20 cm y 74 cm respectivamente para cada horizonte.

N° sitio	Horizonte	Profundidad (cm)
1	A	0-40
	B	40-74
2	A	0-30
	B	30-62
3	A	0-35
	B	35-70
4	A	0-48
	B	48-75
5	A	0-45
	B	45-74
6	A	0-20
	B	20-62
7	A	0-35
	B	35-60
8	A	0-52
	B	52-74
9	A	60
	B	
10	A	0-20
	B	20-60

Tabla 1 Identificación profundidad de horizontes en 10 sitios de muestreo

De acuerdo con los resultados obtenidos de laboratorio se decidió dejar 8 sitios de monitoreo de humedad y Da, se distribuyeron 4 sitios dentro de la zona regada con pivote y 4 por fuera como expone en la **tabla 2**.

N° sitio	Pivot.	Horizonte	Profundidad (cm)
1	Fuera	A	0-40
		B	40-74
2	Fuera	A	0-30
		B	30-62
4	Fuera	A	0-48
		B	48-75
5	Fuera	A	0-45
		B	45-74
6	Dentro	A	0-20
		B	20-62
7	Dentro	A	0-35
		B	35-60
8	Dentro	A	0-52
		B	52-74
9	Dentro	A	60
		B	

Tabla 2. Distribución de 8 sitios de monitoreo en la suerte 18 (lote experimental)

Durante el periodo comprendido entre el 21 de junio de 2019 hasta el 18 de noviembre del mismo año se tomaron muestras de suelo para determinar la humedad del suelo y a su vez la densidad aparente (Da) del suelo en cada sitio de muestreo. Tal como se evidencia en la tabla 3.

N° Días	Fechas
172	21-jun
184	3-jul
196	15-jul
220	8-ago
233	21-ago
256	13-sep
298	25-oct
322	18-nov

Tabla 3 Fechas en las que se tomaron muestras de Humedad, Densidad aparente y retrodispersión.

De acuerdo a los protocolos de solicitud de información se realizó la petición a la Agencia Espacial Europea (ESA) en la cual se instó la información de fechas y horas en las que transcurrió el satélite **Sentinel 1A**, **Sentinel 1B** y **Sentinel 2**, lo anterior se solicitó, teniendo en cuenta la durabilidad y alcance del proyecto que fue de 6 meses comprendidos desde el 21 de junio de 2019 hasta el 18 de noviembre del 2019. Tal como se evidencia en la **tabla 3**.

Para estimar la humedad del suelo por medio de la retrodispersión de las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) se solicitó acceso a la plataforma Copernicus Open Access Hub (Centro de acceso abierto Copernicus) la cual pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA), seguido de esto se seleccionó el área de estudio en las fechas de deseadas, se procedió hacer la respectiva descarga de las imágenes. En este orden de ideas se accedió a la plataforma de acceso libre Sentinel Application

Platform (SNAP), seguido de lo anterior se procedió a realizar el preprocesamiento de las imágenes obtenidas, por lo correspondiente al procesamiento de las imágenes se accedió a el programa de libre acceso (Qgis 3.0), el cual permitió realizar el respectivo proceso hasta exportar los valores a un libro de Excel para posteriormente hacer un análisis preliminar de los valores de retrodispersión por cada fecha.

Para comparar la humedad del suelo determinada por el Sistema Radar de Apertura sintética (SAR), y el método volumétrico en cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) sometido a riego pivotante y gravedad se llevó a cabo un análisis de varianza, el cual permitió identificar la relación entre las dos variables evaluadas, no obstante, se utilizaron graficas de dispersión y así se determinó la relación entre las variables del estudio. Se realizó un análisis de componentes principales para describir las variables de respuesta asociadas a los componentes de mayor aporte a la variabilidad de los datos del suelo.

Resultados y discusión

Contextualizando la figura 4, Los valores de conductividad Eléctrica Relativa tienen un rango de 0 a 1 donde 0 es el color marrón y 1 es el verde oscuro, la zona demarcada dentro de la línea azul indica el área regada con sistema de pivote, la zona demarcada con línea negra es el área regada con sistemas convencional es decir por gravedad.

