



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geomática

**ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO UTILIZANDO
LA BANDA C DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 EN CAÑA DE AZÚCAR PARA LA
COSTA SUR DE GUATEMALA**

Ing. Agr. Alvaro Benjamín Rodríguez Corado
Asesorado por MSc. Edson Hernández

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO UTILIZANDO
LA BANDA C DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 EN CAÑA DE AZÚCAR PARA LA
COSTA SUR DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ALVARO BENJAMÍN RODRÍGUEZ CORADO
ASESORADO POR EL MSC. EDSON HERNANDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADORA	Ing. Mtra. Inga. Sara Michelle Catalán Armas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

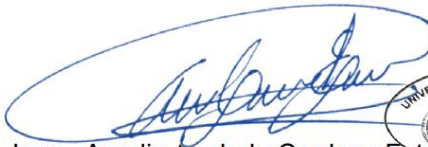
**ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO UTILIZANDO
LA BANDA C DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 EN CAÑA DE AZÚCAR PARA LA
COSTA SUR DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado, con fecha 7 de noviembre de 2020.

Ing. Agr. Alvaro Benjamín Rodríguez Corado

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO UTILIZANDO LA BANDA C DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 EN CAÑA DE AZÚCAR PARA LA COSTA SUR DE GUATEMALA**, presentado por: **Alvaro Benjamín Rodríguez Corado**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, noviembre de 2022

LNG.EEP.OI.794.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**"ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO
UTILIZANDO LA BANDA C DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 EN CAÑA DE
AZÚCAR PARA LA COSTA SUR DE GUATEMALA"**

presentado por **Alvaro Benjamín Rodríguez Corado** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

COORDINACIÓN
TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Guatemala, 13 de noviembre 2021.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: "ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO UTILIZANDO LA BANDA C DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 EN CAÑA DE AZÚCAR PARA LA COSTA SUR DE GUATEMALA" del estudiante **Alvaro Benjamín Rodríguez Corado** quien se identifica con número de carné **200816938** del programa de **Maestría en Geomática**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
Coordinador
Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, 30 de octubre de 2021

Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Álvarez Cotí:

Reciba un cordial y atento saludo, a la vez aprovecho la oportunidad para hacer de su conocimiento que en mi calidad como Asesor del **Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, Alvaro Benjamín Rodríguez Corado** quien se identifica con carnet **200816938**; he revisado el trabajo de graduación titulado: **"Estimación del porcentaje de humedad superficial del suelo utilizando la banda C de imágenes de radar sentinel-1 en caña de azúcar para la costa sur de Guatemala"**, del programa de Maestría en **Geomática** de esta Escuela de Postgrado, por lo cual el trabajo revisado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo de antemano la atención a la presente, me suscribo.

Atentamente.

"Id Y Enseñad A Todos"


Edson Tonño Hernández Mazariegos
Ingeniero Agrónomo en RNR
Colegiado No. 6354
Maestría en ciencias Geomáticas
Edson Hernández

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme sueños y sabiduría

Mis padres

Erick Rodríguez y Dina Corado, por darme la vida y estar conmigo en las buenas y en las malas, por ser la base de cimientos y creer en mí, los amo con todo mi corazón.

Mis hermanas

Maribel, Erika y Alejandra Rodríguez, gracias por estar siempre pendiente de mí, siempre están en mi mente y corazón.

Mis sobrinas

Jimena Rodríguez, Camila Álvarez y Sofia Contreras, las amo mucho y siempre las tengo en mente.

Mi esposa

Elena Reyes, gracias, mi amor por ser parte de mis logros y los futuros sueños, gracias por ser la persona que siempre me acompaña en esta aventura, que es la vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Por darme sueños y sabiduría

Mis padres

Erick Rodríguez y Dina Corado, por darme la vida y estar conmigo en las buenas y en las malas, por ser la base de cimientos y creer en mí, los amo con todo mi corazón.

Mi esposa

Elena Reyes, gracias, mi amor por ser parte de mis logros y los futuros sueños, gracias por acompañarme siempre.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Alma mater y fuente de conocimiento y sabiduría

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
MARCO METODOLÓGICO.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. ANTECEDENTES	1
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. ALCANCES	11
3.1. Resultados	11
3.2. Técnicos	11
3.3. Investigativos	12
4. MARCO TEÓRICO	13
4.1. Agricultura.....	13
4.2. Agricultura de precisión (AP)	13
4.3. Sistemas de información geográfica.....	14
4.4. Percepción remota.....	14
4.5. Teledetección.....	14

4.6.	Imágenes Sentinel 2 corregidas a nivel L2A	15
4.7.	Resoluciones de Sentinel-2	15
4.7.1.	Resolución temporal	15
4.7.2.	Resolución espacial	16
4.7.3.	Resolución radiométrica	17
4.8.	Imágenes de radar Sentinel-1	17
4.9.	Características técnicas de radar Sentinel 1	17
4.9.1.	Descripción general del satélite Sentinel 1	17
4.9.2.	Frecuencia de paso	18
4.9.3.	Instrumento	18
4.9.4.	Aplicaciones principales de Sentinel 1	18
4.9.5.	Modos de operación	19
4.9.6.	Productos de datos Sentinel 1	20
4.9.7.	Productos de nivel 1 (GRD)	20
4.10.	Sensitivo a la humedad	20
4.11.	Sensitivo a la vegetación	21
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	23
5.1.	Porcentaje de humedad del suelo	25
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
	CONCLUSIONES	35
	RECOMENDACIONES	37
	REFERENCIAS	39
	APÉNDICES	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de ubicación del área de estudio.....	XXIII
2.	Cálculo de la muestra.....	XXIV
3.	Muestras de suelo	XXVI
4.	Penetración de la seña de radar	22
5.	Mapa de puntos de muestreo.....	24
6.	Porcentaje de humedad promedio	25
7.	Mapa de porcentajes de humedad y texturas	26
8.	Correlación lineal por punto de muestreo.....	27
9.	Distribución geoespacial de R^2 (VV vs. % HS).....	28
10.	Distribución geoespacial de R^2 (VH vs. % HS)	28
11.	Distribución geoespacial de R^2 (VV+VH vs. % HS).....	29
12.	Retrodispersión del suelo (VV y VH)	31
13.	Condiciones del cultivo en tercer mes de edad	32

TABLAS

I.	Matriz de tamaños muestréales	XXV
II.	Fechas de muestreo en campo y altura de la caña de azúcar	XXVII
III.	Características técnicas de Sentinel 2	16
IV.	Características técnicas de Sentinel 1	18
V.	Frecuencia de muestreo en campo	23
VI.	Valores típicos del coeficiente de retrodispersión	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
EC2	<i>Amazon Elastic Compute Cloud</i>
VV+VH	Doble polarización de recepción vertical de transmisión vertical y de recepción vertical de transmisión horizontal
VH	Polarización de recepción vertical de transmisión horizontal
VV	Polarización de recepción vertical de transmisión vertical
%HS	Porcentaje de humedad del suelo
R ²	Porcentaje de variación de rentabilidad de la variable dependiente que puede ser explicado por la variable independiente
SAR	Radar de apertura sintética (por sus siglas en inglés <i>Synthetic-aperture radar</i>)

GLOSARIO

Banda	Una selección de longitudes de onda o rango de frecuencias de radar. Por ejemplo, Sentinel-1 opera en la banda C (frecuencia central de 5.404 GHz). Otros SAR espaciales operan en la banda L (1.3 GZ) o en la banda X (9.6 GHz).
Banda C	Un rango de frecuencia nominal, de 8 a 4 GHz (3,75 a 7,5 cm de longitud de onda) dentro de la porción de microondas (radar) del espectro electromagnético. Los radares de formación de imágenes equipados con banda C generalmente no se ven obstaculizados por los efectos atmosféricos y son capaces de obtener imágenes a través de nubes tropicales y lluvias. Su capacidad de penetración con respecto a las copas de los árboles o los suelos es limitada y está restringida a las capas superiores
El espectro electromagnético	Se llama espectro electromagnético a las distintas longitudes de onda que componen la luz. Los dos factores básicos son: longitud de onda e intensidad.
Interferometría	Una técnica que utiliza las diferencias medidas en la fase de la señal de retorno entre dos pases de

satélite para detectar ligeros cambios de ubicación en la superficie de la Tierra. El mapeo de cambios de altura proporciona información, por ejemplo, acerca de daños por terremotos, actividad volcánica, deslizamientos de tierra y movimiento de glaciares.

Polarización

El proceso de confinar las vibraciones del campo magnético o eléctrico, vector de luz u otra radiación a un plano.

**Polarización de
recepción horizontal
de transmisión
vertical (VH)**

Modo de polarización de radar en el que las microondas del campo eléctrico se orientan en el plano vertical para la transmisión de señales y en el que la antena del radar recibe el campo eléctrico polarizado horizontalmente de la energía retrodispersada.

**Polarización de
recepción vertical de
transmisión vertical
(VV)**

Un modo de polarización de radar en el que las microondas del campo eléctrico se orientan en el plano vertical tanto para la transmisión como para la recepción de señales mediante una antena de radar.

**Polarización
horizontal**

Polarización lineal con el vector eléctrico orientado en dirección horizontal en coordenadas de antena

Polarización vertical

Polarización lineal con el vector eléctrico orientado en dirección vertical en coordenadas de antena.

Retrodispersión

La retrodispersión es la parte de la señal de radar saliente que el objetivo redirige directamente hacia la antena del radar. La retrodispersión es el proceso mediante el cual se forma la retrodispersión.

SENTINEL-1

Es una misión de radar de imágenes que proporciona imágenes continuas de todo tipo de clima, día y noche en la banda C.

RESUMEN

El cálculo de la humedad del suelo en grandes extensiones de caña de azúcar suele tener costos elevados, se invierte mucho tiempo y abarca poca cantidad de área de análisis debido a que se hace a través de un método directo, por lo tanto, no es rentable para las empresas que tienen cultivo de caña de azúcar de forma extensiva en Guatemala.

Con la investigación presente se buscó generar un método indirecto que permitiera estimar el porcentaje de humedad del suelo a través de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de Sentinel 1 con banda C.

Tomando en cuenta la herramienta de estudio se planteó una metodología que evaluará las posibles tendencias o correlaciones positivas entre las imágenes de radar de Sentinel 1 con banda C versus el porcentaje de humedad superficial del suelo.

Los análisis que se realizaron fueron de carácter experimental debido a que se obtuvieron 804 datos de muestreo en campo entre diciembre 2020 y junio 2021. Estos resultados se evaluaron estadísticamente a través de análisis de correlación lineal y múltiple contra los valores de píxel de las imágenes SAR Sentinel 1 para ver si existían tendencias positivas entre la retrodispersión y el contenido de humedad superficial del suelo.

Para las evaluaciones se tomaron 67 muestras de suelo, solo 29 están entre 0.30 y 0.72 R^2 , el resto obtuvo una correlación menor, los 29 datos que sí

presentaron tendencias positivas fue debido a que estaban en un tipo de suelo franco arenoso y no hubo mucha vegetación.

Por lo tanto, no se pudo generar un modelo predictivo que estime indirectamente el porcentaje de humedad del suelo a través de las imágenes de radar de Sentinel 1 ya que muy pocos datos tienen tendencia positiva en las condiciones evaluadas.

Se recomienda que en próximas evaluaciones se usen más datos de campo y menos error experimental en los muestreos, áreas con menos vegetación o menos densidad del cultivo de caña de azúcar, también considerar que esta banda (C) no es capaz de penetrar más de 5 cm de profundidad en el suelo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Contexto general

La costa sur de Guatemala tiene diversidad de tipos de suelo y en áreas muy pequeñas cambia la textura y profundidades del perfil del suelo rápidamente. La mayoría de las fincas de caña de azúcar cuenta con presencia de vetas de área (cauces de ríos desbordados en algún evento climático) y estas influyen y perjudican el crecimiento y desarrollo del cultivo debido a que son zonas de baja capacidad de retención de agua.

Por lo tanto, es importante conocer el porcentaje de humedad del suelo para un manejo distinto (no tradicional) que proporcione la cantidad y momento adecuado de lámina de agua a la planta.

Debido a la poca capacidad y alto costo para conocer el porcentaje de humedad del suelo en toda la cobertura de interés con los métodos actuales; la aplicación de lámina de agua de riego es estándar en todo tipo de textura, edad del cultivo y tiempo, variando únicamente la frecuencia de riego y tipo de equipo (aspersión, mini y media aspersión y mecanizado).

Al aplicar una lámina de riego tradicional sin conocer la humedad del suelo puede generar un impacto negativo en la producción del cultivo de caña de azúcar y posiblemente se incrementan los costos de la gestión completa del riego debido a que este es estándar.

