

**EVALUACIÓN DE UN MODELO DE ECUACIÓN INTEGRAL PARA ESTIMAR LA HUMEDAD DEL SUELO
USANDO DATOS DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA EN LA ZONA SUR DEL VALLE DEL RÍO CAUCA**

Presentado por:

Erika Alejandra Pulido Tabares

Código:1741943 - 3745

Lorena Rodriguez Cabrera

Código:1740460 - 3745

Director:

Aldemar Reyes Trujillo, Ph.D

Codirector:

Juan Pablo Rivera Caicedo, Ph.D

Programa Académico de Ingeniería Agrícola
Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente

Universidad del Valle (Sede Cali)

Diciembre de 2023



Resumen

El monitoreo de la humedad del suelo se considera un aspecto de gran importancia en el sector agrícola donde la demanda de agua es alta. Es por lo que la teledetección se destaca como una alternativa para estimar dicha variable mediante sensores remotos, superando así las limitaciones de los métodos in situ. En la presente investigación se propone emplear el modelo de ecuación integral (IEM) para estimar la humedad del suelo a partir de datos adquiridos por imágenes del Sentinel-1 en tres suertes ubicadas en el valle del río Cauca. Los resultados revelan correlaciones significativas, oscilando entre el 82% y el 98%, entre la humedad del suelo y el coeficiente de reflexión dieléctrica (RDC). En relación con la textura del suelo, se observa una correlación directa con el contenido de arcillas, en un rango del 13% al 44%, y una correlación inversa con el contenido de arenas, variando entre el 16% y el 44%. Se obtuvo un R^2 entre los datos de humedad del suelo generados por los modelos Hallikainen y Mironov de 99%, lo que indica una fuerte relación y una consistencia en la tendencia de los datos. Respecto a la precipitación se obtuvieron valores de correlación directa del 11% y 36% con valor de significancia que varía entre 0.17 a 0,69. En relación a la temperatura, se evidencia que la humedad promedio varía en función de la temperatura del suelo. Al disminuir a 20°C, la humedad varía de 0.37% a 0.91%, y al aumentar a 30°C, varía de 0.25% a 0.56%. Los coeficientes de variación sugieren una mayor variabilidad a 20°C que a 30°C en la humedad del suelo. Los resultados obtenidos revelan la sensibilidad del modelo de IEM ante cambios de textura y la preferencia de la aplicación de los modelos Hallikainen o Mironov en mayor proporción y poca sensibilidad ante cambios de temperatura del suelo y precipitación. Por lo cual se destaca que la metodología aplicada en este estudio supone una buena alternativa para analizar la variación de la humedad del suelo, especialmente en superficies extensas, permitiendo obtener datos con una gran rapidez.

Palabras clave: Sensores remotos, SAR, Sentinel 1, humedad del suelo, IEM, RDC, SNAP y variabilidad espacial.

Tabla de contenido

Introducción.....	7
Planteamiento del problema.....	9
Objetivos.....	10
Justificación.....	11
Marco teórico.....	13
Marco conceptual.....	13
Marco de contexto.....	16
Marco estudio de antecedentes.....	18
Metodología.....	23
Localización de la Zona de estudio.....	23
Técnicas e instrumentos.....	24
Desarrollo.....	28
Resultados y discusión.....	33
Base de datos.....	33
Influencia de la textura del suelo en la recuperación de la humedad.....	34
Influencia de la temperatura del suelo en la recuperación de la humedad.....	46
Influencia de los modelos Hallikainen y Mironov en la recuperación de la humedad.....	48
Relación entre la precipitación y la recuperación de la humedad del suelo.....	56
Variabilidad espacial de la zona de estudio a partir de semivariogramas.....	63
Conclusiones.....	70
Referencias.....	73

Listado de tablas

Tabla 1. Tabla de marco de estudios antecedentes.....	19
Tabla 2. Fechas de imágenes satelitales zona de estudio.....	26
Tabla 3. Características del satélite Sentinel-1.....	27
Tabla 4. Características de suelo hacienda Sevilla.....	28
Tabla 5. Características de suelo hacienda Holanda.....	29
Tabla 6. Características de suelo hacienda García Abajo Norte.....	29
Tabla 7. Porcentaje de área por textura de la suerte 003A Hacienda Sevilla.....	34
Tabla 8. Porcentaje de área por textura sintético de la suerte 003A Hacienda Sevilla.....	35
Tabla 9. Porcentaje de área por textura de la suerte 006 Hacienda Holanda.....	36
Tabla 10. Porcentaje de área por textura sintética de la suerte 006 Hacienda Holanda.....	36
Tabla 11. Porcentaje de área por textura suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.....	37
Tabla 12. Porcentaje de área por textura sintético suerte 008A Hacienda García Abajo Norte..	38
Tabla 13. Porcentaje de variación de humedad ante cambios de temperatura.....	47
Tabla 14. Coeficiente de variación de humedad ante cambios de temperatura.....	47

Listado de figuras

Figura 1. Diagrama de barras: Número de investigaciones de SAR distribuidas por países..	22
Figura 2. Gráfica de número de investigaciones de SAR en Colombia distribuidas por año..	22
Figura 3. Ubicación del sitio de estudio. Se marcan las áreas utilizadas para la determinación de la humedad del suelo: Hacienda Sevilla suerte 003A (color morado) Hacienda Holanda Naranjo surte 006 (Color rojo), y la Hacienda García Abajo Norte suerte 008A (color verde).....	23
Figura 4. Flujograma preprocesamiento imágenes satelitales.....	30
Figura 5. Flujograma procesamiento imágenes satelitales.....	31
Figura 6. Mapa textural de la suerte 003A Hacienda Sevilla.....	35
Figura 7. Mapa textural sintético de la suerte 003A Hacienda Sevilla.....	35
Figura 8. Mapa textural de la suerte 006 Hacienda Holanda.....	36
Figura 9. Mapa textural sintético de la suerte 006 Hacienda Holanda.....	37
Figura 10. Mapa textural de la suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.....	38
Figura 11. Mapa textural sintético de la suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.....	38
Figura 12. Humedad promedio modelo Hallikainen original y sintético.....	39
Figura 13. Mapa día de menor humedad Hacienda Sevilla.....	40
Figura 14. Mapa día de menor humedad Hacienda Holanda.....	41
Figura 15. Mapa día de menor humedad Hacienda García Abajo Norte.....	41
Figura 16. Mapa día de mayor humedad Hacienda Sevilla.....	42
Figura 17. Mapa día de mayor humedad Hacienda Holanda.....	42
Figura 18. Mapa día de mayor humedad Hacienda García Abajo Norte.....	43
Figura 19. Matriz de correlación modelo de Hallikainen Original y Sintético Hacienda Sevilla.....	44
Figura 20. Matriz de correlación modelo de Hallikainen Original y Sintético Hacienda Holanda.....	45
Figura 21. Matriz de correlación modelo de Hallikainen Original y Sintético Hacienda García Abajo Norte.....	45
Figura 22. Humedad promedio modelo Minorov ante cambios de temperatura.....	47
Figura 23. El índice de refracción vs la temperatura de la muestra de suelo para varios niveles de humedad a una frecuencia de $f = 1.39$ GHz.....	48
Figura 24. Humedad promedio de los modelos Hallikainen y Minorov para las diferentes haciendas y sus respectivos ciclos del cultivo.....	50
Figura 25. Mapa día de menor humedad Hacienda Sevilla.....	51
Figura 26. Mapa día de menor humedad Hacienda Holanda.....	52
Figura 27. Mapa día de menor humedad Hacienda García.....	52
Figura 28. Mapa día de mayor humedad Hacienda Sevilla.....	53
Figura 29. Mapa día de mayor humedad Hacienda Holanda.....	53
Figura 30. Mapa día de mayor humedad Hacienda García.....	54
Figura 31. Coeficiente de determinación para los valores de humedad del suelo obtenidos por los modelos de mironov y hallikainen de la Hacienda Sevilla.....	55
Figura 32. Coeficiente de determinación para los valores de humedad del suelo	