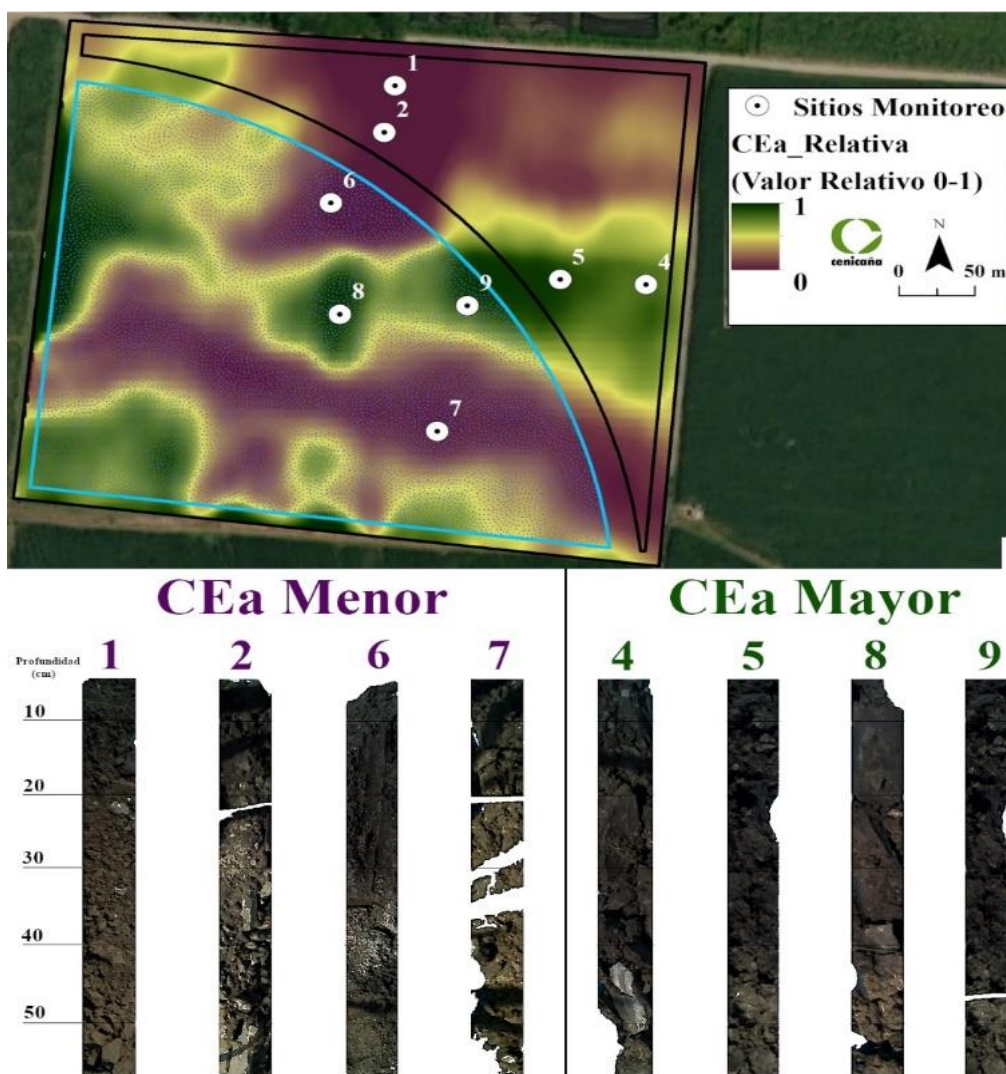
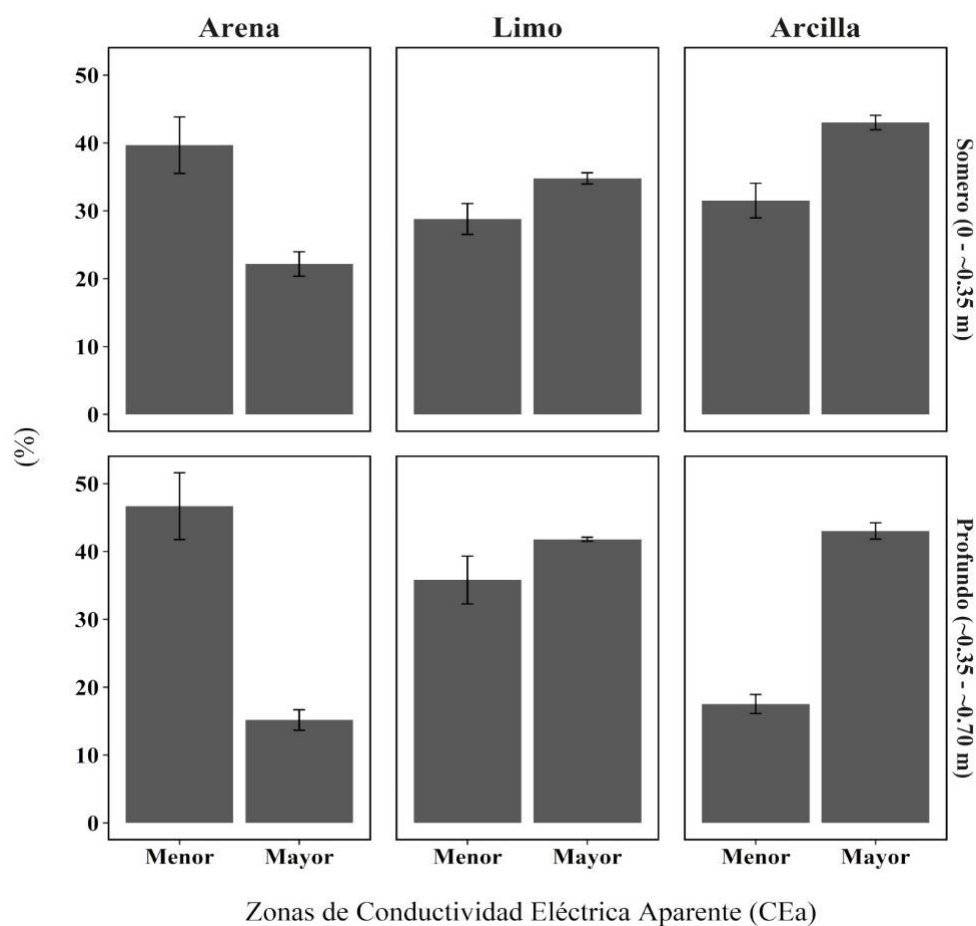


Figura. 4 Distribución CEa, sitios de monitoreo, área regada con pivote y área regada por gravedad y perfil de sitios de monitoreo (M, Castro. 2020)

La **figura 5** muestra la distribución de CEa en el lote experimental indicando los sitios de monitoreo y la zona donde se realizó el respectivo riego con y sin pivote, se observa que los sitios 1,2,6 y 7 tuvieron menor CEa y con mayor valor los sitios 4, 5, 8 y 9 (estos con mayor contenido de arcillas además de encontrarse a la profundidad de 0 a 60 cm).