Descripción del problema

Para conocer el porcentaje de humedad del suelo a través de un método directo se necesitan varias muestras de campo, dicho método es costoso (Q 150.00 por muestra) y lento, debido a que al tener las muestras se llevan al laboratorio para estimar el porcentaje de humedad, a través de la diferencia entre peso húmedo menos peso seco dividido cien, el resultado del laboratorio puede demorar entre 10 a 30 días.

Con el método directo no se puede obtener el porcentaje de humedad del suelo cada vez que se necesite regar un área de interés, mucho menos toda el área con cultivo.

Existen métodos indirectos, como balance hídrico y sondas de humedad que predicen el porcentaje de humedad del suelo y tienden a tener entre 50 y 80 % de confiabilidad, sin embargo, para tener el porcentaje de humedad del suelo con estos métodos se necesitarían cientos de sondas para cubrir la demanda de área, si se quisiera estimar la humedad del suelo de toda el área de la agroindustria azucarera se necesitarían miles de sondas, lo cual representa una alta inversión, mantenimiento y cuidados de los equipos ya que están expuestos a daño o robo (CENGIRIEGOS, 2018).

El método de balance hídrico es estimado por medio de un sistema tradicional de entradas y salidas de agua, pero no es un método confiable debido a que no se cuenta con una red de pluviómetros densa y bien distribuida en la costa sur de Guatemala.

Debido al desconocimiento del porcentaje de humedad del suelo en la gestión del riego para la caña de azúcar de Guatemala es necesario e importante generar un método indirecto que determine este dato a través de herramientas

que cumplan con todas las demandas del problema (cobertura, costos bajos, alta precisión y frecuencia de riego).

Por lo tanto, se propuso realizar una investigación a través de sensores remotos con el satélite Sentinel-1 Radar de Apertura Sintética (SAR) con banda C en finca Monte Alegre ubicada en La Gomera Escuintla, Guatemala debido a su múltiple ventaja como: amplia cobertura, escala temporal, actualización de datos, facilidad de procesamiento, combinación con datos de campo, uso de nuevos y avanzados métodos para aumentar la precisión y datos geoespaciales de campo.

Pregunta principal

¿Es posible que la banda C de Sentinel-1 pueda estimar el porcentaje de humedad superficial del suelo utilizando datos SAR en caña de azúcar para el área de estudio en finca Monte Alegre?

Preguntas auxiliares

- ¿El método propuesto podría tener la capacidad de tener tendencias entre la retrodispersión de las imágenes de radar Sentinel-1 con la banda C versus el porcentaje de humedad superficial del suelo?
- ¿Qué tipo de polarización (VH y VV) podría tener mejor tendencia entre la retrodispersión del suelo y el porcentaje de humedad del suelo?
- ¿Cómo saber si al tomar ambas polarizaciones (VH y VV) de las imágenes SAR las posibles tendencias entre retrodispersión versus porcentaje de humedad del suelo superficial mejoren?

Delimitación del problema

La línea de investigación de imágenes de radar SAR se realizó en la finca Monte Alegre en el municipio de La Gomera, Escuintla, Guatemala; dicha finca cuenta actualmente con 1,500 hectáreas de caña de azúcar.

Se seleccionó un área de 440 hectáreas debido a que tiene la misma variedad de caña de azúcar, edades y manejo agronómico muy similar, era importante tomar un área homogénea en manejo para evitar introducirle más variables a la investigación, lo único que es completamente heterogéneo es el suelo ya que esta zona de estudio presenta mucha veta de arena superficial y a nivel de perfil.

Se realizaron muestreos de suelo en los meses de diciembre 2020 a junio de 2021 ya que fueron los primeros meses de crecimiento del cultivo. Se realizó de esta manera porque se evaluó campo en estos meses de crecimiento inicial debido a que el cultivo empezó a crecer en el mes de diciembre de 2020.

Además, se quiere evaluar si existe tendencia entre la retrodispersión de las imágenes SAR y el porcentaje de humedad del suelo desde que la caña de azúcar está pequeña o al inicio de su crecimiento hasta la mitad de su ciclo (seis meses), esto es porque la banda C de las imágenes SAR de Sentinel 1 tienen dificultad de penetrar el suelo en zonas con alta densidad de vegetación, y los primeros 6 meses del cultivo de caña de azúcar posiblemente la banda C pueda penetrar el suelo.

OBJETIVOS

General

Estimar el porcentaje de humedad superficial del suelo utilizando la banda C de imágenes de radar SAR Sentinel 1 en caña de azúcar para finca Monte Alegre.

Específicos

1. Analizar estadísticamente si existen tendencias entre la retrodispersión de las imágenes de SAR banda C Sentinel 1 con la polarización Vertical Vertical (VV) y el porcentaje de humedad superficial del suelo.
2. Analizar estadísticamente si existen tendencias entre la retrodispersión de las imágenes de SAR banda C Sentinel 1 con la polarización vertical horizontal (VH) y el porcentaje de humedad superficial del suelo.
3. Evaluar estadísticamente si al tomar ambas polarizaciones (VV + VH) de las imágenes SAR existe una mejor tendencia entre el porcentaje de humedad superficial del suelo.

HIPÓTESIS

En la presente investigación se considera que la retrodispersión de las imágenes de radar SAR con banda C de Sentinel-1 tienen tendencias positivas con el porcentaje de humedad del suelo, se considera que a mayor retrodispersión exista mayor humedad en el suelo. Por lo tanto, se establece que la banda C de Sentinel 1 puede cuantificar el porcentaje de humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar en la finca Monte Alegre.

MARCO METODOLÓGICO

Tipo de investigación

La siguiente investigación es cuantitativa y buscó encontrar tendencias positivas (R^2 cerca de 1) entre la retrodispersión de las imágenes SAR Sentinel 1 con banda C y el porcentaje de humedad del suelo, estas posibles tendencias generarían un posible método indirecto que serviría para predecir o estimar el porcentaje de humedad del suelo para la gestión agrícola en caña de azúcar para la costa sur de Guatemala.

Diseño de investigación

Este diseño de investigación fue experimental debido a que se tomó un área de estudio donde se tenía una población y muestra. La muestra se determinó a través de una matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de confianza al estimar una proporción en poblaciones finitas.

La muestra fue distribuida aleatoriamente en el área de estudio y luego se procedió a tomar muestras del suelo para análisis de laboratorio durante 12 meses por cada punto, de esta forma se obtuvo el porcentaje de humedad del suelo en el tiempo. Posteriormente se obtuvo el valor digital (retrodispersión de las imágenes SAR) de cada píxel donde estaba el punto de muestreo.

Con los datos de porcentaje de humedad del suelo de laboratorio y la retrodispersión de las imágenes SAR se realizaron evaluaciones estadísticas a través de análisis de correlación lineal simple para determinar si hay tendencia entre el porcentaje de humedad del suelo y la retrodispersión de las imágenes SAR con banda C de Sentinel 1.

Procedimiento metodológico

En la siguiente sección se hace una breve descripción metodológica cuantitativa que se realizó para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. Se dividió en secciones de tal forma que cada una de ellas describió brevemente las actividades y operaciones de gabinete, campo, recursos, tiempos, técnicas y tipos de análisis que se necesitaron para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

- En la primera sección se describen los tratamientos digitales que se le hicieron previamente a las imágenes SAR con banda C de Sentinel-1, con el objetivo de resaltar elementos que son difíciles de percibir o no se pueden distinguir directamente en una imagen. Para cumplir con dicho objetivo se utilizó el software SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA).
- En la segunda sección se determinó el área de estudio a través del polígono oficial de la finca, esta contenía 1,500 hectáreas de cultivo de caña de azúcar, pero solo se tuvo acceso a la investigación en 440 hectáreas. Posteriormente se calculó una muestra utilizando una matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de confianza para el área de interés, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad \text{donde:} \quad n_0 = p^*(1-p)^* \left(\frac{Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)}{d} \right)^2$$

Al tener el tamaño de muestra se distribuyeron los puntos espacialmente completamente al azar en el área de estudio.

- En la tercera sección se plantean los pasos que se realizaron para hacer los muestreos de suelo en el área de estudio a través de sistemas de GNSS, posteriormente las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio deL Ingenio La Unión para calcular el porcentaje de humedad del campo.
- En la cuarta sección se analizaron los resultados de porcentaje de humedad del suelo del laboratorio versus los datos de retrodispersión de las imágenes SAR a través de métodos estadísticos de correlación lineal y múltiple para validar si existieron tendencia entre ambas variables.

Los análisis de correlación lineal simple se hicieron entre el porcentaje de humedad de suelo (datos de laboratorio) y cada una de las polarizaciones de estudio (VH y VV), y los análisis de correlación múltiple se realizaron para predecir la variable Y (porcentaje de humedad del suelo) con ambas polarizaciones (VH y VV).

Las variables como porcentaje de humedad del suelo que se obtuvieron a través de los muestreos de campo son datos importantes debido a que es el valor testigo que se comparó con la retrodispersión de las imágenes SAR. Para poder obtener estas variables se realizaron varios muestreos de suelo que iniciaron después de la fecha de corte hasta la fase final del gran crecimiento (día 180 aproximadamente del cultivo de caña de azúcar).

El método de muestreo fue por barrenamiento utilizando un barreno de aluminio, posteriormente se colectó el suelo en bolsas de nylon de dos libras con sus debidas etiquetas de las coordenadas X, Y, y Z dirigido por las imágenes SAR.

Sección I: tratamiento digital de imágenes SAR

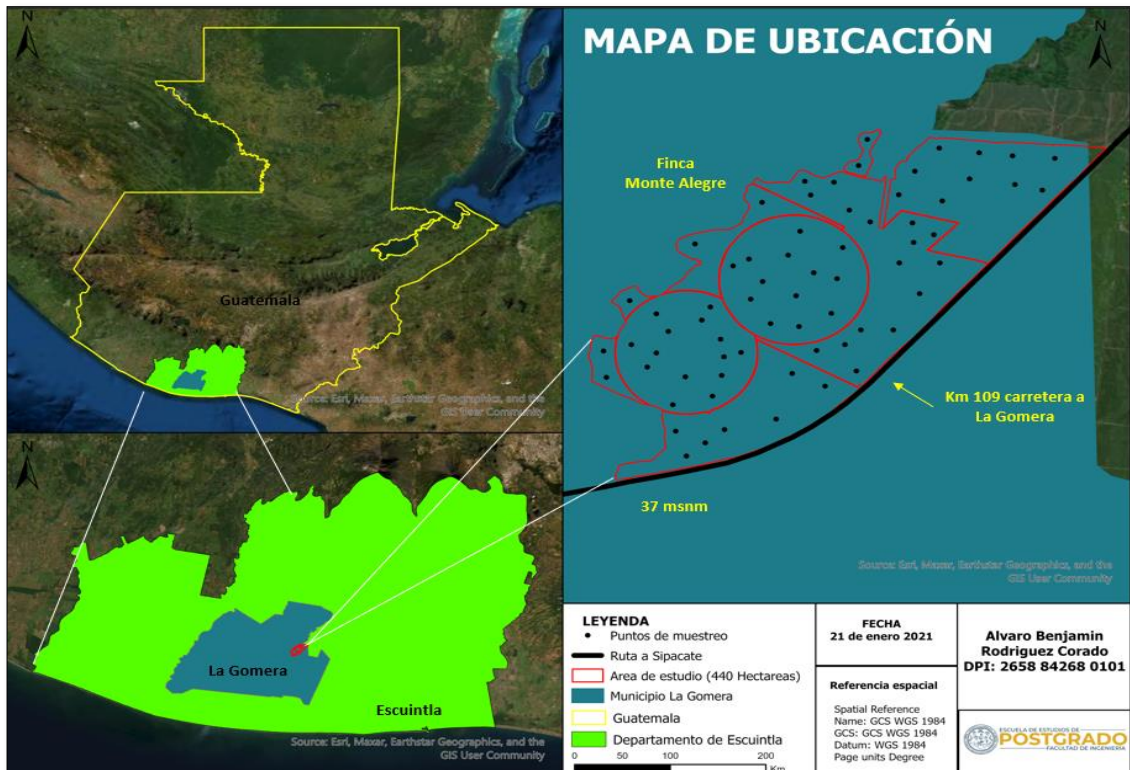
Se utilizaron imágenes SAR de nivel 1 GND debido a que tienen una proyección terrestre utilizando un elipsoide. Las calibraciones se realizaron en el software *Sentinel Toolbox* de código abierto desarrollado por la ESA para procesar y analizar imágenes de los satélites Sentinel.

El software incluye herramientas para calibración como: filtros de ruido *speckle*, corrección de terreno, producción de mosaicos, polarimetría, interferómetro y clasificación.