obtenidos por los modelos de mironov y hallikainen de la Hacienda Holanda.....	55
Figura 33. Coeficiente de determinación para los valores de humedad del suelo obtenidos por los modelos de mironov y hallikainen de la Hacienda García Abajo Norte....	56
Figura 34. Variaciones temporales en las mediciones de la precipitación del suelo y estimaciones de la humedad del suelo en las suertes de estudio.....	58
Figura 35. Mapa período seco y húmedo para la Hacienda Sevilla.....	59
Figura 36. Mapa período seco y húmedo para la Hacienda Holanda.....	59
Figura 37. Mapa período seco y húmedo para la Hacienda Holanda.....	60
Figura 38. Matriz de correlación humedad del suelo y precipitación para la Hacienda Sevilla.....	62
Figura 39. Matriz de correlación humedad del suelo y precipitación para la Hacienda Holanda.....	62
Figura 40. Matriz de correlación humedad del suelo y precipitación para la Hacienda García Abajo Norte.....	63
Figura 41. Semivariogramas de la humedad del suelo Hacienda Sevilla.....	65
Figura 42. Semivariogramas de la humedad del suelo Hacienda Holanda.....	66
Figura 43. Semivariogramas de la humedad del suelo Hacienda García Abajo Norte.....	67
Figura 44. Mapas de HS con menor y mayor variabilidad espacial en Hacienda Sevilla...	68
Figura 45. Mapas de HS con menor y mayor variabilidad espacial en Hacienda Holanda Naranjo.....	69
Figura 46. Mapas de HS con menor y mayor variabilidad espacial en Hacienda García Abajo Norte.....	70

Introducción

La humedad superficial del suelo (HS) es una variable que juega un papel crucial en diversos procesos que se dan en la interfaz suelo-atmósfera (Álvarez & Mozos et al., 2005). La HS cumple un papel clave en el ciclo del agua continental, y es un parámetro que caracteriza la manera en que el riego/precipitación se distribuyen entre los tres procesos principales: escorrentía, infiltración y evapotranspiración (Koster et al., 2004). También es un parámetro muy importante para el riego, la gestión y la optimización de las necesidades hídricas de los cultivos (Fieuzal et al., 2011).

Cuando el contenido de humedad del suelo superficial necesita ser evaluado, las mediciones in situ a menudo se llevan a cabo sobre una pequeña área. Sin embargo, estas mediciones son costosas y teniendo en cuenta que estos métodos son localizados, se deben tomar varias muestras para obtener resultados relevantes, especialmente en contextos donde el contenido de agua del suelo puede tener una alta variabilidad debido a heterogeneidades en precipitación, riego, textura del suelo, etc (Foucras et al., 2020).

La teledetección es una forma de medición y observación a distancia que se realiza mediante sensores que permiten el escaneo o grabación a tiempo real, pueden ser espectrorradiómetros o radares de apertura sintética. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque no exista un contacto material, haya interacción entre los objetos de los que se quiere obtener información y el sensor que recoge dicha información. En este caso esa interacción es un flujo de radiación electromagnética (Chuvienco, 2006).

La teledetección supone una buena alternativa para determinar la HS, especialmente cuando se requiere estimar superficies extensas, frente a los métodos in-situ (Martínez et al., 2005). Aunque las medidas in-situ son precisas, llevar a cabo un estudio a largo plazo mediante estos métodos resulta inviable (Brocca et al., 2012), debido a que requieren mucho tiempo, generan costos por el análisis de muestras individuales y proporcionan información sólo en los puntos seleccionados. Por este motivo ha aumentado el uso de técnicas de teledetección para estimar la HS en las últimas décadas (Brocca et al., 2012).

Existen diferentes tipos de sensores remotos que se han utilizado en plataformas aéreas o espaciales para la estimación de la humedad del suelo (u otras propiedades de dispersión del suelo). Las dos opciones más comunes de estimación son a partir de la energía retrodispersada y de la energía emitida por el suelo en el rango de las microondas. Los sensores que miden esta energía se pueden clasificar a la vez como sensores activos o pasivos (Gomes et. al., 2019). La teledetección pasiva por microondas se realiza mediante un instrumento denominado radiómetro de microondas y se basa en un concepto similar a la teledetección térmica. Un radiómetro de microondas detecta la energía electromagnética proveniente de la radiación térmica de los cuerpos; así como la relación

entre dicha radiación y los procesos biofísicos de estos. (Acevedo, 2011). Algunos de los sensores pasivos más usados son: SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) que tiene como objetivo la obtención de mapas de humedad y salinidad del suelo a una escala global; SMAP (Soil Moisture Active and Passive) que pretende obtener mapas de humedad de suelo y el estado de la congelación/descongelación de los casquetes polares de las capas de hielo continentales a una escala global y por último PMR (Passive Microwave Radiometry), un sensor aerotransportado que permite generar mapas de humedad del suelo detallados. En la teledetección activa, los radares de apertura sintética (SAR), comparten la capacidad de atravesar las nubes sin sufrir alteración, y tampoco se ven influidos por la radiación solar. En lugar de recibir la radiación emitida por la superficie, emiten un pulso de radiación, recogiendo la señal que vuelve después de rebotar en la superficie; este fenómeno se conoce como retrodispersión (Barrett et al., 2009).

Los radares no determinan directamente la humedad del suelo, estos miden la señal de retrodispersión que el suelo refleja, la cual está estrechamente relacionada con la constante dieléctrica del suelo y está a su vez con el contenido de HS. Por medio de modelos se puede estimar la constante dieléctrica a partir de la retrodispersión medida por el sensor y con base a la constante dieléctrica estimar la HS. Fun y Chen (1992) desarrollaron un modelo físico denominado modelo de ecuación integral (IEM) y se considera uno de los modelos más usados para invertir el coeficiente de retrodispersión. El modelo de ecuación integral abarca los modelos de Kirchhoff y de pequeña perturbación en las regiones de alta y baja frecuencia, respectivamente. Por lo tanto, es capaz de abordar una amplia gama de estados de rugosidad del suelo, con una expresión fácil de calcular. El IEM calcula la retrodispersión de un suelo desnudo o con baja densidad de vegetación, dadas las propiedades del radar (longitud de onda, polarización), las características de la superficie (constante dieléctrica y rugosidad de la superficie) y el ángulo de incidencia local (Verhoest et al., 2008).

Para llevar a cabo esta investigación se plantea aplicar el modelo de ecuación integral (IEM), este modelo permitirá recuperar la humedad del suelo a partir de datos obtenidos de las imágenes de Sentinel-1, que se encuentran recolectados en la plataforma Copernicus Open Access Hub, esta plataforma es de acceso libre y es facilitada por la agencia espacial europea (ESA). La investigación se llevará a cabo en una zona con suelos agrícolas, ubicados en el valle del río Cauca.