Figura 6 Relación de la Conductividad Eléctrica aparente (CEa) de acuerdo a la textura del suelo



La **figura 6** representa como base el porcentaje (%) de contenido de minerales arena, Limo y arcillas a que profundidad se genera mayor o menor CEa en las zonas de estudio, por M, Castro. 2020

Como se muestra en la figura 6, en los suelos superficiales (Somero) que van de 0 a 0.35 m, con 40% de Arena hubo menor CEa y con 22% de Arena hubo mayor CEa. En Limo con 28% de arena hubo menor CEa, en el mismo Limo con 35% de contenido hubo mayor CEa. En Arcilla con 30% de contenido hubo menor CEa y en Arcilla con 42% de contenido hubo mayor CEa.

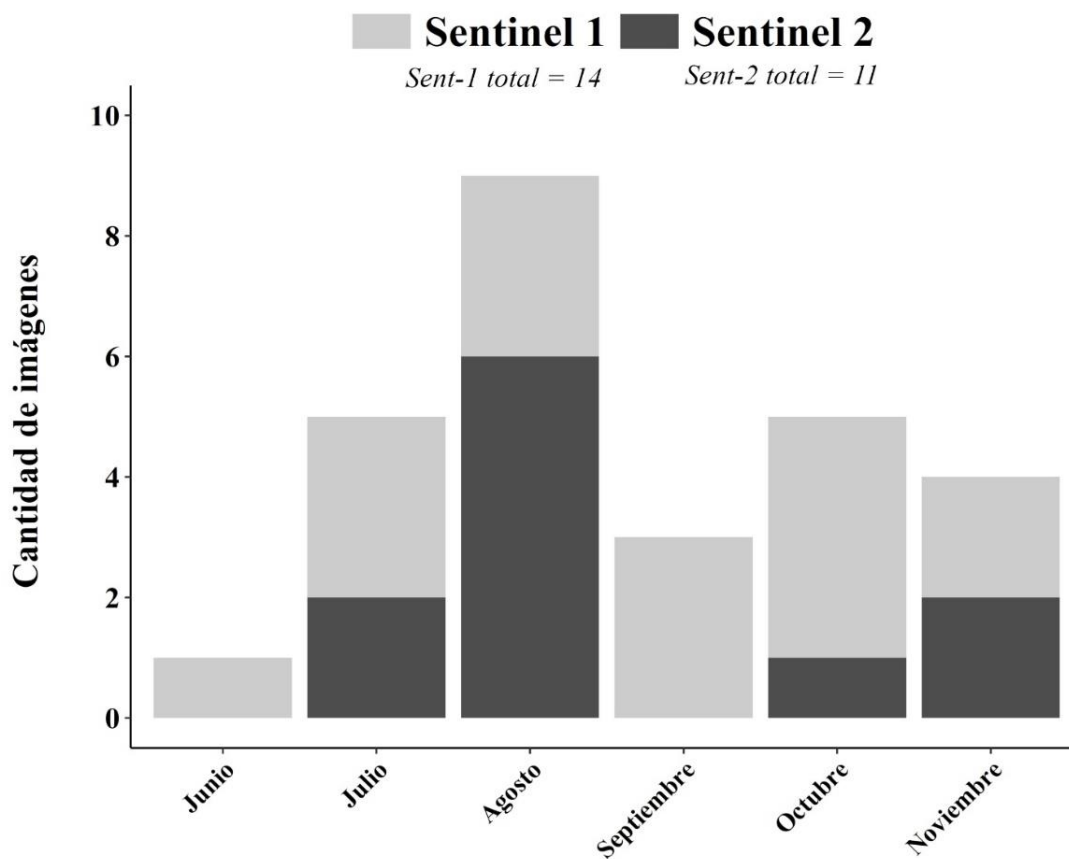
En el mismo escenario, pero con suelos profundos que van de 0.35 m a 0.70 m se evidencia si el contenido de arena es de 47% la CEa es menor, cuando el contenido de arena es de 14% la CEa es mayor.

En suelo Limo cuando el contenido es de 35% la CEa es baja y cuando el contenido de Limo es de 42% la CEa más alta.

En el suelo arcilloso cuando el contenido de arcillas es 17% la CEa es baja y cuando el contenido de arcilla aumenta a 43% la CEa es mayor.

La disponibilidad de imágenes satelitales fue un factor fundamental para la captura de la información, de allí la importancia que se tenga acceso durante todos los meses del año y cada que ese programe un monitoreo.

Figura 5. Disponibilidad de imágenes en función del tiempo en dos satélites de observación terrestre llamados Sentinel 1 y Sentinel 2 durante el año 2019.