Sección II: área de estudio

Se cuenta con un área de muestreo de 440 hectáreas en color rojo la cual se puede observar en la figura 1. Cuenta con una población finita de 101,597 pixeles con resolución espacial de 20x20 metros para las imágenes SAR Sentinel 1 banda C.

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS Pro.

Sección III: cálculo de la muestra

En la figura 2 se muestra el cálculo de la muestra del área de estudio que se determinó a través de la matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de confianza, al estimar una proporción en poblaciones finitas.

Figura 2. Cálculo de la muestra

Matriz de Tamaños Muestrales para diversos márgenes de error y niveles de confianza, al estimar una proporción en poblaciones Finitas

N [tamaño del universo]	101,597
--------------------------------	---------

p [probabilidad de ocurrencia]	0.5
---------------------------------------	-----

Escriba aquí el tamaño del

Escriba aquí el valor de p

Fórmula empleada

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad \text{donde: } n_0 = p^*(1-p)^* \left(\frac{Z(1-\frac{\alpha}{2})^2}{d} \right)^2$$

Fuente: Salazar (2018). *Matriz de tamaños muestrales para diversos márgenes de error y niveles de confianza, al estimar una proporción en poblaciones finitas.*

A continuación, en la tabla I se pueden observar las diferentes muestras que la matriz arrojó con la población trabajada y los diferentes errores máximos de estimación, para la investigación y caso de estudio se trabajó un nivel de confianza del 90 por ciento y 10 por ciento de error, esto dio como resultado una muestra de 67 puntos.

No se tomó un nivel de confianza y error más alto debido a los altos costos y corto tiempo al tener muchos muestreos al día, esto debido a que las muestras de suelo fueron en tiempo real versus la fecha de imagen SAR.

Tabla I. **Matriz de tamaños muestrales**

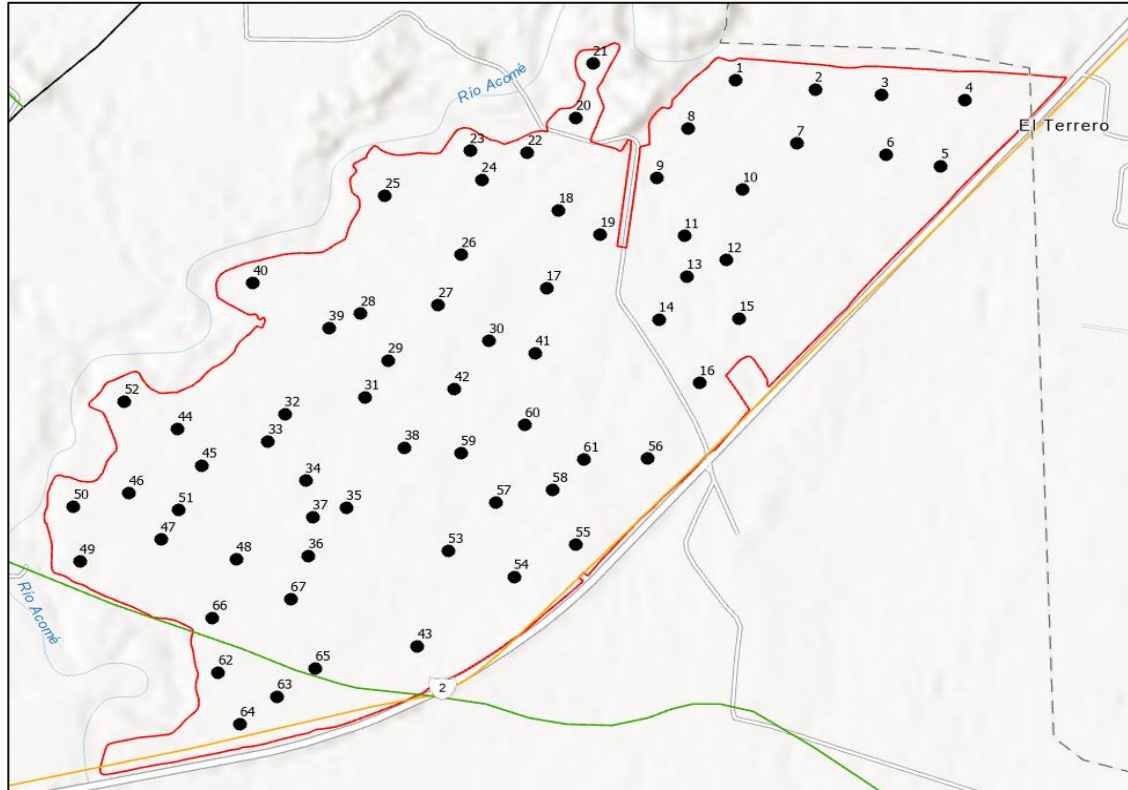
Matriz de Tamaños muestrales para un universo de 101597 con una p de 0.5										
Nivel de	d [error máximo de estimación]									
Confianza	10.0%	9.0%	8.0%	7.0%	6.0%	5.0%	4.0%	3.0%	2.0%	1.0%
90%	67	83	105	137	186	268	419	742	1,654	6,307
95%	96	118	150	196	266	383	597	1,056	2,346	8,775
97%	118	145	184	240	326	469	730	1,291	2,860	10,550
99%	166	205	259	338	460	661	1,030	1,816	3,997	14,299

Fuente: elaboración propia.

Sección IV: muestreo de datos en campo

Dentro del área de estudio se utilizó un barreno tipo *Oakfield* para tomar una muestra de suelo con 5 cm de profundidad, cada muestra fue identificada con su correlativo y datos necesarios para su debido almacenamiento y análisis, estas muestras (puntos de color negro en la figura 3) fueron distribuidas completamente al azar con la herramienta *Create random points* de ArcMAP dentro del área de estudio.

Figura 3. Muestras de suelo



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS Por.

El punto de muestreo fue ubicado en campo a través equipos topográficos GNSS RTK. Cada muestra de suelo se tomó el día que pasó el satélite Sentinel 1 y posteriormente las muestras fueron enviadas al laboratorio de suelos de Ingenio La Unión para su debida determinación de porcentaje de humedad. En la tabla II se presentan las fechas de muestreo y altura del cultivo de caña de azúcar.

Tabla II. **Fechas de muestreo en campo y altura de la caña de azúcar**

Fecha de imagen	Altura promedio de caña de azúcar (m)
22/12/2020	0.1
27/01/2021	0.35
20/02/2021	0.5
26/02/2021	0.8
4/03/2021	1.2
22/03/2021	1.5
21/04/2021	1.7
27/04/2021	1.9
5/05/2021	2.1
21/05/2021	2.15
2/06/2021	2.25
8/06/2021	2.5

Fuente: elaboración propia.

INTRODUCCIÓN

La siguiente investigación evaluó las posibles tendencias entre la retrodispersión de las imágenes SAR y el porcentaje de humedad superficial del suelo en áreas con cultivo de caña de azúcar entre cero y seis meses de edad.

La investigación se realizó en la finca Monte Alegre en el municipio de La Gomera Escuintla, Guatemala, en esta área el manejo del riego es homogéneo y el tipo de suelo es heterogéneo, este es un factor que genera mucha variabilidad en la producción debido a que no toda el área es capaz de retener humedad, por lo tanto, existen áreas más secas que otras y esto afecta directamente a la planta.

El conocer el porcentaje de humedad del suelo mejora el manejo agronómico, y esta investigación es innovadora debido a que este tipo de imágenes actualmente no se había utilizado previo a este estudio con este fin de conocer la humedad del en la agroindustria azucarera de Guatemala.

Para generar un método indirecto con precisión era importante desarrollar una metodología que fuera experimental y cuantitativa para poder ser medidos los resultados. Por lo tanto, se desarrolló una metodología que permitió evaluar los datos estadísticamente a través de análisis de correlación lineal simple y múltiple entre datos de campo y valores de retrodispersión con diferentes polarizaciones de las imágenes SAR Sentinel 1 con banda C.

El trabajo de campo fue de diciembre 2020 a junio de 2021 y con los resultados se pudo entender y responder a las preguntas que fueron formuladas inicialmente. Las tendencias entre la retrodispersión de las imágenes SAR de

Sentinel 1 y el porcentaje de humedad del suelo si es posible obtenerlas, pero en condiciones con poca vegetación, ya que la banda C no puede penetrar la señal de radar en condiciones con alta vegetación.

Para las evaluaciones se tomaron 67 muestras de suelo entre los meses de diciembre 2020 a junio de 2021, solo 29 están entre 0.30 y 0.72 R^2 , el resto obtuvo una correlación menor, los 29 que sí presentaron tendencias positivas fue debido a que estaban en un tipo de suelo franco arenoso y no hubo mucha vegetación.

Otros autores en trabajos similares mencionaron que, si hay tendencias entre estas dos variables, sin embargo, con condiciones muy diferentes en el campo (Romshoo, 2002).

Por lo tanto, en el uso de este tipo de imágenes con la banda estudiada no fue funcional para hacer un modelo predictivo del porcentaje de humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar de cero a seis meses, y posiblemente de seis a doce meses la probabilidad de éxito es aún menor ya que el cultivo en esa etapa es mucho más denso que al inicio.

Se recomienda hacer más investigación con las imágenes SAR para determinar el contenido de humedad del suelo ya que este dato es fundamental para la agricultura, y para cultivos extensivos un método indirecto es aún más favorable.

Las investigaciones próximas pueden ser en otros cultivos u otras condiciones diferentes a las evaluadas en este estudio, y para la caña de azúcar se recomienda la banda L de Sentinel 1 ya que penetra hasta 23 cm de profundidad en el suelo.

1. ANTECEDENTES

La revista internacional de percepción remota menciona en su artículo *Potencial de la estimación de la humedad del suelo utilizando datos SAR polarimétricos de banda C en regiones áridas* que el porcentaje de Humedad del Suelo juega un papel importante en diversas aplicaciones como hidrología, agronomía, climatología y ecología, pero, solo unos pocos estudios han analizado el uso potencial de parámetros polarimétricos para la predicción del porcentaje de humedad superficial del suelo. (Sensing, 2018)

En dicha revista de percepción remota se presentan unos resultados que indican qué cada parámetro polarimétrico individual de la Banda C no es muy sensible al porcentaje de humedad superficial del suelo bajo esta investigación. Sin embargo, con el creciente número de parámetros polarimétricos, la correlación entre la humedad del suelo y los parámetros polarimétricos mejora constantemente y el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE) disminuyen gradualmente. (Sensing, 2018)

En este caso una opción es investigar todas las diferentes polarizaciones y ver cuál es la que mejor resultado genera, con base a esto se podría generar en algún momento un modelo matemático que prediga la humedad del suelo con mayor precisión.

Los resultados que se muestran son combinados y estos tienen bajo R^2 entre el porcentaje de humedad del suelo y los parámetros polarimétricos. Estadísticamente para que la investigación tenga mejores resultados en R^2 , se deben realizar más muestreos en campo tomando en cuenta más variables,

como, por ejemplo, densidad de vegetación, uso del suelo o tipo de cubierta vegetal; por lo tanto “El método de regresión no lineal puede mejorar la correlación hasta cierto punto, sin embargo, los resultados preliminares hasta ahora todavía no satisfacen la precisión de usar los parámetros polarimétricos para invertir la humedad del suelo” (Sensing, 2018, p. 23). Se requieren más investigaciones en la dirección de una mejor caracterización y explotación de los datos SAR polarimétricos.

En el sitio de Yanco Australia el autor Punithraj (2020) desarrolló un trabajo para evaluar la recuperación del porcentaje de humedad superficial del suelo (5 cm) utilizando datos de banda C Sentinel-1. En esa investigación se quería demostrar con qué tipo de imagen (óptico o radar) se tenían mejores resultados para estimar el porcentaje de húmeda del suelo, para ello se usó el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) e imágenes SAR con diferentes polarizaciones.

En ese sitio, en ese momento de la investigación se contaba con 37 estaciones de medición de la humedad del suelo con un intervalo de 20 minutos. Los resultados de R^2 revelaron que entre en el NDVI y el porcentaje de humedad no hay relación, y la energía retrodispersada versus el porcentaje de humedad mostraron una correlación positiva con $R^2 = 0.57$ y 0.43 para polarización VH y VV. La constante dieléctrica también mostró una correlación positiva con energía retrodispersada que tiene $R^2 = 0,62$ y $0,38$ para polarización VH y VV respectivamente.