Planteamiento del problema

La actividad agroindustrial del sector azucarero en Colombia se encuentra principalmente en el Valle del río Cauca, el cual abarca 51 municipios desde el norte del departamento del Cauca, Valle del Cauca, suroccidente del Quindío, y suroccidente de Risaralda, donde el área cosechada de caña de azúcar es de 196.907 hectáreas, el 75% de la tierra en caña de azúcar pertenece a 2.750 proveedores y el restante a 14 ingenios. Las condiciones hidroclimáticas permiten que la caña de azúcar sea cultivada durante todos los meses del año y los avances tecnológicos realizados por el Centro de Investigación de la Caña (Cenicaña) han llevado a la región a especializarse en el cultivo y ser líder productiva a nivel mundial. En el 2022 se produjeron en promedio 117,8 toneladas de caña por hectárea, 12,3 toneladas de azúcar por hectárea y 347 millones de litros de bioetanol a partir del bagazo, donde se generaron 1,745 GWh de energía (Asocaña, 2023).

El contenido de humedad en el suelo es un factor determinante para la productividad de los cultivos, dado que esta variable permite resolver problemas relacionados a la necesidad de agua de riego, consideraciones ambientales y determinación de excedentes hídricos (Reyna et al., 2011). El exceso de humedad en el suelo genera dificultad en la respiración de las raíces de las plantas, la mineralización del nitrógeno y absorción de agua y nutrientes, ya que se disminuye el contenido de oxígeno, lo que a su vez también produce problemas en el desarrollo vegetativo de las plantas y la disminución de la productividad de los cultivos (Torres et al., 2004). De la misma forma, el déficit de humedad en el suelo impide que los cultivos alcancen su máxima productividad, dado que el agua afecta la forma química en que los nutrientes se encuentran en el suelo, y se disminuye la posibilidad de que las raíces encuentren los nutrientes en cantidades suficientes (Muñoz, 2009).

En el caso del cultivo de caña de azúcar el exceso de humedad provoca hasta un 40% en la disminución de la producción, ya que afecta el rebrote y el macollamiento de la plantación (Cenicaña, 2015), también este exceso de humedad facilita la invasión de los rebrotes de la planta por hongo, lo que puede llegar a causar la muerte de estas. Por otra parte, la relación del contenido de humedad del suelo, influye directamente de la producción de sacarosa en la caña de azúcar, en suelos donde la humedad es baja, la acumulación de sacarosa aumenta y cuando la humedad incrementa, se estimula el crecimiento de los tallos, lo cual influye en un gasto energético para la planta, generando así la disminución de sacarosa (Cenicaña, 2018). En condiciones de baja humedad del suelo, el desarrollo de la planta se retarda, disminuyendo la demanda de azúcares, las cuales se almacenan en el tallo, por ende cuando aumenta el contenido de humedad se puede reiniciar el desarrollo vegetativo, lo que afecta negativamente a la calidad de los jugos. La germinación de las semillas de dicho cultivo, también se ve afectada por la humedad del suelo, ya que los encharcamientos

prolongados ocasionan pérdidas en la germinación, lo que conlleva a realizar labores de resiembra, ocasionando mayores costos en la producción (Cenicaña, 1995).

El riego es una labor indispensable para mantener un contenido de humedad óptimo en el desarrollo del cultivo, esta labor representa un costo tanto económico como ambiental, debido a que el incremento en la demanda del agua para el sector azucarero aumenta considerablemente, lo que genera impactos en la dinámica del consumo del agua, generando una huella hídrica por parte de este sector. El uso de este recurso también repercute en el ámbito social, ya que el uso del agua en el sector cañero compite con otros sectores como el consumo humano, lo cual genera conflictos por el uso del agua, que pueden complicarse en condiciones de sequía, ya que estas condiciones pueden causar escasez del recurso, lo que se traduce en pérdidas económicas y racionamiento del agua (Restrepo & Bedoya, 2015).

Una forma de hacer uso racional y sostenible de este recurso por parte de las industrias cañeras, es el monitoreo de la humedad del suelo, ya que permite determinar la demanda hídrica del cultivo y el momento oportuno para regar. Para determinar esta variable se utilizan diversos métodos e instrumentos, los cuales se pueden dividir en directos e indirectos, dentro de estos se encuentran el método gravimétrico, método de resistencia eléctrica, métodos dieléctricos, entre otros. En la industria de la caña de azúcar, los métodos más utilizados son la apreciación al tacto de la humedad del suelo, las mediciones del potencial mátrico a partir de tensiómetros y el uso de bloques de resistencia eléctrica, donde se emplean equipos como el TDR (Time Domain Reflectometer), el FDM (Frequency Domain Meter) (Cenicaña, 1995). Adicionalmente, en los últimos años se ha empleado el uso de sensores que permiten medir la fuerza con la cual el suelo retiene el agua (Cenicaña, 2018). Sin embargo, independientemente del método aplicado, en cada caso es indispensable determinar la humedad del suelo en diversos puntos de la zona de estudio, debido a que ninguno de estos métodos permite la captación de la variabilidad espacial del contenido de humedad presente en el suelo. Con esto surge la necesidad de llevar a cabo un método que permita obtener mediciones que contengan información integrada con el área de estudio y el contenido de humedad de manera más eficiente en suelos destinados para el cultivo de caña de azúcar.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar un modelo de ecuación integral para estimar la humedad de suelo usando datos de radar de apertura sintética en la zona sur del valle del río Cauca.

Objetivos específicos

- Consolidar una base de datos del satélite Sentinel-1 para el periodo 2017 - 2021 para dos condiciones de textura de suelos cultivados con caña de azúcar.
- Determinar la sensibilidad del modelo de ecuación integral para estimar la humedad de las dos condiciones de suelos utilizando la herramienta computacional SNAP.
- Caracterizar la variabilidad espacial del contenido de humedad del suelo en la zona de estudio mediante semivariogramas.

Justificación

La agroindustria azucarera en el Valle del Cauca se caracteriza desde hace más de 100 años por aportar a la economía de la región, con el 2,8 % PIB en el sector agrícola en el año 2022 a nivel nacional (Asocaña, 2022). Esta productividad también permite la generación de 286.000 empleos entre directos e indirectos, lo cual contribuye a la reactivación económica del país. El sector azucarero se encuentra vinculado a la actividad panelera, fuente de 350.000 empleos que benefician a 636.000 familias. La industria de la caña genera además un impacto importante en la sociedad, donde se crean acciones sociales y ambientales, entre las que se destacan el mejoramiento de vías rurales, proyectos educativos y conservación del medio ambiente, con el fin de aportar al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del área de influencia del sector (Asocaña, 2023).

Monitorear el contenido de humedad del suelo, resulta esencial para optimizar la producción, conservar el agua, reducir impactos ambientales y ahorrar costos. Conocer esta variable también permite la toma de decisiones acertadas en cuanto a la programación de riego y evitar pérdidas de agua excesivas por percolación y/o escurrimiento o bien para evitar aplicar una cantidad insuficiente de agua (Enciso, et al., 2012), así como la planeación oportuna de labores de preparación del suelo para no generar procesos de degradación. El uso del agua de las fuentes hídricas tiene un impacto social y ambiental crítico, por lo tanto los sectores que demandan la mayor cantidad de dicho recurso tienen como objeto de estudio la optimización del uso del agua. La humedad superficial del suelo es crucial para estudios de cambio climático, balances hídricos y productividad en el sector agrícola (Sanchez, 2015).