De acuerdo a la gráfica se determinó el número de imágenes disponibles desde el 1 junio del 2019 hasta el 30 de noviembre del mismo año, el color gris claro corresponde a la disponibilidad de imágenes de Sentinel 1 y Gris más oscuro al número de imágenes de Sentinel 2, Por E. Arango 2029.

La disponibilidad de imágenes de ambos satélites presenta variaciones significativas que se deben tener en cuenta a la hora de hacer uso de ellas en este contexto, Sentinel 1 garantizó disponibilidad de imágenes y en mayor cantidad que Sentinel 2 durante todo el periodo de investigación.

A partir de los hallazgos evidenciados en la **Figura 7** Disponibilidad de imágenes en función del tiempo

en dos satélites de observación terrestre, se indica claramente que el satélite Sentinel 1 presentan mayor disponibilidad de imágenes en comparación con Sentinel 2 y esto es sumamente importante para proyectos que se realicen tanto a nivel investigativo como a nivel comercial, cuando se cuenta con mayor número de imágenes a lo largo del tiempo se garantiza la estabilidad de la información y por consecuencia volumen de la misma, sobre todo que es indispensable para hacer mayores y mejores análisis.

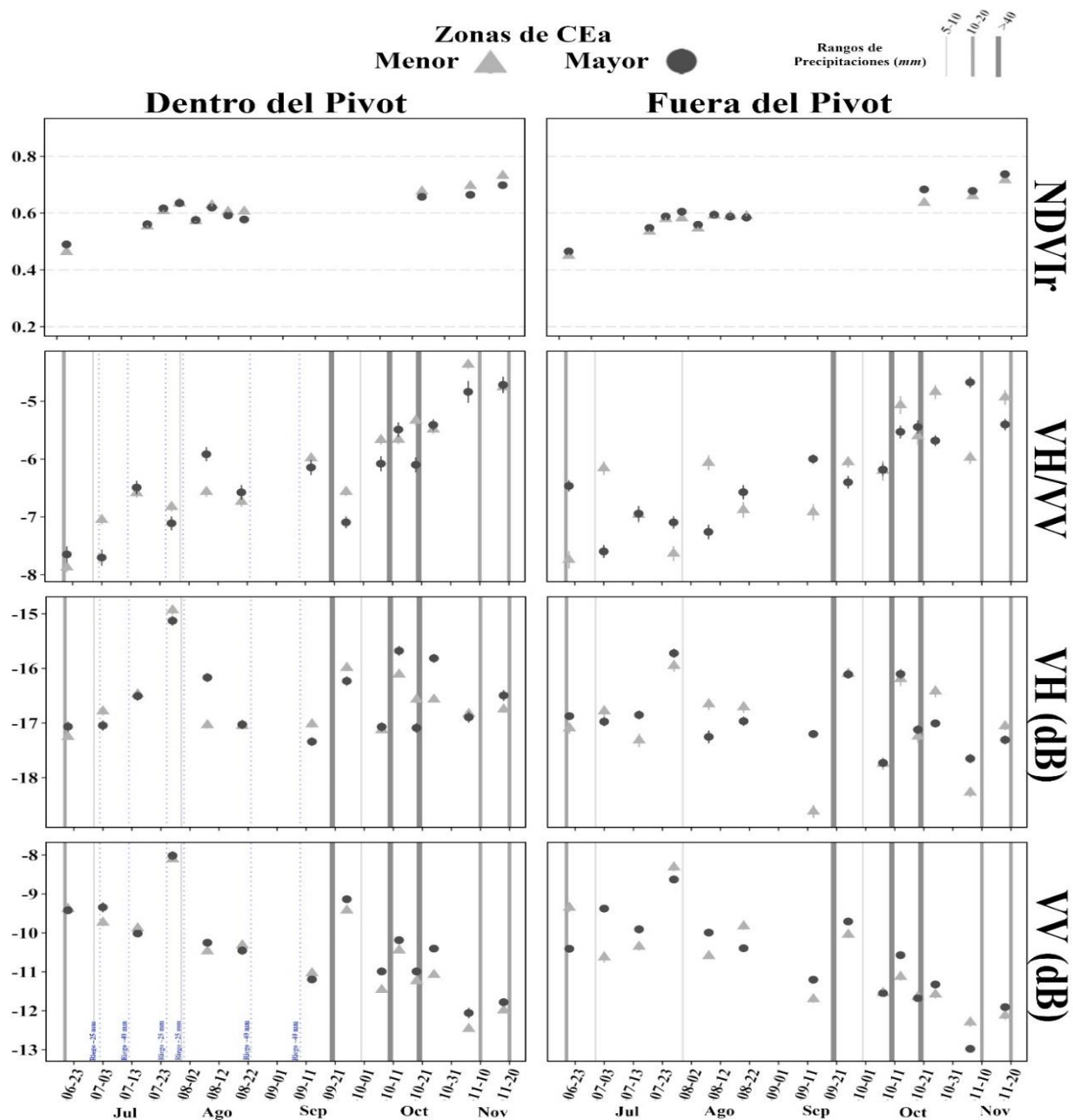


Figura 8. Comportamiento de la retrodispersión versus la Conductividad Eléctrica aparente dentro y fuera de la zona de pivote (Las unidades del eje Y corresponden a los decibeles emitidos retrodispersión en 3 polaridad, por M, Castro. 2020

En la **figura 8** e tuvo como base las fechas que corresponden el periodo donde se realizaron las mediciones en un rango de tiempo en cada uno de los meses, lo que sucedió dentro del pivote y fuera

del pivote, los puntos grises corresponden a zonas arenosas o de menor conductividad eléctrica (CEa) y los puntos más oscuros o negros corresponden a zonas de mayor conductividad eléctrica aparente (CEa) o zonas con mayor contenido de arcillas.