Hachani (2019) realizó un trabajo en el marco de investigación doctoral titulada *Recuperación de la humedad del suelo de las adquisiciones de Sentinel-1 en un entorno árido en Túnez*. En este documento, se presenta un enfoque para estimar el % HS en países que se caracterizan por un clima árido y

semiárido, para estos países es muy importante obtener estimaciones confiables de la evolución del porcentaje de humedad debido a existen muchos agricultores que dependen de sus cosechas, al no tener sitios con buena humedad en el suelo los científicos han desarrollado cada vez más investigaciones que permitan tener información del contenido de humedad del suelo, las ganancias económicas dependen del manejo y gestión del recursos hídrico para la agricultura.

La investigación de Hachani (2016) fue realizada con el fin de reducir el desperdicio de agua y programar adecuadamente las prácticas agrícolas. Por otro lado, la recuperación de los cultivos a menudo se ve obstaculizada por el pequeño rango de humedad (por debajo del 10 %).

Por lo tanto, se ha implementado un algoritmo de recuperación con el objetivo de estimar la humedad del suelo y basado en redes neuronales artificiales (ANN), utilizando los datos recopilados por el sensor de radar de apertura sintética (SAR) de Sentinel1.

Aprovechando el rápido cálculo y la alta precisión de recuperación, ANN puede generar mapas de salida confiables de porcentajes de humedad del suelo a partir de imágenes SAR complejas y utilizando poca información auxiliar, como modelos digitales de elevación, ángulo de incidencia local, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), entre otros.

La peculiar estrategia adoptada para el entrenamiento, que se ha obtenido combinando mediciones satelitales con datos simulados por modelo electromagnético (basado en el Modelo de Ecuación Integral, IEM), hizo que este algoritmo fuera robusto y casi independiente del sitio.

Los resultados obtenidos demostraron que las ANN representan una poderosa herramienta para estimar el porcentaje de humedad del suelo, siempre que hayan sido entrenados con conjuntos de datos consistentes, compuestos tanto por datos experimentales como teóricos.

La relación de la comprobación del algoritmo entre el porcentaje de humedad del suelo estimado y lo real mostró el coeficiente de correlación de Pearson, $r = 0,77$ y $RMSE = 1,84 \%$.

Romshoo (2015) es un autor que estudia temas como: polarimetría de radar, radar de apertura sintética, silvicultura, detección remota por radar, mapeo de vegetación, radar aerotransportado, retrodispersión, métodos de correlación, procesamiento de señales geofísicas, interferometría de ondas de radio, distribuciones estadísticas, agricultura, medición de humedad, suelo, radar espacial, técnicas hidrológicas, mapeo del terreno entre otros.

En el simposio internacional de la geociencia y percepción remota de IEEE presentó el tema Radar de banda C para la estimación de la humedad del suelo en condiciones agrícolas y menciona que el coeficiente de retrodispersión σ^0 de los datos del SAR ha mostrado una correlación y sensibilidad razonables con la humedad volumétrica del suelo observada a 5 cm de profundidad en Tailandia a escala de campo.

Las estimaciones se validaron con las observaciones de campo en un área pequeña y están de acuerdo. Además, se simuló el porcentaje de humedad del suelo (% HS) en un punto utilizando tres modelos hidrológicos y se comparó con la retrodispersión del radar y las observaciones puntuales. (Romshoo, 2002)

La autora Igor Garkusha en el simposio internacional sobre geociencias y teledetección explicó el trabajo titulado: *Uso de datos de Sentinel-1 banda C para monitorear la humedad del suelo* y menciona que se han considerado aspectos de la modelización del mapa de humedad del suelo por la escena del radar de Sentinel-1 en el ejemplo de un territorio que ha sufrido una precipitación intensa.

En este caso de estudio se compararon las representaciones del territorio con el radar y las imágenes multiespectrales, además de las imágenes de satélites meteorológicos y los datos de las estaciones meteorológicas, se utilizaron imágenes espaciales multiespectrales de verificación adicionales de Landsat-8 y Sentinel-2. Como resultado la autora menciona que con el uso del modelo empírico obtenido fue posible construir mapas de humedad del suelo del territorio de investigación para diferentes épocas. (Garkusha, 2017)

Şekertekin (2018) desarrolló un artículo científico para la revista Internacional de Medio Ambiente y Geo informática (IJEGEO) que es una revista internacional multidisciplinaria.

En dicha revista los autores mencionan que en el artículo científico se realizó el *Mapeo de la humedad del suelo mediante el radar de apertura sintética Sentinel-1A* (Şekertekin, 2018). El objetivo de este estudio fue estimar y mapear la distribución del porcentaje de humedad del suelo utilizando un radar de apertura sintética de banda C Sentinel-1A.

En este estudio se adquirieron datos de Sentinel-1A el 24 de abril de 2016 se utilizaron para recuperar el mapa de humedad del suelo de una región agrícola. Se llevaron a cabo mediciones del porcentaje de humedad del suelo in situ en 20 campos de prueba simultáneamente con la adquisición de datos SAR. Por lo tanto, Los efectos de la humedad del suelo y el ángulo de incidencia local

en se analizaron con el coeficiente de retrodispersión y luego se realizó un análisis de regresión múltiple para generar un modelo empírico.

El modelo propuesto se evaluó utilizando métricas estadísticas y se determinaron los R^2 y Root Mean Square Error (RMSE). Los resultados fueron 0,84 y 2,46 %, respectivamente. Por lo tanto, en este caso de estudio los resultados fueron satisfactorios para estimar y mapear el contenido de humedad del suelo. (Şekertekin, 2018)

En la primera aproximación del porcentaje de humedad de la planta para maduración de la caña de azúcar a través de imágenes multiespectrales de drones (ópticas) se pudo concluir que a menor índice NDWI menor contenido de humedad existe en la planta, y a mayor índice NDWI mayor contenido de humedad, teniendo como resultados las siguientes correlaciones lineales: R^2 0.89 (15/03/2018), R^2 0.83 (3/04/2018), R^2 0.64 (18/04/2018) (Unión, noviembre 2018).

Estos fueron estudios con el fin de generar modelos para conocer la humedad de la planta, sin embargo, se inició a estudiar la humedad del suelo con imágenes ópticas pero los resultados han sido negativos, por lo tanto, en el año 2020 se iniciaron a estudiar las imágenes SAR con fines de predecir el contenido de humedad del suelo.

La doctora Lorane (2019) experta en hidrología y gestión de recursos hídricos de Panama mencionan en su tesis doctoral *Estimación del contenido de humedad en el suelo mediante la combinación de imágenes radar (Sentinel 1) y ópticas (Sentinel 2) en la cuenca del canal de Panama* que el método utilizado ofrece la posibilidad de no utilizar datos *in-situ* como se realizó en el trabajo que ella desarrollo; puesto que con las imágenes se pueden obtener datos de

humedad en la zona que se requiera. Pero se recomienda validar el método con datos en campo para determinar su confiabilidad en la estimación del porcentaje de humedad del suelo.

Como resultados obtenidos se tiene una relación lineal entre el NDVI calculado a partir de imágenes ópticas y la retrodispersión de la señal de radar para estimar la humedad del suelo. Relación en la cual, si aumenta el índice de vegetación se dificulta estimar la relación de la retrodispersión y el % HS. Una vegetación muy densa puede ocasionar errores en la estimación. (Lorane, 2019)

Barrett indica que la pérdida de microondas del suelo depende en gran medida del contenido de humedad, directamente relacionado a la constante dieléctrica del suelo (ϵ). La constante dieléctrica del suelo en condiciones normales se encuentra alrededor de 5, mientras que en suelos extremadamente húmedos ronda los 70. (Barrett, 2009)

Este dato es sumamente importante conocerlo ya que permite terminar de comprender donde posiblemente haya tendencia entre la retrodispersión de las imágenes SAR y el contenido de humedad del suelo

La doctora Notarnicola define que hay otros factores, además de constante dieléctrica (ϵ), que influyen en el coeficiente de retrodispersión (s_0) observado por el radar. Ellos son: la rugosidad superficial, la textura del suelo, la topografía, y la presencia de vegetación, siendo esta última uno de los factores que pueden dificultar o impedir una correcta estimación de humedad del suelo en los suelos subyacentes. (Notarnicola, 2013)

La Universidad Autónoma de Nuevo León menciona en su artículo *Monitoreo de la humedad de suelo superficial a partir de observaciones satelitales de Microondas activas y pasivas* que un radar mide los ecos de los pulsos de campo eléctrico emitidos en el rango de las microondas que rebotan en la superficie terrestre.

Por lo tanto, el campo eléctrico disperso (ecos) que regresa al radar cambia su amplitud y fase en función de la cantidad del porcentaje de humedad del suelo; entre mayor sea el contenido de agua en el suelo, mayor será la amplitud del campo disperso, esto da la interpretación de que si existen tendencias entre las microondas y el contenido de humedad, por lo tanto es recomendable seguir investigando este tipo de herramientas que posiblemente generen buenos resultados en un futuro para determinar la humedad del suelo. (Hernández, 2016)

En el trabajo presente se propuso investigar la retrodispersión de las imágenes SAR de Sentinel 1 con banda C en áreas con cultivo de caña de azúcar para conocer si existe posibilidad de predecir el porcentaje de humedad del suelo en dicho cultivo, a diferencia de los trabajos anteriormente citados podemos notar que sí es una alternativa determinar la variable estudiada, sin embargo, no se conoce con certeza cómo funciona esta herramienta (Imágenes SAR) en caña de azúcar en la costa sur de Guatemala.

2. JUSTIFICACIÓN

La realización del presente estudio se basa en la línea de investigación de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) Sentinel 1 banda C, con el fin de evaluar si existen tendencias positivas entre la retrodispersión de las imágenes SAR y el porcentaje de humedad superficial del suelo en una finca de la costa sur de Guatemala; si existen tendencias positivas en el estudio podría generarse un modelo matemático que prediga el contenido de humedad del suelo.

La investigación dará un aporte relevante al uso de las imágenes de radar y la cuantificación del porcentaje de humedad de suelo para áreas con cultivo de caña de azúcar a gran escala, debido que; al tener un mapa de predicción y prescripción de la humedad del suelo se podría hacer una mejor gestión de los recursos hídricos actuales y futuros.

Con el estudio se obtendrán resultados que demuestren estadísticamente si hay tendencias positivas entre la retrodispersión de las imágenes de radar y el porcentaje de humedad del suelo. Si los resultados presentan un R^2 cercano a uno podría generarse un modelo matemático que prediga la humedad del suelo con alta precisión, mayor cobertura y menos costo.

Dicho mapa temático podría ser actualizado automáticamente cada vez que existan imágenes nuevas del satélite Sentinel-1 cuantificando los porcentajes de humedad del suelo, y el producto final (mapa de humedad) se visualizará en plataformas digitales de alto rendimiento.

3. ALCANCES

La presente investigación tendrá como producto mapas digitales que estimen el porcentaje de humedad superficial del suelo a través de la retrodispersión de las imágenes de radar con una frecuencia de 6 días, los mapas servirán para el área agrícola específicamente para la agroindustria azucarera de la costa sur de Guatemala.

3.1. Resultados

Los resultados que se obtengan en la presente investigación van dirigidos directamente al sector agrícola con énfasis al cultivo de caña de azúcar, son usuarios que tiene una alta demanda de este tipo de información; el potencial de uso es alto debido a la gran cantidad de riego que se aplica en época de verano en la agroindustria azucarera de Guatemala.

3.2. Técnicos

Los avances en cuantificación de humedad superficial del suelo son altos en zonas áridas como Israel, Turquía, China, Estados Unidos de Norte América, y gran parte de las amazonas, los resultados de tendencias entre la retrodispersión de las imágenes SAR con banda C son altas en zonas despobladas y con poca vegetación, y relativamente bajas en zonas vegetación densa como masas forestales.

3.3. Investigativos

La humedad del suelo juega un papel muy importante y necesario en la agricultura, es una variable que se debe tomar en cuenta en la planificación y programación de la gestión del riego para cultivos agrícolas.

Para el cultivo de caña de azúcar la humedad superficial del suelo es un recurso natural valioso, pero es un recurso que se no se logra medir a través de un método directo e indirecto convencional en el cien por ciento del área de interés, es una debilidad al momento de programar una lámina de riego precisa en el campo.

Por lo tanto, la investigación se trata de cubrir esa debilidad con herramientas de la Geomática y sensores remotos que generan imágenes SAR como Sentinel 1, con el fin de ser eficientes, tener más cobertura, ser más preciso y tener una rentabilidad en el proceso de cuantificación del porcentaje de humedad del suelo. Se utiliza Sentinel 1 con banda C debido a que es la que mejor opción para la superficie del suelo por sus características técnicas y económicas, ya que esta banda es gratuita.