El continuo crecimiento del sector azucarero en el valle del río Cauca ocasiona un aumento en la demanda hídrica y labores de preparación, dado que estos son factores fundamentales para el crecimiento adecuado y productividad en los cultivos, es por esto que en este sector se desarrollan diferentes alternativas tecnológicas para mejorar las condiciones edáficas, con el fin de monitorear el

contenido de agua de manera eficiente, y a la vez se busca que estas tecnologías contribuyan en la reducción de impactos ambientales negativos para el suelo y los recursos hídricos, así como la inclusión de tecnologías que permitan dar un valor agregado al proceso productivo del cultivo de caña (Arango, 2020).

Las tecnologías de sensoramiento remoto en el rango de las microondas se han destacado por tener el potencial de detectar y monitorear cambios relativos al contenido de humedad de una superficie a tiempos regulares y en condiciones independientes del clima y la luz solar, una de esas tecnologías es el Radar de Apertura Sintética (SAR), cuya estimación de humedad del suelo depende de diversos factores que contribuyen a la señal de retorno al sensor, como la constante dieléctrica del suelo “ ϵ ”, la rugosidad superficial, la textura del suelo, la topografía, y principalmente la presencia de vegetación que afecta la retrodispersión de microondas capturadas por el sensor (Solorza, 2013). La sensibilidad de estos sensores al contenido de humedad del suelo se ha demostrado con numerosos estudios, además, se han llevado a cabo experimentos en campo a gran escala, donde se relaciona la variabilidad espacial y la cobertura vegetal con las mediciones de microondas por satélite (Barrett et al., 2009). Los sensores SAR usados para el monitoreo del suelo, tienen la ventaja de realizar estimaciones rápidas, precisas y económicas, constituyéndose como una alternativa tecnológica para mejorar las condiciones de operación del cultivo, comparada con los métodos convencionales (Arango, 2020). Estas nuevas tecnologías brindan a los agricultores información precisa sobre uno de los factores más importantes en la agricultura como lo es la humedad del suelo, no solo porque las plantas requieren agua para crecer, sino también porque es necesario conocer su valor antes, durante y después de la temporada de crecimiento, para gestionar diferentes labores de campo. Esta información aumentará la habilidad para conocer los pronósticos de rendimiento de cultivos y de esta manera poder prevenir afectaciones en el crecimiento de las plantas y la productividad agrícola.

En la actualidad las constelaciones satelitales comerciales han aumentado la cantidad de satélites que permiten obtener información oportuna y continua de todo el planeta, con el objetivo de adquirir datos y satisfacer las demandas de imágenes satelitales. Este aumento continuo ha mejorado la temporalidad de las imágenes, y cada vez los sensores tienen mayor sensibilidad para captar información de la Tierra. El uso de estas imágenes en el sector azucarero colombiano puede beneficiarse considerablemente para hacer seguimientos a factores de estrés y predicciones de producción más precisas (Murillo, et al., 2012).

Marco teórico

Marco conceptual

Radar de apertura sintética (SAR): es un radar capaz de generar imágenes de alta resolución desde distancias largas, como el espacio. Este radar tiene la característica de emitir señales en direcciones laterales, lo que le permite captar diferentes objetos terrestres en momentos distintos y discriminar entre ellos. Además, crean líneas de imagen a través de sus pulsos laterales, mientras que otra dimensión de la imagen se forma mediante el movimiento del sensor, el cual emite y recibe pulsos de radar continuamente. Lo cual posibilita obtener información detallada sobre los objetos en la Tierra a partir de las señales reflejadas.

Sentinel - 1: es una misión espacial de la Agencia Espacial Europea (ESA) que comprende una constelación de dos satélites (Sentinel-1A y Sentinel-1B), estos satélites operan las 24 horas del día, con el propósito de generar imágenes en banda C las cuales entregan información de la superficie sin importar las condiciones climáticas. Las imágenes de sentinel-1 proporcionan una rápida difusión de datos, los cuales permiten el desarrollo de diferentes aplicaciones, como es monitoreo terrestre, marino y servicios de emergencia (ESA, s.f.), sin embargo, a diferencia de las imágenes satelitales en la región del óptico las cuales se pueden interpretar directamente, estas imágenes requieren un procesamiento previo para realizar una correcta interpretación.

A lo largo de esta sección se describen las principales características que comprenden estos satélites, además se exponen los fundamentos teóricos para la corrección, procesamiento e interpretación de las imágenes SAR.

Banda C: es un rango del espectro electromagnético que se encuentra en la región de las microondas, la cual tiene una longitud de onda de 3,8 - 7,5 cm y una frecuencia de 3,7 - 4,2 GHz y 5,9 - 6,4 GHz, donde el primer rango de frecuencias es el más usado por los satélites.

Retrodispersión: Es la fracción de energía que se transmite, la cual se refleja al radar nuevamente. El coeficiente de retrodispersión describe la magnitud de energía retrodispersada comparada con la energía del campo incidente.

$$\sigma^0 = \frac{\Sigma \sigma_n}{A}$$

Donde:

σ^0 = sección eficaz del radar por unidad de área (Coeficiente de retrodispersión).

σ_n = suma de las secciones eficaces individuales.

A = área iluminada por el sensor.

Polarización: Al medir la señal retrodispersada, el radar registra la energía electromagnética que presenta una polarización. Los SAR generalmente transmiten ondas planas polarizadas, donde se tienen diferentes esquemas de polarización. Si la señal es emitida tiene una polarización horizontal (H) y mide la fracción de la polarización vertical (V) de la onda retrodispersada, la cual se representa como polarización HV. De esta misma forma, se pueden dar las polarizaciones VH, HH y VV.

Ángulo de incidencia: ángulo que se refleja en la superficie, donde su punto de referencia es la recta perpendicular a la superficie. Cuando este ángulo disminuye, la magnitud de la señal retrodispersada generalmente aumenta.

Constante dieléctrica real (RDC): Hace referencia a la reflectividad y conductividad de la superficie, este indicador influye directamente en la señal retrodispersada. Describe las propiedades asociadas a la humedad del suelo, dependiendo del contenido de humedad en el este. La constante dieléctrica real está representada por un número complejo adimensional, que queda expresado por la ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

Donde ε' es la parte real y $i\varepsilon''$ es la parte imaginaria.

Corrección radiométrica: La calibración radiométrica se realiza con el objetivo de obtener valores de retrodispersión sigma ajustados. Esta calibración se asocia a la respuesta de retrodispersión causado por el efecto topográfico del terreno. La calibración radiométrica se aplica mediante la siguiente ecuación:

$$value(i) = \frac{|DN|^2}{A_i^2}$$

Donde:

$value(i)$ = coeficiente de retrodispersión que se requiere ajustar, ya sea β^0 (Beta), σ^0 (Sigma), γ^0 (Gamma) o DN (Digital Number).

A = área iluminada por el sensor, la cual también depende del coeficiente que se requiere ajustar.