Se analizó el comportamiento de la retrodispersión en VV/VH, VH (dB) y VV (dB) y el Índice de Vegetación de Diferencia normalizada relativo (NDV_{ir}), otra variable importante que se tuvo en cuenta fue la precipitación (mm), que corresponden a las líneas delgadas que tienen un rango mínimo de 5 y máximo de 10, las líneas de mediano grosor representan un rango de 10 hasta 20 mm y las líneas más gruesas representan valores mayores a 40 mm.

De acuerdo a lo representado en la **figura 8**, el Índice de Vegetación de Diferencia normalizada relativo (NDV_{ir}) durante el periodo evaluado tuvo un avance en el tiempo debido al aumento de la biomasa y aumento de la clorofila, no obstante, VH/VV tuvo un muy buen avance en el crecimiento de la biomasa del cultivo ya que a medida que aumenta la edad del cultivo se refleja el crecimiento en esta variable, tanto dentro del pivote como fuera del pivote. El VH donde no obtuvo un comportamiento lineal, pero sí da indicios de que el evento de lluvia y el riego simultáneo de 25mm, aumentó la retrodispersión.

Así mismo, la polaridad VV mostró una clara tendencia en las épocas donde hubo una ausencia de precipitación tal como se refleja a medida que hay ausencia de precipitación en volúmenes menores a 40 mm la tendencia fue a disminuir la retrodispersión, con excepción del 23-julio donde hubo una precipitación de 8mm y simultáneamente hubo un riego de 25 mm, seguido de esto se observó que la retrodispersión se acentuó hasta el 13- septiembre donde se registran precipitaciones fuertes en un periodo comprendido desde mediados de septiembre hasta el 21 de octubre donde se reportan más de 260 mm de lluvias. Se observa en la gráfica que a partir del periodo antes mencionado, el cultivo dentro en un cambio muy particular, es decir que venía de una época muy complicada (seca), llovió más de 40

mm, esto hizo que la retrodispersión incrementará hasta casi -9 db, volvió a secarse el suelo y la retrodispersión cayo hasta -11.5 dB, nuevamente cayeron más de 40mm y la retrodispersión volvió a subir a -10 dB, luego volvió a secarse el suelo y la retrodispersión bajo a -11dB, volvieron a caer más de 40 mm y la retrodispersión aumento a -10 db, hasta el 11 de noviembre donde las lluvias disminuyeron. Lo que reveló VV es que la zona dentro de pivote es que el riego tuvo un efecto para que no hubiera tanta diferencia en entre suelos arenosos y arcillosos, ya que en la zona fuera del pivote hay una diferencia más marcada entre suelos y siempre se maraca la tendencia a bajar, en las fechas antes mencionadas de evaluación del proyecto.

De acuerdo con Richmond, et al 2011 donde indica que es necesario corregir radiométricamente las imágenes SAR. Además, la corrección radiométrica también es necesaria cuando se comparan imágenes SAR adquiridas del mismo sensor, pero en diferentes momentos, como en este estudio. La calibración de las imágenes se llevó a cabo usando una plataforma de libre acceso SNAP Desktop, la cual permitió realizar un preprocesamiento da las imágenes adquiridas durante el periodo de estudio. Sin embargo, esto hace que el proceso para la obtención final de la evaluación sea un largo. Sin embargo, después de pasar esta etapa del proceso para obtener información se destaca que la información de campo de este proyecto está conforme con Navarro, et al 2016 indica una alta correlación significativa, especialmente entre el VV y el NDVI valores, demuestra consistencia de las series temporales ópticas y de microondas y que los datos ópticos afectados por las nubes pueden ser reemplazados por datos de microondas.

Esto supera una de las principales limitaciones de este tipo de estudios, es decir, la cantidad reducida de datos EO debido a condiciones meteorológicas, ello es acorde con lo que en esta tesis se halla en etapa inicial de resultados, tal como se refleja en la **Figura 8**. Comportamiento de la retrodispersión versus la Conductividad Eléctrica aparente dentro y fuera de la zona de pivote.

En la figura 9, los cuadros negros corresponden a Retrodispersión (VV,VH o VV/VH), blancos son humedad volumetrica (%), el resto de variables son identicas a las de las iguales a las de la figura 8.