La investigación se enfoca a través de recolección de datos de campo y análisis estadísticos de correlaciones, por lo tanto, es cien por ciento cuantitativa debido a que se piensa generar un método indirecto a través de tendencias entre la retrodispersión de las imágenes SAR y el porcentaje de humedad superficial del suelo medido en laboratorio.

4. MARCO TEÓRICO

Este capítulo hace referencia a la conceptualización y descripción de los aspectos importantes que intervienen en la obtención, procesamiento y análisis de imágenes SAR con banda C de Sentinel 1, para la determinación del porcentaje de humedad superficial del suelo.

4.1. Agricultura

Agricultura: arte, ciencia e industria que se ocupa de la explotación de plantas y animales para el uso humano. (Ochoa, 2019)

4.2. Agricultura de precisión (AP)

Chartuni (2007) menciona que, a partir de la década de los setenta, se comenzó a delinear una nueva forma de hacer agricultura con los estudios sobre automatización de máquinas agrícolas, posteriormente; a finales de la década de los ochenta y comienzos de los noventa, posteriormente con la liberación del GPS para uso civil, fue posible desarrollar equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas, con una mayor eficiencia de aplicación de insumos.

Por lo tanto, esto redujo el impacto ambiental y, como consecuencia, disminuyeron los costos de la producción de alimentos. Todo esto permitió ir configurando el concepto de AP como: el conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos)

en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola.

4.3. Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) son: un conjunto organizado de computadoras, programas, datos geográficos y personal designado para recolectar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y desplegar toda clase de información referenciada geográficamente. (Navarro, 2011)

4.4. Percepción remota

Salazar (2020) menciona que la percepción remota es una disciplina basada en ciencia y tecnología que permite desarrollar, capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de la tierra, obtenidos desde sensores en el espacio, sensores aerotransportados y con sensores que capturan datos de mediciones in situ.

4.5. Teledetección

La teledetección puede entenderse como un conjunto de actividades que permite obtener información sobre los objetos que componen la superficie tierra sin necesidad de contacto directo con ellos. Esta técnica funciona a través de sensores que capturan datos, por ejemplo, en la vida real un humano hace teledetección al momento que captura datos e información a través de los ojos, para la teledetección agrícola funciona similar cuando una cámara captura datos de un objeto.

Por lo tanto, esta actividad implica la adquisición y análisis (interpretación y extracción información) de la energía electromagnética emitida o reflejada por

los objetos terrestre y registrado por sensores remotos. Energía electromagnética utilizado para obtener datos por teledetección también es llamada radiación electromagnética. (Morales, 2002)

4.6. Imágenes Sentinel 2 corregidas a nivel L2A

El centro Copernicus de la ESA ya pone a disposición pública desde el 18 de marzo de 2019 la opción de descarga de imágenes de Sentinel 2 corregidas atmosféricamente con el objetivo de ahorrar el tiempo en el análisis de procesado de nivel 1C a 2A. (ESA, 2013)

El lote de imágenes Sentinel nivel 2A se encuentra disponible cada 48-60 horas posterior a la incorporación del producto 1C inicial. Por lo tanto, para tener disponibles las imágenes corregidas atmosféricamente la resolución temporal puede variar de 2 a 2.5 días, ver características técnicas en la tabla II.

4.7. Resoluciones de Sentinel-2

Las imágenes de Sentinel 2 proporcionan mediciones con las siguientes resoluciones:

4.7.1. Resolución temporal

Es la cantidad de veces que el satélite captura información de una ubicación particular. Para el caso de Sentinel 2 la frecuencia de captura de datos es de 10 días y la captura de la constelación combinada de ambos satélites (A y B) es de 5 días. (ESA, 2013)

4.7.2. Resolución espacial

Es el tamaño de cada píxel o celda de un ráster creado por el sensor del satélite, para el caso de Sentinel 2 la resolución espacial se representa en la tabla III. (ESA, 2013)

Tabla III. **Características técnicas de Sentinel 2**

Sensor	Número de banda	Nombre de banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)
MSI	1	Aerosol costero	443,9	20
MSI	2	Azul	496,6	65
MSI	3	Verde	560	35
MSI	4	rojo	664,5	30
MSI	5	Vegetación borde rojo	703,9	15
MSI	6	Vegetación borde rojo	740,2	15
MSI	7	Vegetación borde rojo	782,5	20
MSI	8	NIR	835,1	115
MSI	8b	NIR estrecho	864,8	20
MSI	9	Vapor de agua	945,0	20
MSI	10	SWIR - Cirrus	1373,5	30
MSI	11	SWIR	1613,7	90
MSI	12	SWIR	2202,4	180

Fuente: elaboración propia.

4.7.3. Resolución radiométrica

Es una determinación del nivel incremental de la intensidad o de reflectancia que se puede representar o que se distingue por el sistema. Cuanto mayor sea la resolución radiométrica, más capaz el dispositivo será de detectar diferencias en la intensidad o reflectancia. (ESA, 2013)

4.8. Imágenes de radar Sentinel-1

Los radares son sensores activos y la escena que se va a fotografiar se ilumina, no con luz sino con señales electromagnéticas de una longitud de onda de microondas determinada. Las imágenes SAR proporcionan información sobre las propiedades geométricas y dieléctricas de la superficie o volumen de interés, que depende principalmente de la rugosidad que tiene una superficie y su contenido de humedad. Las imágenes ópticas se distinguen de las de radar porque no pueden funcionar de noche ni ver a través de las nubes. (Labrador, 2012)

4.9. Características técnicas de radar Sentinel 1

En los siguientes conceptos se describirá cada función, frecuencia, tipo de instrumento, aplicación y modos de operación de satélite Sentinel 1 (tabla III).

4.9.1. Descripción general del satélite Sentinel 1

La misión Sentinel-1 está compuesta por una constelación de dos satélites que comparten el mismo plano de la órbita, y transportan un avanzado instrumento radar que les permite obtener imágenes durante el día o la noche, bajo cualquier condición meteorológica, para el monitoreo marítimo y terrestre, para responder a emergencias, cambio climático y seguridad. (Camprell, 2011). Fue lanzado el 3 de abril de 2014, Sentinel-1B el 25 de abril de 2016.

Tabla IV. **Características técnicas de Sentinel 1**

Parámetros	Sentinel 1
Altitud de Órbita	693km
Bandas Radar	C-Band
Modo de imagen SAR	<i>Stripmap (GSD: 5m, 80km swath), Interferometric Wide Swath Mode (GSD: 5x20m, 240km swath), Extra Wide Swath Mode (400km Swath, single-look), Wave Mode (20x5m).</i>
Polarización	VV+VH or HH+HV
Distancia de Muestreo (GSD)	5-20m
Lanzamiento/Expectativa de vida	2014-2021
Tiempo Revisita	12 días

Fuente: elaboración propia.

4.9.2. Frecuencia de paso

Sentinel-1 es una constelación de dos satélites que orbitan a una distancia de 180°, por lo que la misión capta imágenes de la tierra entera cada seis días (en el ecuador).

4.9.3. Instrumento

El Radar de Apertura Sintética (SAR) banda C, proporciona una precisión radiométrica de 1 dB con una frecuencia central a 5.405 GHz.

4.9.4. Aplicaciones principales de Sentinel 1

El S-1 se dedica al monitoreo del hielo marino, derrames de petróleo, vientos marinos, olas y corrientes, cambio de la utilización de la tierra y tratamiento de las emergencias (como tornados y terremotos). (ESA, 2020).

4.9.5. Modos de operación

Sentinel 1 tiene cuatro modos de operación:

- El modo Strip Map (SM) presenta una resolución espacial de 5 por 5 metros (16 por 16 pies) y una franja de 80 km (50 millas). Los únicos usos de SM son para monitorear islas pequeñas, así como la gestión de emergencias para eventos extraordinarios a pedido. Ofrece productos de datos en polarización simple (HH o VV) o doble (HH + HV o VV + VH) (ESA, 2020).
- El modo de franja ancha interferometría (IW) presenta una resolución espacial de 5 por 20 metros (16 por 66 pies) y una franja de 250 km (160 millas). IW es el modo operativo principal sobre tierra IW logra interferometría mediante sincronización de ráfagas. Ofrece productos de datos en polarización simple (HH o VV) o doble (HH + HV o VV + VH) (ESA, 2020).
- El modo de franja extra ancha (EW) presenta una resolución espacial de 25 por 100 metros (82 por 328 pies) y una franja de 400 km (250 mi). EW se utiliza principalmente para monitorear amplias áreas costeras en busca de fenómenos como el tráfico marítimo y posibles peligros ambientales como derrames de petróleo o cambios en el hielo marino. Ofrece productos de datos en polarización simple (HH o VV) o doble (HH + HV o VV + VH) (ESA, 2020).
- El modo Wave (WV) presenta una resolución de 5 por 20 metros (16 por 66 pies) y una velocidad de datos baja. Produce imágenes de muestra de 20 por 20 km (12 por 12 millas) a lo largo de la órbita a intervalos de 100

km (62 millas). Este es el modo operativo principal en mar abierto. Ofrece productos de datos solo en polarización simple (HH o VV) (ESA, 2020).

4.9.6. Productos de datos Sentinel 1

Sentinel 1 tiene cuatro tipos de productos de datos, pero para la investigación nos interesa solamente el siguiente producto (GRD). (Martin, 2020)

4.9.7. Productos de nivel 1 (GRD)

Los productos nivel-1 GRD consisten en datos SAR proyectados utilizando un modelo elipsoidal WGS84. Los píxeles incluyen el valor de amplitud, perdiéndose la información de la fase. El producto original tiene píxeles aproximadamente cuadrados. Tras la aplicación del procesamiento *multi-look* para la reducción del efecto de moteado o efecto “sal y pimienta” (*speckle*) se obtendrán píxeles cuadrados con pérdida de resolución.

Los productos de GRD están disponibles en tres resoluciones, que se caracterizan por el modo de adquisición: *Stripmap (SM)*, *Interferometric Wide swath (IW)* o *Extra-Wide swath (EW)*, y por el nivel de procesamiento *multi-looking* aplicado: resolución completa (FR), alta resolución (HR), resolución media (MR). (Martin, 2020).

4.10. Sensitivo a la humedad

Una microonda continuará propagándose hasta encontrar una discontinuidad dieléctrica, como sucede cuando está presente el agua en el suelo, debido a que al aplicar un campo eléctrico las moléculas de agua libres rotan fácilmente para alinearse con el campo. Esto debido a que la constante dieléctrica real varía entre -3 (suelos muy secos) y 80 (agua), esto significa que

existe relación positiva entre la constante dieléctrica real y la retrodispersión de SAR, básicamente muestra que a mayor cantidad de agua en la superficie habrá mayor reflexión de la onda en dirección hacia el sensor de donde proviene, en otras palabras; retornos más intensos.

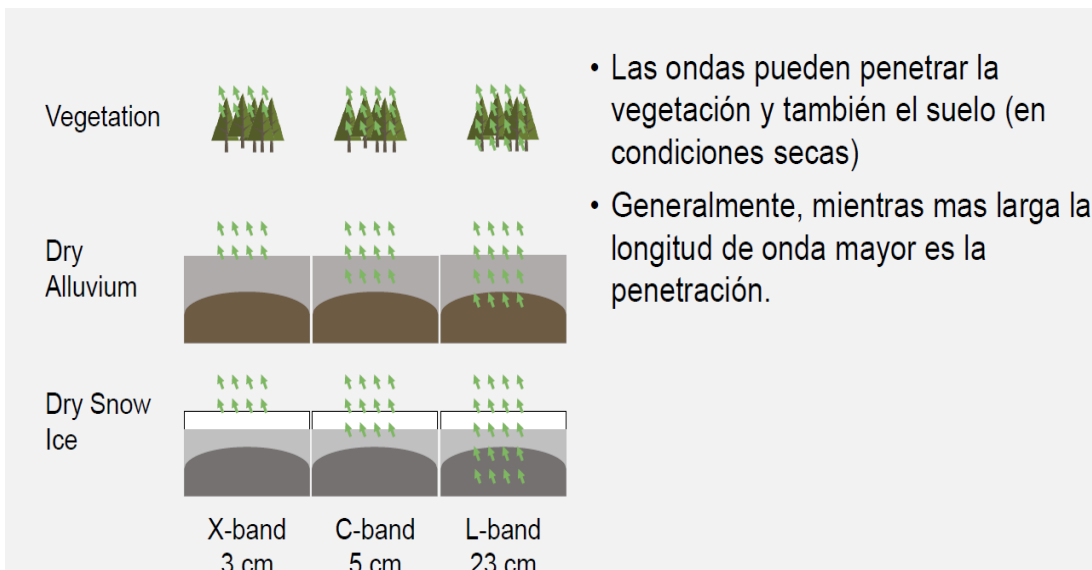
La profundidad de penetración en el suelo o el cultivo dependerá de la dieléctrica, la longitud de onda y el ángulo incidente (ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la vertical de la superficie del terreno). (McNaim, 2018)

4.11. Sensitivo a la vegetación

La dispersión de las microondas de longitudes de ondas largas dependerá del tamaño, forma y orientación de estructuras de la planta, como; hojas y tallos. La dispersión mayormente se da en el dosel vegetal, por ello una microonda que entra a un dosel puede dispersarse por una hoja, tallo o por el suelo directamente. Los eventos de dispersión determinaran la porción de energía que retorne al sensor, indicando que tipo de cultivo puede estar presente y la condición de este.