Corrección geométrica: La geometría de la adquisición de las imágenes SAR causan distorsiones geométricas, donde el factor principal es la topografía del terreno. La corrección geométrica se basa en encontrar el ángulo de inclinación y las coordenadas azimut de las imágenes SAR. El modelo matemático de esta corrección es el siguiente:

$$A = \frac{azr}{\cos \psi}$$

Donde:

az : azimut del pixel espaciado (m)

r : inclinación del pixel espaciado (m)

ψ : Ángulo de proyección

Modelo de ecuación integral multiángulo: consiste en la obtención de la constante dieléctrica real (RDC) del suelo, mediante la retrodispersión del radar y el dieléctrico del suelo. La inversión del modelo se logra mediante el uso de una tabla de búsqueda (LUT). Para abordar la posibilidad de múltiples raíces en la inversión del modelo, se adopta un enfoque iterativo. La primera pasada produce el valor RDC más cercano en cada píxel. En el segundo paso, se deriva un valor RDC representativo del primer paso (se utiliza la media) a partir de una vecindad cuadrada centrada en el píxel (excluyendo el centro). Este valor representativo se compara con el valor RDC de primer paso del propio píxel. Si se desvía demasiado de sus vecinos, se le considera un valor atípico. Para cada valor atípico, el valor RDC con la menor desviación entre los n coeficientes de retrodispersión más cercanos del LUT se utiliza para reemplazar el valor del primer paso. Si no existe dicho valor RDC o la desviación sigue siendo demasiado alta, entonces el valor RDC se filtra opcionalmente reemplazándolo con el valor representativo (SNAP (9.0.0), 2022)

Modelo Hallikainen: este modelo calcula la humedad del suelo a partir del RDC más los porcentajes de arena y arcilla.

$$\varepsilon_s = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)SM + (c_0 + c_1S + c_2C)SM^2$$

Donde:

S : % arenas

C : % arcillas

SM : Humedad del suelo

a , b , c : Coeficientes propuestos en el modelo de Hallikainen et al. (1985) para el cálculo de la constante dieléctrica a diferentes frecuencias.

Modelo Minorov: para el cálculo de la humedad del suelo se relaciona la constante dieléctrica real (ε') y los factores de pérdida del suelo húmedo (ε'') como funciones de la humedad volumétrica (mv), se pueden expresar:

$$\varepsilon' = n^2 - k^2, \varepsilon'' = 2nk$$

$$n = \{n_d + (n_b - 1) m_v, \quad m_v \leq m_t\}$$

$$n = \{n_d + (n_b - 1) m_t + (n_u - 1) (m_v - m_t), \quad m_v \geq m_t\}$$

$$k = \{k_d + n_b m_v, \quad m_v \leq m_t\}$$

$$k = \{k_d + k_b m_t + n_u (m_v - m_t), \quad m_v \geq m_t\}$$

Donde:

n, nd, nb, nu y k, kd, kb, ku: Valores de índice de refracción y coeficiente de atenuación normalizado para suelo seco, agua ligada y agua libre del suelo.

mt: Valor de la fracción máxima de agua ligada para un tipo dado de suelo.

Semivariograma: El semivariograma, también conocido como variograma, es una herramienta fundamental en geoestadística para estudiar la variabilidad espacial de una propiedad o fenómeno en el espacio, como la temperatura, la contaminación, la elevación del terreno, entre otros. El semivariograma calcula la semivarianza entre pares de puntos en función de la distancia y la dirección entre ellos. La semivarianza es una medida de cuánto varían dos valores de la variable cuando la distancia entre sus ubicaciones aumenta. Si dos puntos están muy cercanos, es probable que tengan valores muy similares. A medida que la distancia entre los puntos aumenta, la diferencia entre los valores también puede aumentar. (Díaz, 2002)

Los parámetros de análisis del semivariograma se describen a continuación:

- Rango: Es la distancia a la cual el semivariograma alcanza un valor constante, conocido como el sill. Más allá de este rango, la autocorrelación espacial entre las observaciones se considera insignificante o nula.
- Sill (Sill): Es el valor máximo del semivariograma, que representa la máxima variabilidad espacial entre las observaciones. Este es el punto de estabilización del semivariograma donde la autocorrelación espacial ha alcanzado su máximo.
- Nugget (Nugget): Es el valor del semivariograma en una distancia cercana a cero (o en el origen), que representa la variabilidad espacial a una escala menor que la distancia mínima de muestreo. El nugget puede ser debido a la variabilidad intrínseca en el proceso o a errores de medición.

Marco de contexto

La agricultura proporciona a la humanidad alimentos, fibras, combustible y materias primas que son fundamentales para el sustento humano. Hoy en día, este papel debe cumplirse en un contexto de sostenibilidad ambiental y cambio climático, combinado con un tamaño de población

humana sin precedentes y aún en crecimiento, mientras se mantiene la viabilidad de las actividades agrícolas para garantizar tanto la subsistencia como los medios de vida (Weiss, et al., 2020).

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es una planta de gran importancia en la economía de muchas regiones del mundo, por su versatilidad y capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales (CONADESUCA, 2015). La caña de azúcar es conocida a nivel mundial como una especie vegetal que posee características favorables para la explotación industrial (azúcar), como también semi industrial y artesanal (panela) (Forero & Sánchez, 2016). En el mundo, tan solo 25 países producen panela, y Colombia es el segundo mayor productor de panela a nivel mundial al producir 1,2 millones de toneladas anuales. Colombia exportó más de 12.300 toneladas de panela en el 2020, siendo EE.UU. su principal aliado desde que iniciaron las ventas al exterior (MADR, 2021). En Colombia, el conglomerado de la caña de azúcar se configura alrededor de 14 fábricas que producen azúcar, 6 de ellas que tienen plantas de producción de bioetanol y 11 de ellas que cogeneran energía eléctrica a partir del bagazo que producen 243 mil hectáreas sembradas actualmente en caña de azúcar en el valle del río Cauca.

De todos los recursos que las especies vegetales necesitan para crecer y desarrollarse, el agua es uno de los factores más importantes. Estudios realizados por Cenicaña indican que los requerimientos hídricos en la zona cañicultora del valle del río Cauca, para un ciclo de cultivo de 13 meses, oscilan entre 10,000 y 14,000 m^3 por hectárea, por lo tanto la disponibilidad de agua es un factor limitante en el desarrollo de la planta, por el gran volumen que una planta debe absorber durante todo su ciclo vegetativo. No obstante, las plantas sólo conservan aproximadamente el 3% del volumen total del agua que absorben, cantidad que usan en la fotosíntesis y otros procesos metabólicos. El 97% del agua restante, cuya principal función es el transporte de nutrimentos disueltos a través de la planta, asciende desde la raíz hasta la superficie de las hojas, donde se pierde por transpiración (Muñoz, 2009).

Entre los desafíos del sector agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, se encuentra el desarrollo de alternativas tecnológicas para mejorar las condiciones edáficas, al tiempo que mitiguen los impactos ambientales sobre el suelo y los recursos hídricos (Sanclemente et al, 2015). Lo anterior conlleva a la necesidad de realizar un monitoreo de la humedad del suelo más 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 (Arango, 2020).

Los orígenes históricos de la teledetección se hallan íntimamente vinculados al desarrollo tanto de la tecnología fotográfica como de la aviación y de la industria aeroespacial. Las primeras fotografías aéreas fueron tomadas desde un globo aerostático por el aeronauta Gaspar Tournachon sobre la ciudad de París en 1858, fue en las Guerras Mundiales del siglo XX donde la disciplina se sistematiza y consolida a partir del uso militar de la fotografía aérea, lo que a su vez dió impulso al uso de estas con fines cartográficos y/o topográficos (Leo, 2015).