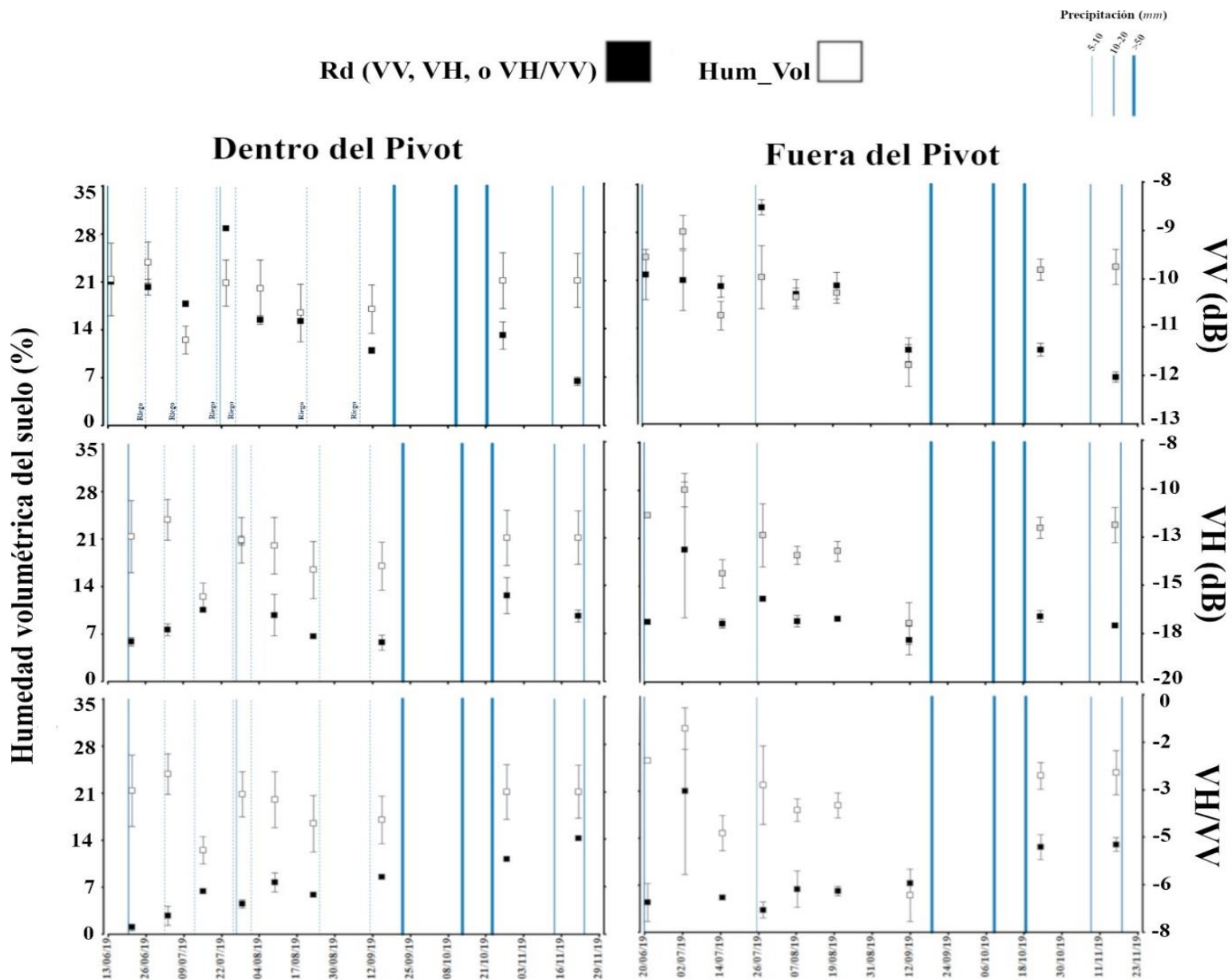


Figura 9. Humedad Volumétrica versus Retrodispersión dentro y fuera de la zona de pivote (Las unidades del eje Y en el costado derecho de la figura corresponden a los decibeles emitidos retrodispersión en 3 polaridades) por M, Castro. 2020

De acuerdo a la figura 9 correspondiente a la humedad volumétrica versus retrodispersión, durante el periodo de monitoreo tanto dentro de la zona de pivote como fuera de ella, la retrodispersión en VV y la humedad volumétrica se persiguieron una a otra con una excepción del 28 de julio donde hubo precipitación y en simultanea hubo un evento de riego, pero el resto del periodo el seguimiento continuo de manera regular. Sin embargo, esta regularidad en el seguimiento se corta en el periodo lluvioso comprendido entre inicios de septiembre y finales de octubre, en el periodo antes mencionado no hubo medición de humedad volumétrica, pero se puede tener la certeza que la retrodispersión para VV teniendo en cuenta que así se muestra en la **figura 8** anterior fue alta.

Del mismo modo, la gráfica ofrece una interpretación de VH, en la cual la retrodispersión no fue regular la relación entre la retrodispersión y la humedad volumétrica del suelo. Mientras que en VH/VV, la retrodispersión se comportó muy similar a VV con la diferencia que después del periodo fuerte de lluvias la retrodispersión fue quien siguió la humedad volumétrica del suelo dentro y fuera de la zona de riego con pivote. En consecuencia, VV y la caída de humedad volumétrica fueron equivalentes.

En la **figura 10**. se muestra la relación entre la Tensión (Cbar) del suelo y la retrodispersión (dB) en polaridades VH, VV Y VH/VV respectivamente a dos profundidades, 0.2 m y 0.35 m, los valores fueron obtenidos durante las fechas comprendidas entre el 13 de junio y 23 de noviembre respectivamente, en la zona de mayor conductividad eléctrica aparente y la de menor conductividad eléctrica aparente.