Las longitudes de onda que sean mayores penetrarán más profundamente en un dosel y por lo tanto involucran más interacción con el suelo, ver figura 4. Las frecuencias de las longitudes de onda mayores como la banda L, son mejores para el tema de la humedad del suelo. Para modelación biofísica, dependerá del dosel de las plantas (McNaim, 2018).

Figura 4. **Penetración de la señal de radar**



Fuente: Podest (2010). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética*.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la implementación de la metodología planteada. El área de estudio fue en la finca Monte Alegre ubicada en la Gomera Escuintla, dicha finca contaba en total con 1,500 hectáreas de cultivo de caña de azúcar; del total solo se evaluaron 440 hectáreas.

En la tabla número V se muestra la frecuencia de los muestreos, numero de muestreos por día y cantidad muestras llevadas a laboratorio para análisis de porcentaje de humedad del suelo.

Tabla V. **Frecuencia de muestreo en campo**

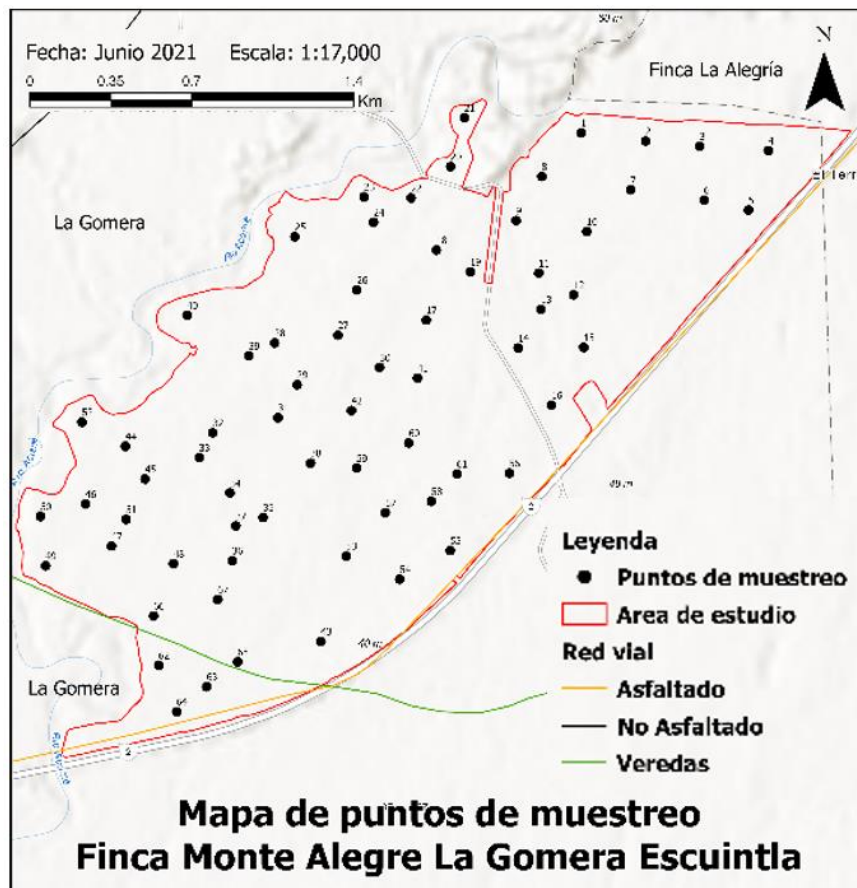
Fecha de imagen	Cantidad de muestras	Cantidad de muestras de suelo de dos libras de peso
22/12/2020	1	7/03/1900
27/01/2021	1	7/03/1900
20/02/2021	2	7/03/1900
26/02/2021	2	7/03/1900
4/03/2021	2	7/03/1900
22/03/2021	2	7/03/1900
21/04/2021	2	7/03/1900
27/04/2021	2	7/03/1900
5/05/2021	2	7/03/1900
21/05/2021	2	7/03/1900
2/06/2021	2	7/03/1900
8/06/2021	2	7/03/1900
Total	22	804

Fuente: elaboración propia.

En los puntos de observación se obtuvo el porcentaje de humedad del suelo a través de análisis de laboratorio y valores de polarizaciones Vertical Vertical (VV) y Vertical Horizontal (VH) a través de imágenes de radar Sentinel 1 utilizando la banda C.

En la figura 5 se observa la distribución espacial aleatoria de cada punto de muestreo en las 440 hectáreas de la finca Monte Alegre.

Figura 5. Mapa de puntos de muestreo

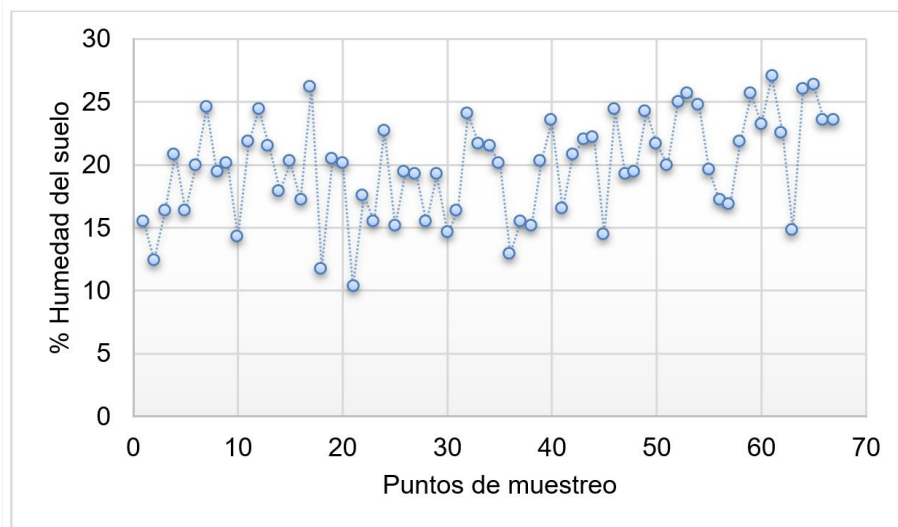


Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

5.1. Porcentaje de humedad del suelo

En la figura 6 podemos observar los porcentajes de humedad promedio que presentó cada punto de muestreo durante un periodo de tiempo de seis meses (diciembre 2020 a junio 2021), el promedio del porcentaje de humedad de los 67 puntos fue de 19.84, el valor mínimo fue de 10.25 y el valor máximo fue de 27.05 por ciento.

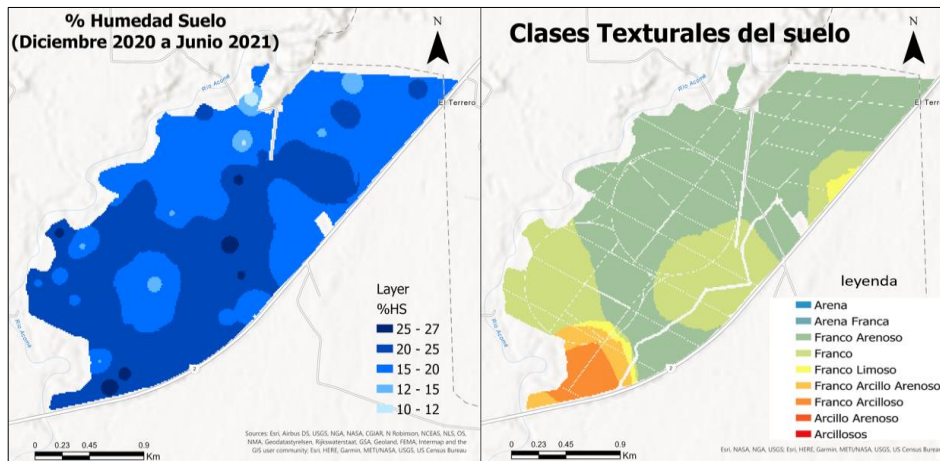
Figura 6. **Porcentaje de humedad promedio**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se representa la distribución de los porcentajes de humedad geoespacial mente dentro del área de estudio y las clases texturales del suelo, el mapa de porcentaje de humedad fue elaborado a través de los valores promedios de campo y el método de interpolación IDW.

Figura 7. Mapa de porcentajes de humedad y texturas



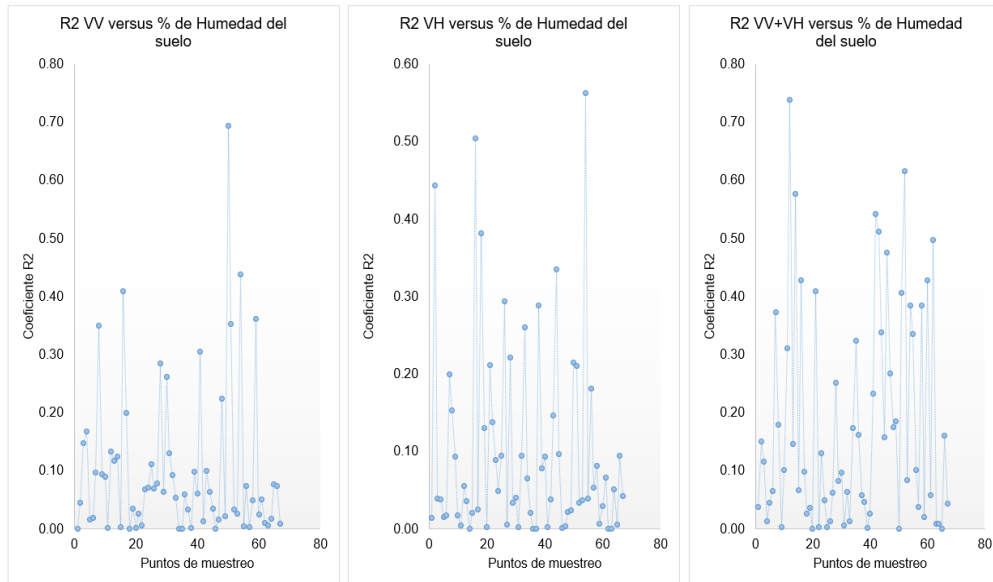
Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

A cada punto de muestreo se le realizó un análisis de correlación lineal tomando los 12 resultados del laboratorio de suelos versus los valores de retrodispersión de las imágenes de radar que se obtuvieron el mismo día del muestreo en campo. Por lo tanto, se obtuvieron 67 R^2 por cada análisis de polarización versus el porcentaje de humedad del suelo del laboratorio; y en total se obtuvieron 201 R^2 del estudio completo.

En la figura 8 se representan los resultados de los R^2 por cada polarización. Existió poca tendencia o correlación lineal simple entre la retrodispersión de las imágenes SAR y el porcentaje de humedad del suelo, los puntos con más correlación están dentro de 0.50 a 0.72 R^2 .

El 28 por ciento de los datos presentaron tendencia arriba de 0.10 R^2 entre la polarización VV versus el porcentaje de humedad del suelo y el 27 por ciento de los datos presentaron tendencia arriba de 0.10 R^2 entre la polarización VH versus el porcentaje de humedad del suelo. Al fusionar ambas polarizaciones (VV+VH) el 51 por ciento de los datos presentaron tendencia arriba de 0.10 R^2 .

Figura 8. **Correlación lineal por punto de muestreo**

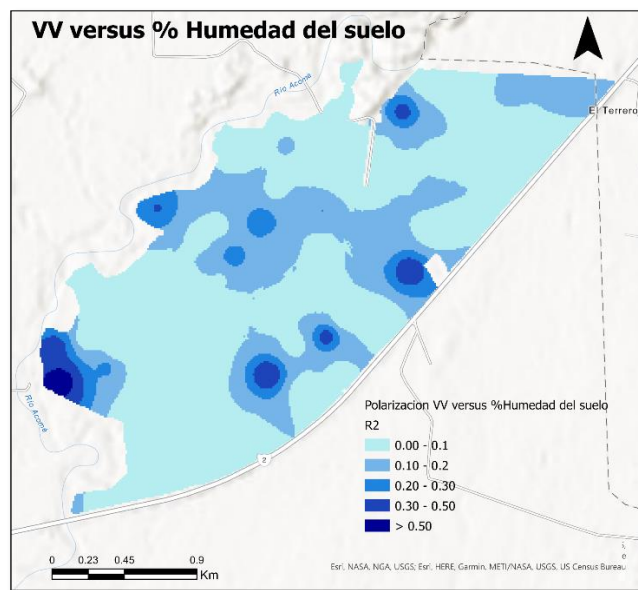


Fuente: elaboración propia.