Durante la década de los cincuenta, los sistemas de teledetección continuaron evolucionando a partir de los métodos desarrollados por el esfuerzo de guerra. La fotografía de color infrarrojo, originalmente desarrollada como una herramienta de reconocimiento militar demostró ser muy útil para los estudios de cultivos y vegetación, también para el reconocimiento y clasificación de cubiertas vegetales, así como la detección de plagas y enfermedades mediante fotografías aéreas (Reuter, 2009). Hacia el final de la década de los cincuenta y como consecuencia de una serie de mejoras técnicas, se desarrolló un sistema que permitió formar imágenes de alta resolución de la superficie denominado SAR (radar de apertura sintética) (Reuter, 2009). Estas mejoras permitieron que a principios de los años setenta del siglo XX, se aplicará la teledetección principalmente a la agricultura, de esta manera creció el interés en la investigación de la estimación de la humedad del suelo con sensores remotos mediante el empleo de microondas.

En los últimos años se ha avanzado considerablemente en la investigación sobre dispositivos para la medición de la humedad del suelo, habiendo conseguido un notable incremento en la precisión y en la versatilidad y a la vez una reducción en los costos. Cada vez se dispone de un mayor número de estaciones y redes permanentes de medición, algunas de ellas ya con series de observaciones de larga duración (Dorigo et al., 2011).

Las tecnologías y productos de sensores remotos han sido utilizados en el país desde hace más de cuatro décadas, especialmente en proyectos relacionados con la gestión ambiental. Los estudios realizados indican que su uso se ha difundido de manera amplia tanto en las entidades del estado, como en la empresa privada para un gran número de aplicaciones. Dentro de sus usos, cabe resaltar el empleo de estos sensores a la generación de cartografía básica, las aplicaciones en catastro, hidrografía, monitoreo de cultivos, silvicultura, geología y suelos, oceanografía y costas, desastres naturales, inteligencia y defensa, atmósfera y clima. En el sector estatal ambiental, por ejemplo, las Corporaciones Autónomas Regionales emplean los productos de los sensores remotos para el diagnóstico, control y seguimiento de fenómenos naturales con el fin de promover la conservación de los ecosistemas en cada una de sus regiones, para lo cual utilizan imágenes satelitales de mediana resolución espacial, pero con una buena resolución radiométrica. En el sector privado, por su parte, las empresas emplean los sistemas de observación de la Tierra, por ejemplo

para la exploración y explotación de recursos mineros, empleando tecnologías de teledetección tanto activa como pasiva. En este sentido, la utilización de los sensores remotos se convierte en herramientas indispensables para la formulación de políticas y la toma de decisiones en temas tan importantes como el desarrollo de infraestructura y sistemas productivos, el ordenamiento territorial, la gestión del riesgo, la gestión ambiental y la mitigación y adaptación al cambio climático, entre otros (Daza, 2017).

Marco estudio de antecedentes

En los últimos 30 años, la teledetección de radares de apertura sintética (SAR) ha demostrado su considerable potencial para la estimación de la humedad del suelo (HS) a altas resoluciones espaciales (Foucras et al., 2020). El uso de datos SAR ha surgido como alternativa para cuantificar dicha variable, ya que los pulsos electromagnéticos transmitidos son capaces de penetrar las nubes, mientras brindan una cobertura espacial. La respuesta del radar se mide en términos del coeficiente de retrodispersión, el cual depende principalmente de la constante dieléctrica del suelo y la rugosidad de la superficie (Bindlish., et al, 2000). Específicamente en suelos desnudos la inversión de HS se ve afectada directamente por la rugosidad de la superficie del suelo, por lo cual la parametrización de esta variable, se ha convertido en la principal fuente de error, ya que influye en la precisión de la HS (Zhang, 2020). Otros factores como el ángulo de incidencia, la onda de propagación SAR, el mecanismo de retrodispersión, la atenuación de la vegetación, el modo de polarización, entre otros, se consideran importantes para la recuperación de la humedad del suelo (Gharechelou., et al. 2021). Es por ello que a lo largo del tiempo se han desarrollado diversos modelos que permiten determinar la relación entre la señal del radar y ciertos parámetros biofísicos, donde se ha estudiado el efecto que tienen estos para la obtención de la humedad del suelo (Barrett et al., 2009)

A continuación en la tabla 1, se describen algunos de los estudios más relevantes que se han desarrollado en torno a la recuperación de la humedad del suelo con SAR:

Tabla 1. *Tabla de marco de estudios antecedentes*

Autor	Año	País	Observaciones
Dobson., et al.	1986	Estados Unidos	❖ El coeficiente de retrodispersión es altamente sensible a la microrugosidad de la topografía y la cobertura vegetal. ❖ Entre menor es el ángulo de incidencia, más sensible es el coeficiente de retrodispersión del radar al contenido de agua. ❖ Ángulos de incidencia bajos (20°-35°), se adaptan mejor a la recuperación de humedad del suelo.

Ulaby, et al.	1996	Estados Unidos	❖ Los radares de apertura sintética de banda C tienen alto potencial para detectar la humedad superficial del suelo (HS) en zonas de poca vegetación.
Barrett, et al.	2009	Irlanda	❖ La vegetación absorbe y dispersa parte de la radiación de las microondas que inciden sobre ella, como también la energía de microondas reflejada bajo la superficie del suelo. ❖ La polarización transmitida y recibida horizontalmente (HH) y la transmitida horizontalmente y recibida verticalmente (HV), son los parámetros del sensor más apremiantes para estimar la humedad del suelo.
Merzouki, et al.	2015	Canadá	❖ El enfoque híbrido basado en el modelo de ecuación integral (IEM) y la retrodispersión en múltiples polarizaciones de pares de imágenes adquiridas en diferentes ángulos de incidencia, proporcionó mejores estimaciones de la HS comparado con un modelo de multipolarización en suelos desnudos. ❖ El modelo de multipolarización tendió a sobreestimar los valores recuperados en el extremo superior del rango de humedad del suelo. ❖ Los errores al determinar la HS se asocian a la textura del suelo, el contenido de arcillas y limos, lo cual influye directamente en la retrodispersión. ❖ La vegetación interfiere con la dispersión de las microondas, complicando la obtención de la HS cuando hay un dosel considerable.
Ponnurangam, et al.	2016	Alemania	❖ El rango de ángulo de incidencia entre 35° y 40° es el más adecuado para la inversión polarimétrica híbrida de la humedad del suelo. ❖ El modelo de ecuación integral híbrido funciona de forma efectiva para suelos desnudos, con tasas de inversión de alrededor del 30-70%.
Yang, et al.	2017	China	❖ El modelo multiángulo de recuperación de la humedad de suelos desnudos tiene una validez favorable cuando los ángulos de incidencia varían de 15° a 50°. ❖ Se demuestra que el modelo multiángulo tiene una precisión y estabilidad relativamente alta, teniendo en cuenta simultáneamente la rugosidad de la superficie y la constante dieléctrica.
Yang, et al.	2018	China	❖ El uso de un solo parámetro polarimétrico en la banda C genera poca sensibilidad a la humedad del suelo superficial. ❖ El aumento de parámetros polarimétricos genera resultados positivos en relación con la obtención de la HS.