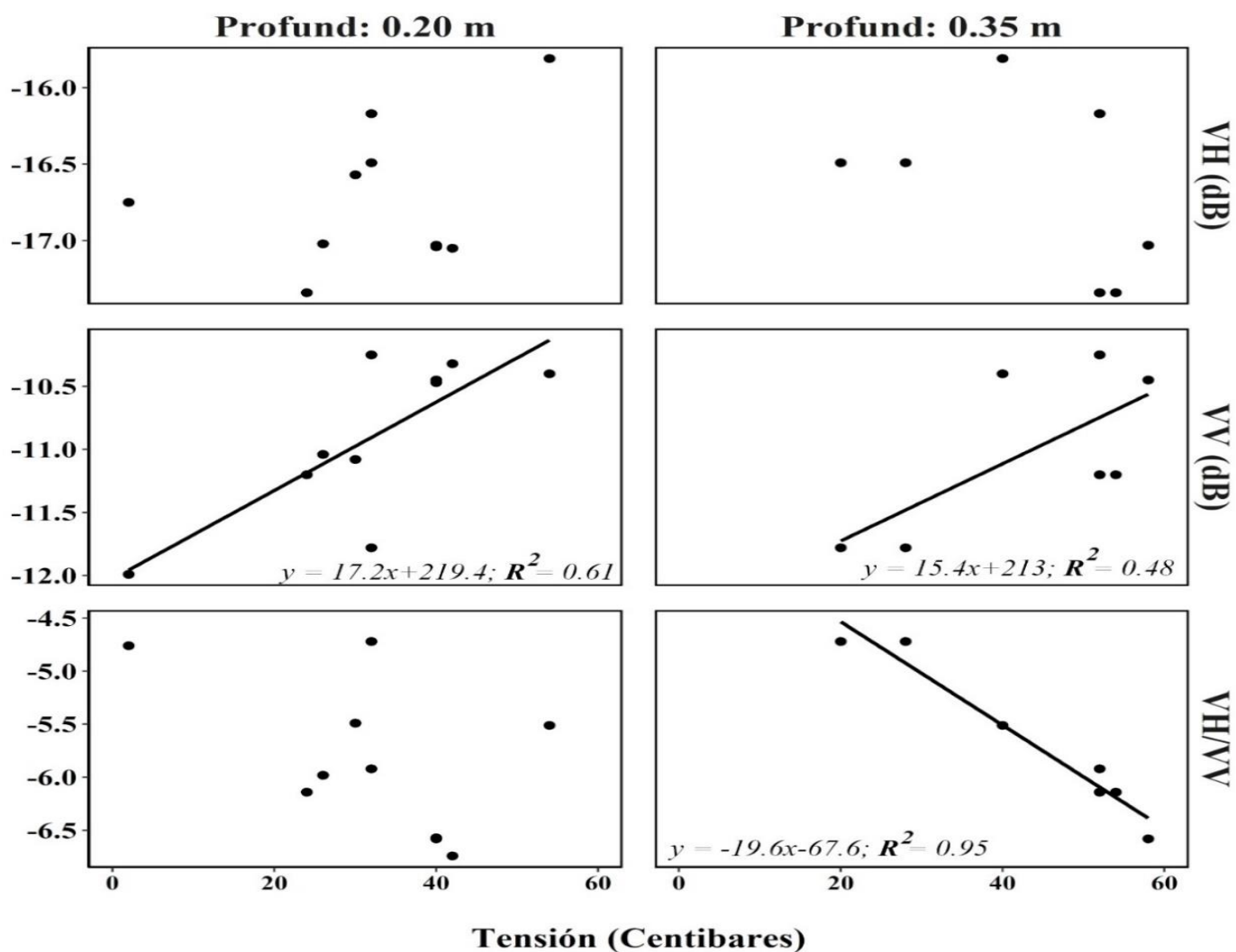


Figura. 6 grado de relación lineal existente entre Retrodispersión y Tensiometría por M, Castro. 2020

La gráfica indica que, la retrodispersión en VH no tiene reciprocidad tanto a 0.20 m como a 0.35 m con respecto a la tensión del suelo, no obstante, también indica que en VV a 0.20 m de profundidad a medida que aumenta la tensión se disminuye la retrodispersión encontrando un coeficiente de determinación $R^2=0.61$. en el otro escenario, la reciprocidad entre tensión y retrodispersión a 0.35 m únicamente tuvo un valor $R^2 = 0.48$. Adicionalmente, en VH/VV y la tensión del suelo a 0.35m se encuentra una mayor reciprocidad ya que el valor de $R^2 = 0.95$ lo que indica una alta relación del coeficiente con el coeficiente de la relación.

La figura 10, indica que la retrodispersión en VH/VV a 35cm de profundidad presenta una correspondencia de 95% y con ello es posible generar predicciones con un alto valor de aceptación, esto llevado a un contexto practico permite afirmar que con la retrodispersión es posible suprimir las mediciones operativas en campo de la humedad con tensiometría y hacerse de modo remoto con imágenes de radar SAR.

Conclusiones

La conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo a partir de un equipo sistematizado in situ. Hubo una tendencia con los valores de retrodispersión al igual que cuando se evalúa la densidad aparente.

La humedad del suelo por gravimetría en cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) bajo el sistema de riego pivotante y riego sin pivote fue dispendioso, complejo y costos.