Los resultados de los análisis de correlación lineal simple se representan a través de mapas temáticos en la figura 9 con el objetivo de identificar aquellas zonas geoespacial mente con mayor y menor tendencia (R^2) y estudiar cual fue la causa que influyo en el resultado.

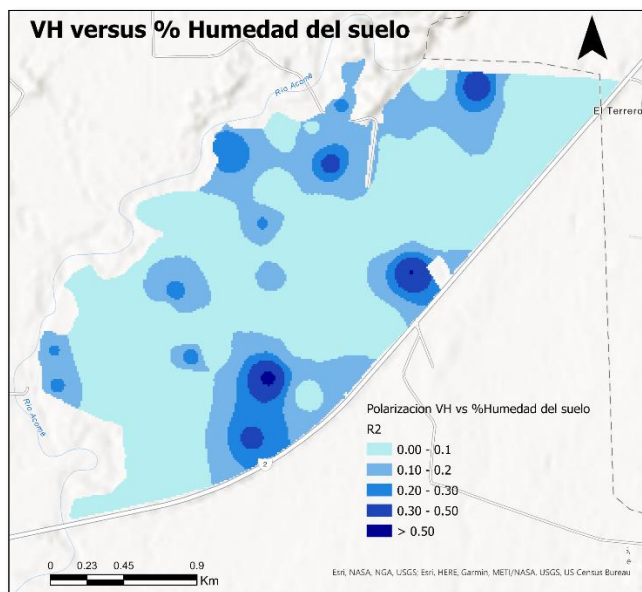
Las zonas con mayor tendencia entre la retrodispersión de las imágenes SAR versus el porcentaje de humedad del suelo se muestran en color azul intenso mientras que las zonas con menor tendencia se representan en color celeste claro (figuras 9, 10 y 11).

Figura 9. Distribución geoespacial de R^2 (VV vs. %HS)



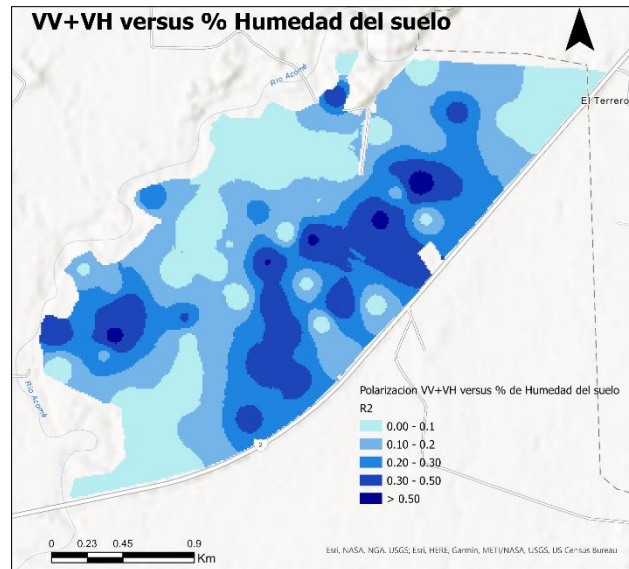
Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

Figura 10. Distribución geoespacial de R^2 (VH vs. %HS)



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

Figura 11. Distribución geoespacial de R^2 (VV+VH vs. %HS)



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

En la tabla VI se muestran los valores típicos del coeficiente de retrodispersión de las imágenes SAR, el programa *Copernicus* dice que “A mayor constante dieléctrica de una superficie o material, mayor será la retrodispersión y por lo tanto más brillante se observará un píxel en la imagen radar.

Los objetos metálicos y el agua tienen una constante dieléctrica alta (80) mientras que el resto de los materiales tienen una más baja. En condiciones secas la constante también es baja (3-8), lo que implica que la humedad en suelos o en cubiertas vegetales puede producir un aumento significativo de reflectividad de la señal radar (25-30).

Por lo tanto, este tipo de teledetección puede usarse para obtener el contenido en humedad de los suelos en los resultados obtenidos las retrodispersiones van de -8 hasta -17.

Tabla VI. **Valores típicos del coeficiente de retrodispersión**

Valores de retrodispersión	Superficies típicas
Muy alto (más de -5dB)	Objetos antropogénicos (ambientes urbanos)
	Pendientes orientadas hacia el sur
	Superficies muy rugosas
Alto (de -10 dB a 0 dB)	Superficies rugosas
	Vegetación densa (bosques)
Moderado (de -20 a -10 dB)	Niveles medios de vegetación
	Cultivos
	Superficies moderadamente rugosas
Bajo (menos de -20 dB)	Superficies lisas
	Aguas en calma
	Carreteras
	Suelos muy secos (arenas)

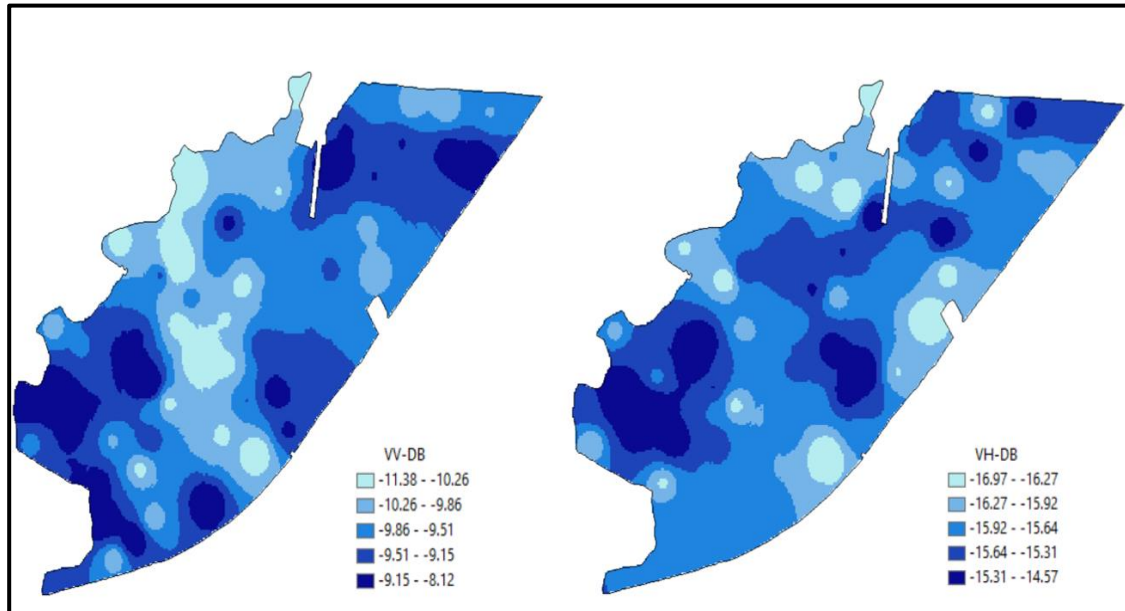
Fuente: elaboración propia.

El promedio de cada polarización por punto de muestreo se interpoló y se generó un mapa temático que representa la distribución espacial en el tiempo, este mapa sirve para comparar geográficamente los valores del coeficiente de retrodispersión recomendados por el programa C

Copernicus versus los valores del momento de estudio. En la figura 12 se observa que los valores obtenidos de retrodispersión van de -8 a -17, esto sucede por la alta vegetación que existió en el momento de captura de información con la banda C del satélite Sentinel 1.

Sin embargo, las zonas con mayor coeficiente (-8) son las zonas más secas que contienen suelos arenosos.

Figura 12. Retrodispersión del suelo (VV y VH)



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

Los primeros tres meses de la investigación (diciembre 2020, enero y febrero 2021) las condiciones del cultivo de caña de azúcar permitieron la entrada de luz y salida de retrodispersión de las imágenes de satélite, pero a partir del tercer mes después de la cosecha (marzo 2021 en el área de estudio).

El cultivo de caña de azúcar cerró esa entrada de luz debido a que las hojas del cultivo se traslapan, siendo este un problema más para obtener información del suelo a través de las microondas de las imágenes SAR (figura 13).

Figura 13. Condiciones del cultivo en tercer mes de edad



Fuente: [Fotografía de Juan Carlos Cante]. (Finca Monte Alegre. 2021). Colección particular. La Gomera Escuintla, Guatemala.

6. DISCUSION DE RESULTADOS

En los resultados obtenidos fue evidente que, si existieron tendencias positivas entre la humedad del suelo y la retrodispersión de las imágenes de radar, sin embargo, no en todos los puntos las correlaciones son altas, solo algunos puntos presentan tendencias que posibilitan la manera de generar un modelo que prediga la humedad superficial del suelo utilizando las imágenes SAR de Sentinel 1 con banda C.

Para poder hacer un modelo que estime el porcentaje de humedad superficial del suelo utilizando la banda C es necesario que los resultados de correlación lineal simple presenten un coeficiente de R^2 cercano a 1, esto debido a que cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor sería el ajuste del modelo a la variable que predijéramos (% HS), de forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado está el modelo, y, por tanto, menos fiable sería.

La banda C de Sentinel 1 nos proporcionó dos tipos de polarización, la Vertical Vertical (VV) y Vertical Horizontal (VH), sumado a esto se evaluó la unión de ambas polarizaciones dando como resultados VV+VH.

Para cada punto de muestreo se obtuvo un R^2 entre las polarizaciones y porcentajes de humedad y se obtuvieron resultados con correlaciones bajas y no cercanas a un R^2 igual o cercano a 1, solo 3 puntos de muestreo de los 67 en total tuvieron un R^2 positivo arriba de 0.40 para cada análisis, esto significa que los tres puntos tienen tendencias positivas con cualquier polarización, pero el punto 50 tiene un R^2 de 0 en la combinación de las polarizaciones (VV+VH) los

demás puntos están por debajo de este resultado, los R^2 de todos los puntos de muestreo se detallan en el anexo 1.

Los puntos que tuvieron resultados positivos arriba de 0.30 tenían un rango de humedad del suelo de 17 a 25 por ciento y estaban en una clase textural tipo franco, ambos puntos tuvieron una retrodispersión VV de -10 y VH -16.

Según el programa Copernicus de la ESA menciona que los suelos secos (arenas, como el área de estudio) están entre un coeficiente de -20, y el promedio de los coeficientes obtenidos están en -16 en VV y -10 en VV, por lo tanto, estos resultados obtenidos coinciden con los coeficientes de retrodispersión de niveles medios de vegetación, cultivos y superficies moderadamente rugosas según el programa Copernicus.

Estos resultados obtenidos fueron debido a que el área el 83 % (5 de 6 meses) del tiempo el área de estudio tuvo cultivo, y la banda C de las imágenes SAR no fue capaz de penetrar u obtener información directa del suelo, por lo tanto, los R^2 entre las retrodispersiones y los porcentajes de humedad del suelo son bajos.

En la figura 12 se puede observar cómo fue la condición del cultivo desde el tercer mes de edad de la caña de azúcar (fecha de corte diciembre 2020) y en la figura 13 se puede ver la capacidad de la banda C de Sentinel 1 para capturar información del suelo.

La penetración de la señal en función de la longitud de onda en objetos es diferente para cada tipo de banda, por lo tanto, en el trabajo realizado como se observa en la Figura 5 se nota que la banda C tiene poca posibilidad de penetrar el suelo al haber vegetación en el área.

CONCLUSIONES

1. Se pretendía generar un modelo para poder estimar el porcentaje de humedad superficial del suelo en zonas con caña de azúcar para los primeros 6 meses de edad del cultivo, sin embargo, los resultados promedio de los datos estudiados presentaron correlaciones lineales simples (R^2) entre 0 y 0.10, por lo tanto, con estos resultados no es confiable generar un modelo predictivo de la variable deseada ya que generaría mucho error en la predicción.
2. La tendencia promedio de los datos estudiados entre la retrodispersión de la imagen de radar Sentinel 1 con la polarización VV fue de 0.10 R^2 , sin embargo, existieron 7 de los 67 puntos estudiados con un R^2 arriba de 0.30 y el máximo valor fue de 0.67. Estos puntos presentaron resultados positivos debido a que en el lugar donde estaban ubicados existió menor vegetación a lo largo del estudio en los meses de diciembre 2020 a junio de 2021.
3. La tendencia promedio de los datos estudiados entre la retrodispersión de la imagen de radar Sentinel 1 con la polarización vertical horizontal fue de 0.10 R^2 , sin embargo, existieron 5 de los 67 puntos estudiados con un R^2 arriba de 0.30 y el máximo valor fue de 0.56. Estos puntos tenían las mismas condiciones mencionadas en la conclusión anterior, no existió mucha vegetación en el área y posiblemente este fue un factor positivo para las respuestas obtenidas.