Zhu,. et al.	2019	Australia	❖ La rugosidad del suelo es un parámetro que influye en la determinación de la humedad del suelo. ❖ El análisis multitemporal ha demostrado ser un método prometedor para revertir la influencia de la rugosidad superficial, focalizando la atención en las variaciones temporales a través de adquisiciones subsecuentes de imágenes de radar.
Rana & Suryanarayana	2019	India	❖ La evaluación del rendimiento de los métodos de eliminación de ruido mostró que el filtro “Lee” integrado en la Plataforma de aplicaciones Sentinel (SNAP), con un tamaño de kernel de 3×3 proporcionó un buen equilibrio en la preservación de características y en la eliminación de manchas en comparación con los otros filtros utilizados en el estudio.
Punithraj,. et al.	2020	India	❖ La retrodispersión SAR está directamente relacionada con la humedad del suelo del área de estudio. ❖ El coeficiente de retrodispersión y la constante dieléctrica tienen una relación positiva al contenido de humedad tanto para la polarización recibida verticalmente y transmitida horizontalmente (VH) y la recibida y transmitida verticalmente (VV).
Benninga,. et al.	2020	Países Bajos	❖ El rendimiento de las recuperaciones de humedad del suelo a partir de las imágenes Sentinel-1 se pueden mejorar, reduciendo las incertidumbres que se originan. Estas incertidumbres se deben a las referencias in situ y a la incertidumbre radiométrica, la primera se puede reducir promediando múltiples mediciones distribuidas espacialmente y la segunda, aceptando una resolución espacial más gruesa o una mejora adicional del procesamiento de imágenes SAR.
Punithraj,. et al.	2021	India	❖ El coeficiente de retrodispersión del suelo de polarización VV tiene la correlación más alta con la humedad del suelo medida en campos desnudos, debido a su capacidad de penetración. ❖ El coeficiente de retrodispersión se ve menos afectado por la vegetación en el caso de campos desnudos.
Gharechelou,. et al.	2021	Irán	❖ La polarimetría SAR permite una separación directa o indirecta de los efectos de atenuación inducidos por la rugosidad de la superficie y la vegetación por descomposición. ❖ Los datos SAR de multipolarización con alta resolución, tiempo de revisión corto y adquisición casi en tiempo real podrían lograr un mapa de humedad del suelo más preciso.

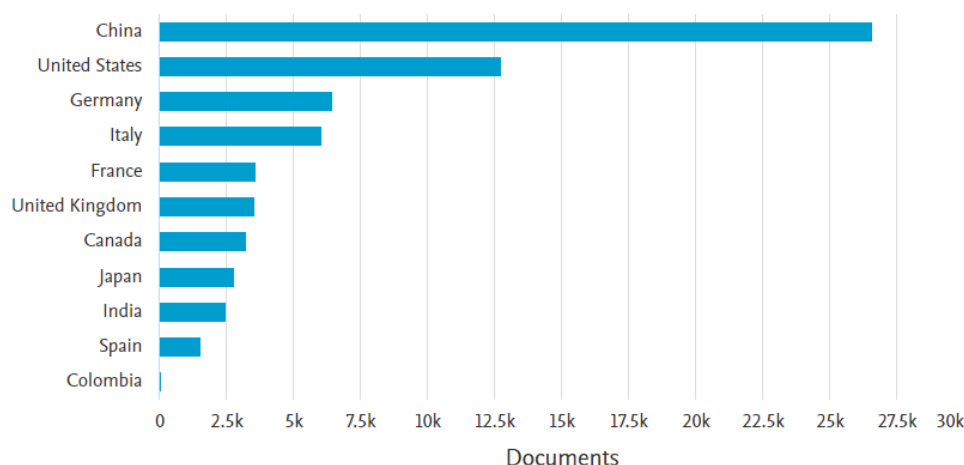
Arias,. et al.	2023	España	❖ La determinación de la humedad del suelo a partir de imágenes de Sentinel-1 demostró mayores errores en condiciones secas ($HS < 0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$). ❖ Las correcciones de vegetación mejoraron la predicción de los datos de humedad
Srivastava,. et al.	2023	India	❖ La retrodispersión VV demostró mejores resultados para la obtención de la humedad del suelo, aumentando el coeficiente de correlación y disminuyendo el error cuadrático medio.

Los estudios revelan la utilidad de usar imágenes satelitales para la obtención de la humedad del suelo, donde se destacan principalmente avances realizados en China. En el caso de Colombia, el uso de radares de apertura sintética ha sido reportado en diferentes investigaciones, donde las principales aplicaciones se enfocan en estimaciones de biomasa, identificación de deslizamientos, inundaciones, clasificación de cultivos, entre otros, sin embargo, se ha identificado que existen pocos avances o investigaciones específicas en Colombia con la denominación de “synthetic and aperture and radar” y “synthetic and aperture and radar and Colombia”, exploradas en bases de datos. En la figura 1, se evidencia que países como China, Estados Unidos, Alemania, llevan la delantera en cuanto al desarrollo de investigaciones aplicadas a SAR. Colombia cuenta con 59 documentos publicados; seguido de esto en la figura 2, se puede observar que en el año 1993, se reportan las primeras investigaciones, las cuales han ido aumentando a lo largo del tiempo, asimismo se evidencia que a partir del año 2015, las investigaciones relacionadas con el tema expuesto aumentaron significativamente, comparado con años anteriores.

Figura 1. Diagrama de barras: Número de investigaciones de SAR distribuidas por países.

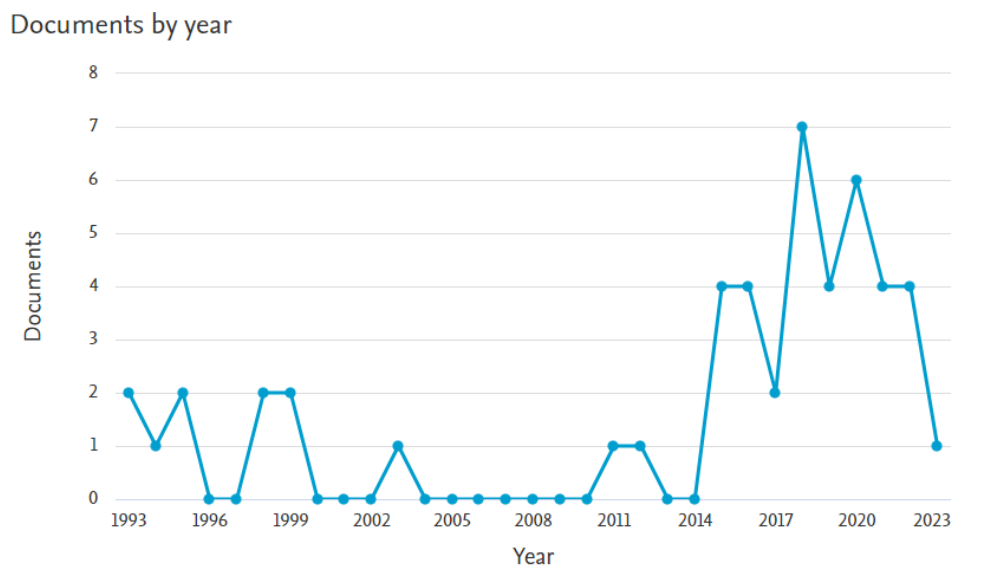
Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Fuente: Scopus.