Estimar la humedad del suelo con Sistema Radar de Apertura sintética (SAR), en cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es menos costoso que los métodos convencionales, requiere menor recurso humano, menores materiales, menos tiempo por unidad de área.

Comparar la humedad del suelo determinada por el Sistema Radar de Apertura sintética (SAR), y el método volumétrico en cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) sometido a riego pivotante y gravedad, se determinó que no hay diferencias significativas entre un método y otro, lo que indica que el grado de precisión son similares.

Recomendaciones

Recomendaciones desde el punto de vista metodológico, aumentar la intensidad de captura de información satelital y tensiometría para permitir que la información espaciotemporal sea mayor, dándole más herramientas a los análisis que se hagan, esto permitirá desde el punto de vista meteorológica abarcar temporadas de lluvias, transición y temporadas secas, de esta manera las diferencias entre los ambientes pueden ser más marcadas y eso genera mayor soporte para las investigaciones venideras.

Desde el punto de vista académico, es de suma importancia que este tipo de estudios sean divulgados por medio físico y electrónicos de la universidad para generar una proyección hacia estudios novedoso enfocados en la teledetección de múltiples recursos naturales.

Referencias bibliográficas

Ararat Orozco, M. C., Sinisterra Garcés, C. L., & Hernández Rivera, C. (2014). Valoraciones agronómicas y de rendimiento en la cosecha de “papa china” (*Colocasia esculenta* L.) en el trópico húmedo colombiano. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 5(2), 169 - 180. <https://doi.org/10.22490/21456453.1335>

Bousbih, S., Zribi, M., Mougnot, B., Fanise, P., Lili-Chabaane, Z., & Baghdadi, N. (2018). Monitoring of surface soil moisture based on optical and radar data over agricultural fields. 1-5. IEEE.

Belmonte, I., & Caamaño, S. (2009). Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina

Cruz, J. R. V. (2015). Manejo Eficiente Del Riego En El Cultivo De La Caña De Azúcar En El Valle Geografico Del Río Cauca.

Castro Franco, M., Costa, J. L., Peralta, N., & Aparicio, V. (2015). Prediction of Soil Properties at Farm Scale Using a Model-Based Soil Sampling Scheme and Random Forest. *Soil science*, 180, 1-12.

Cruz, J.R. (2015). Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. Cali: Cenicaña

Castro Franco, M., Costa, J. L., Peralta, N., & Aparicio, V. (2015). Prediction of Soil Properties at Farm Scale Using a Model-Based Soil Sampling Scheme and Random Forest. *Soil science*, 180, 1-12.

Carbonell González, J. A., Quintero Durán, R., Osorio Murillo, C. A., & Isaacs Echeverri, C. H. (2011). Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el Valle del río Cauca (Cuarta Aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones (Cenicaña). En 38 (Cenicaña). Cali, CO: Cenicaña

Cenicaña, (2011) Zonas agroecológicas identificadas en la cuarta aproximación de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca.

De Zan, F., Parizzi, A., Prats-Iraola, P., & López-Dekker, P. (2014). A SAR interferometric model for soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1), 418-425

David P. Lusch. (1999) *Introduction To Microwave Remote Sensing*. Center For Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University,.

El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Belaud, G., Cheviron, B., Courault, D., & Charron, F. (2016). Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 176, 202-218.

Espinosa, E. R. J., Baucells, P. G., & González, M. D. (2012). Relación entre parámetros de uniformidad de riego en máquinas de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 18–22.

El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Belaud, G., Cheviron, B., Courault, D., & Charron, F. (2016). Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 176, 202-218.

Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de procedimiento analítico. 56
<http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/lfs/manualLFS.pdf>

Flores L, Alcalá J. (2010) Manual de procedimiento analítico. 56. doi:10.1007/s00431-003-1251-6

Gorrab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., & Chabaane, Z. L. (2016). Mapping of surface soil parameters (roughness, moisture and texture) using one radar X-band SAR configuration over bare agricultural semi-arid region. 3035-3038. *IEEE*.

J. A. Richards. (2009) *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer.

J. Richards y X. Jia. (2006) *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Springer.

Muñoz D. C, (2006) El Radar de Apertura Sintética Complemento a los sensores ópticos para la observación de la Tierra: 2017-05-03
<http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=507>

Navarro A, Rolim J, Miguel I, et al (2016). Crop monitoring based on SPOT-5 Take-5 and sentinel-1A data for the estimation of crop water requirements. *Remote Sen*; 8(6). doi:10.3390/rs8060525.

Redondo Apraiz, J. M., & Platónov, A. K. (2001). Aplicación de las Imágenes SAR en el estudio de la dinámica de las aguas y de la polución del mar Mediterráneo cerca de Barcelona. *Ingeniería Del Agua*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.4995/ia.2001.2856>.

Sanclemente Reyes, O. E., Ararat Orozco, M. C., & De la cruz Cardona, C. A. 2015. Contribución de *Vigna unguiculata* L. a la sustentabilidad de sistemas de cultivo de caña de azúcar. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 6(2), 47 - 56. <https://doi.org/10.22490/21456453.1404>

Topp, G. C., Davis, J. L. y Annan, A. P., 1980: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, volumen 16, No. 3, págs. 574-582.

. Torres, R. E. (1994). Tamshiyacu. Estudios detallados de suelos de la zona "Fernando Torres" – tamshiyacu (región Loreto)