4. Cuando se evaluó la unión de ambas polarizaciones (VV+VH) la tendencia promedio fue de 0.18 R^2 , esta combinación de polarizaciones si presentó una tendencia positiva más alta, sin embargo, sigue siendo de baja confiabilidad para generar un modelo predictivo del porcentaje de humedad del suelo debido a que el R^2 está muy lejos o cercano a 1.

RECOMENDACIONES

1. Seguir evaluando las tendencias entre la retrodispersión de las imágenes de radar SAR banda C de Sentinel 1 en áreas con menos vegetación, ya que este es un factor que limita la penetración de la señal en función de su longitud de onda.
2. Si se cuenta con un presupuesto mayor para las investigaciones futuras utilizar la banda L ya que esta tiene mayor capacidad de penetración de la señal de las microondas del radar en función de su longitud de onda, y es ideal para las condiciones del cultivo de caña de azúcar.
3. Para futuras investigaciones relacionadas con el tema de investigación estudiado si se tiene mayor presupuesto generar más puntos de muestreo, ya que los resultados obtenidos en la presente investigación fueron con un error de muestreo del 10 % y un 90 % de nivel de confianza. Si fuera posible se recomienda un error de muestreo mínimo de 5 % y un 95 % de confiabilidad.
4. En otros estudios posteriores hacer análisis con redes neuronales artificiales e integrar al análisis estadístico más variables como: precipitación, riego, evaporación, evapotranspiración, temperatura, tipo de variedad del cultivo, tipo de suelo, índices de vegetación de imágenes ópticas como NDVI, NDWI y clorofila, entre otros.

REFERENCIAS

1. Barrett, B. (7 de julio, 2009). *Soil moisture retrieval from active spaceborne microwave observations*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs1030210>
2. Campbell, J. (2011). *Introduction to remote sensing (5a ed.)*. New York: The Guilford Press. Doi: de 9781609181765
3. Chaparro, D. (2018). *Applications of L-band missions for environmental research*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/123115>
4. Chartuni, E. (abril 2007). Agricultura de precisión: nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. *Revista Palmas*. 26(2). Recuperado de: <http://repiica.iica.int/docs/B0483e/B0483e.pdf>.
5. Chen, J. (15 de mayo 2016). Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. pp. 3-21. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092427161500218X>
6. Copernicus. (2018). *Fundamentos de teledetección RADAR. Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea*. Bruselas, Bélgica. Autor.

7. Garkusha, I. (abril 2017). Using Sentinel-1 data for monitoring of soil moisture. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. (7), 1656–1659. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127291>.
8. Hachani, A. (17 de junio 2019). *Soil moisture retrieval from Sentinel-1 acquisitions in an arid environment in Tunisia: application of Artificial Neural Networks techniques*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1629503>.
9. Hernández, J. (junio 2016). Monitoreo de la humedad de suelo superficial a partir de observaciones satelitales de Microondas activas y pasivas. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León*. 25 (13) pp. 112-1160. Recuperado de: <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=6469>
10. Labrador, M. (20 de octubre 2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://gmrcanarias.com/wp-content/uploads/2020/10/20_catálogo_satélites_es.pdf
11. Mattikalli, N. (25 de noviembre 2010). Microwave remote sensing of soil moisture for estimation of profile soil property. *International Journal of Remote Sensing*. pp. 175-179. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/014311698215234>.
12. Moraes, E. (6 de junio 2002). *Fundamentos de Sensoriamento Remoto*. En *Sensoriamento Remoto*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://mtc->

m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_E
CMoraes.pdf.

13. Pasolli, L. (12 de marzo 2011). *Estimation of Soil Moisture in an Alpine Catchment with RADARSAT2*. Images. Recuperado de <https://doi.org/10.1155/2011/175473>.
14. Punithraj, G. (2020). *Surface Soil Moisture Retrieval Using C-Band Synthetic Aperture Radar (SAR) over Yanco Study Site, Australia—A Preliminary Study*. Estados Unidos: Springer. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-981-13-7067-0_8.
15. Romshoo, S. (septiembre 2002). C-band radar for soil moisture estimation under agricultural conditions. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (4), 2217–2219. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026499>
16. Samudio, M. (2019). *Estimación del contenido de humedad en el suelo mediante la combinación de imágenes radar (Sentinel-1) y ópticas (Sentinel-2) en la cuenca del Canal de Panamá*. (Tesis de maestría). Universidad de Alcalá. España. Recuperado de https://ebuah.uah.es/xmlui/bitstream/handle/10017/41938/TFM_Samudio_Sanchez_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
17. Şekertekin, A. (abril 2018). Soil Moisture Mapping Using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar Data. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 5(2), 178–188. Recuperado de <https://doi.org/10.30897/ijegeo.425606>

18. Shoshany, M. (abril 1998). ERS-2 SAR soil moisture and herbaceous biomass monitoring across a semi-arid transect in Israel. *Workshop Retrieval Bio- Geo-phys.* 455–459. Recuperado de https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/15494/7/ERS-2_SAR_Soil_Moisture_and_Herbaceous_Biomass_Mon.pdf
19. Solano, A. (agosto 2019). Agricultura y seguridad alimentaria. *Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático.* pp. 108–141. Recuperado de <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/1RepCCGuaCap6.pdf>
20. The European Space Agency. (s.f.). *Extra Wide Swath.* Sentinel-1 SAR. Recuperado de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/extra-wide-swath>
21. The European Space Agency. (s.f.). *Interferometric Wide Swath.* Sentinel-1 SAR. Recuperado de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>
22. The European Space Agency. (s.f.). *Stripmap.* Sentinel-1 SAR. Recuperado de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/stripmap>
23. The European Space Agency. (s.f.). *Wave.* Sentinel-1 SAR. Recuperado de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/wave>

24. The European Space Agency. (s.f.) *MSI Level-1C TOA Reflectance Product*. Sentinel-2. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-0-level-1c>
25. The European Space Agency. (s.f.). *Resolutions*. Sentinel-2 MSI. Recuperado de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions>
26. Yang, L. (22 de octubre 2018). Potential of soil moisture estimation using C-band polarimetric SAR data in arid regions. *International Journal of Remote Sensing*. pp.2138-2150. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1516320>

APÉNDICES

En color amarillo se presentan los 3 puntos de muestreo con mayor tendencia entre polarizaciones de cada retrodispersión versus el porcentaje de humedad.

Apéndice 1. Puntos con mayor tendencia entre polarizaciones por retrodispersión

Punto	Sigma0 VH db	Sigma0 VV db	Humedad (%)	R2 VV	R2 VH	R2 VV+VH	Punto	Sigma0 VH db	Sigma0 VV db	Humedad (%)	R2 VV	R2 VH	R2 VV+VH
1	-15	-10	15	0.0	0.0	0.04	35	-15	-8	20	0.0	0.0	0.32
2	-16	-10	12	0.0	0.4	0.15	36	-16	-10	13	0.1	0.0	0.16
3	-15	-10	16	0.1	0.0	0.12	37	-15	-9	15	0.0	0.0	0.06
4	-15	-10	21	0.2	0.0	0.01	38	-16	-10	15	0.0	0.3	0.05
5	-16	-9	16	0.0	0.0	0.05	39	-16	-11	20	0.1	0.1	0.00
6	-16	-9	20	0.0	0.0	0.07	40	-17	-9	23	0.1	0.1	0.03
7	-15	-9	25	0.1	0.2	0.37	41	-16	-10	16	0.3	0.0	0.23
8	-15	-9	19	0.4	0.2	0.18	42	-16	-10	21	0.0	0.0	0.54
9	-16	-8	20	0.1	0.1	0.00	43	-16	-10	22	0.1	0.1	0.51
10	-16	-9	14	0.1	0.0	0.10	44	-16	-9	22	0.1	0.3	0.34
11	-16	-10	22	0.0	0.0	0.31	45	-15	-10	14	0.0	0.1	0.16
12	-15	-10	24	0.1	0.1	0.74	46	-16	-9	24	0.0	0.0	0.48
13	-16	-10	21	0.1	0.0	0.15	47	-15	-8	19	0.0	0.0	0.27
14	-16	-9	18	0.1	0.0	0.58	48	-15	-9	19	0.2	0.0	0.18
15	-16	-10	20	0.0	0.0	0.07	49	-15	-10	24	0.0	0.0	0.18
16	-17	-10	17	0.4	0.5	0.43	50	-16	-10	22	0.7	0.2	0.00
17	-15	-10	26	0.2	0.0	0.10	51	-16	-9	20	0.4	0.2	0.41
18	-17	-10	12	0.0	0.4	0.03	52	-15	-9	25	0.0	0.0	0.62
19	-15	-9	21	0.0	0.1	0.04	53	-16	-10	26	0.0	0.0	0.08
20	-16	-10	20	0.0	0.0	0.00	54	-16	-10	25	0.4	0.6	0.39
21	-16	-10	10	0.0	0.2	0.41	55	-17	-11	20	0.0	0.0	0.34
22	-17	-11	18	0.0	0.1	0.00	56	-16	-9	17	0.1	0.2	0.10
23	-16	-10	16	0.1	0.1	0.13	57	-16	-9	17	0.0	0.1	0.04
24	-16	-10	23	0.1	0.0	0.05	58	-16	-10	22	0.0	0.1	0.39
25	-17	-10	15	0.1	0.1	0.00	59	-15	-9	26	0.4	0.0	0.02
26	-16	-11	19	0.1	0.3	0.01	60	-16	-10	23	0.0	0.0	0.43
27	-16	-9	19	0.1	0.0	0.06	61	-15	-9	27	0.1	0.1	0.06
28	-15	-10	15	0.3	0.2	0.25	62	-15	-9	23	0.0	0.0	0.50
29	-15	-11	19	0.1	0.0	0.08	63	-16	-9	15	0.0	0.0	0.01
30	-16	-10	15	0.3	0.0	0.10	64	-16	-9	26	0.0	0.1	0.01
31	-15	-10	16	0.1	0.0	0.01	65	-16	-10	26	0.1	0.0	0.00
32	-16	-11	24	0.1	0.1	0.06	66	-16	-10	24	0.1	0.1	0.16
33	-15	-9	22	0.1	0.3	0.01	67	-16	-9	24	0.0	0.0	0.04
34	-15	-9	22	0.0	0.1	0.17	PROMEDIO	-16	-10	19	0.10	0.11	0.14

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Estadística descriptiva del porcentaje de humedad del suelo en campo

% Humedad	
Media	19.84
Desviación estándar	4.02
Mínimo	10.25
Máximo	27.05
Cuenta	67

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Estadísticas descriptivas de análisis de correlación lineal simple entre las diferentes polarizaciones versus el porcentaje de humedad del suelo

R2 Polarizacion Vertical Vertical (VV) versus % de Humedad del suelo	
Media	0.10
Desviación estándar	0.13
Mínimo	0.00
Máximo	0.69
Cuenta	67.00

R2 Polarizacion Vertical Horizontal (VH) versus % de Humedad del suelo	
Media	0.10
Desviación estándar	0.13
Mínimo	0.00
Máximo	0.56
Cuenta	67.00

R2 Polarizacion Vertical Vertical + Vertical Horizontal (VV+VH) versus % de Humedad del suelo	
Media	0.18
Desviación estándar	0.19
Mínimo	0.00
Máximo	0.74
Cuenta	67.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Puntos con tendencias positivas mayores a 0.30 R2**

Polarizacion VV			Polarizacion VV+VH		
Punto	R2 VV	% HS	Punto	R2 VV+VH	% HS
50	0.69	22	12	0.74	24
54	0.44	25	52	0.62	25
16	0.41	17	14	0.58	18
59	0.36	26	42	0.54	21
51	0.35	20	43	0.51	22
8	0.35	19	62	0.50	23
41	0.31	16	46	0.48	24
			60	0.43	23
			16	0.43	17
			21	0.41	10
Polarizacion VH			51	0.41	20
Punto	R2 VH	% HS	58	0.39	22
54	0.56	25	54	0.39	25
16	0.50	17	7	0.37	25
2	0.44	12	44	0.34	22
18	0.38	12	55	0.34	20
44	0.34	22	35	0.32	20

Fuente: elaboración propia.