Figura 2. Gráfica de número de investigaciones de SAR en Colombia distribuidas por año



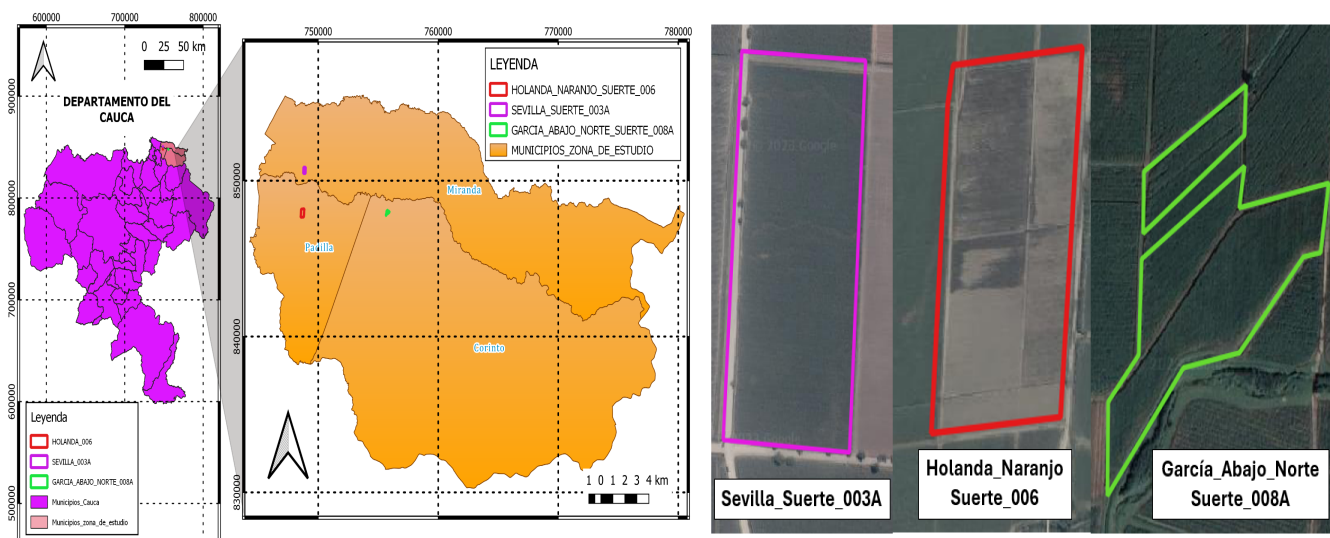
Fuente: Scopus.

Considerando la carencia de investigaciones específicas en el ámbito nacional sobre la estimación de la humedad del suelo mediante el empleo de imágenes satelitales, se evidencia la necesidad de contribuir con el presente estudio, para ofrecer información pertinente. Este aporte resultará crucial para la toma de decisiones relacionadas a la gestión eficiente del recurso hídrico en el sector agrícola. En consecuencia, se podrán desarrollar estrategias más sustentables orientadas hacia la optimización de su uso.

Metodología

Localización de la Zona de estudio

Figura 3. Ubicación del sitio de estudio. Se marcan las áreas utilizadas para la determinación de la humedad del suelo: Hacienda Sevilla suerte 003A (color morado) Hacienda Holanda Naranjo suerte 006 (Color rojo), y la Hacienda García Abajo Norte suerte 008A (color verde).



El estudio se llevó a cabo en tres suertes pertenecientes a las haciendas: Sevilla, Holanda Naranjo y García Abajo Norte del Ingenio INCAUCA; la primera suerte 003A corresponde a la hacienda Sevilla y está ubicada en el municipio de Miranda - Cauca, esta suerte abarca un área total de 7.22 ha. De este total, 6.14 ha pertenecen al mega ambiente húmedo y 1.08 ha al mega ambiente semiseco. La suerte está sembrada con la variedad de caña de azúcar CC 01-1940; las zonas agroecológicas predominantes son: 11H3, 18H3 y 21H2. Los suelos predominantes pertenecen en un 56, 29 y 15% a la consociación Manolo (ML) con 4,02 ha, Rio Paila (RL) con 2.13 ha y Florida (FL) con 1,07 ha. El Municipio de Miranda se localiza en el extremo Nororiental del Departamento del Cauca, tiene una altura que va desde 1050 a 2800 metros sobre el nivel del mar y una temperatura promedio de 15°C a 25°C, con una precipitación promedio anual de 1.379 mm (C.R.C, 2003).

La segunda suerte 006 corresponde a la hacienda Holanda Naranjo y está ubicada en el municipio de Padilla-Cauca, la cual tiene un área productiva total de 13,79 ha. De este total, 12, 82 ha pertenecen al mega ambiente húmedo y 0.97 ha al mega ambiente semiseco. La suerte está sembrada con la variedad de caña de azúcar CC 01 -1940; las zonas agroecológicas predominantes son: 11H3 y 21H2. Los suelos predominantes pertenecen en un 92, 7 y 1 % a la consociación Guadual (GD) con 12,73 ha, Florida (FL) con 0,98 ha, Balta (BT) con 0,08 ha (Cenicaña, Geoportal 2023). Padilla

se encuentra ubicada al Norte del Departamento de Cauca, en la Coordenada 3 a 14° de Latitud N y 67° de Longitud Oeste. Su altura sobre el nivel del mar es de 1000 m temperatura media 23° a 28°, lo separan de la ciudad de Cali 35 km y de Popayán Capital del Cauca 125 km. Una de sus grandes ventajas es la variedad de afluentes y ríos que lo bañan siendo este un aspecto propicio para el éxito en la producción de caña de azúcar. (Alcaldía Padilla, 2019).

La tercera suerte es la 008A correspondiente a la hacienda García Abajo Norte y está ubicada en el municipio de Corinto- Cauca, la cual tiene un área total de 3,75. De este total, 2.78 ha pertenecen al mega ambiente húmedo y 0.97 ha al mega ambiente semiseco. La suerte está sembrada con la variedad de caña de azúcar CC 01 -1940; las zonas agroecológicas predominantes son: 11H3 y 31H2. Los suelos predominantes pertenecen en un 57, 25, 14 y 4 % a la consociación Ines (IE) con 2,16 ha, Manolo (ML) con 0,92 ha, América (AA) con 0,51 ha y Franciscano (FR) con 0,16 ha. Su relieve corresponde a un área plana frente al flanco occidental de la cordillera central, en el bosque seco tropical a 1.090 msnm y temperatura media de 22°C. Es una de zona seca a húmeda, con precipitación que oscila entre 1.383 y 1.508 mm/anuales, con un déficit marcado en los meses de diciembre, enero, febrero, julio y agosto; la humedad relativa es alta con evaporación de 1.342 mm (IDEAM 2010).

Técnicas e instrumentos

A continuación, se describe las herramientas computacionales e insumos requeridos para el desarrollo del proyecto:

- **SNAP:** Software desarrollado por la ESA que tiene como propósito facilitar el procesamiento y el análisis de los productos brindados por todas las misiones Sentinel. El programa tiene integrado un modelo para invertir la retrodispersión denominado modelo de ecuación integral multi polarimétrico (Multi-Pol IEM), que es comúnmente usado para este tipo de imágenes. Por medio de este modelo se estimará el coeficiente dieléctrico del suelo (CDS). Este software es de libre distribución con todas las herramientas de utilización de imágenes Sentinel llamada SNAP (Sentinel Application Platform). Dicha plataforma se caracteriza por tener un entorno intuitivo, que, además, se ve complementado por una serie de plugins que le hace muy versátil para trabajar con imágenes de la misión Sentinel en el ámbito de la agricultura, forestal, hidrológico y de desastres naturales (Castillo et al. 2017; Clerici et al. 2017; Chymyrov et al. 2018; Fragoso-Campón et al. 2019; Gupta et al. 2018). Finalmente, cabe destacar que, a pesar de que el desarrollo del software se ha centrado en el procesamiento de imágenes del Sentinel-1, Sentinel-2 y más recientemente del Sentinel-3, también, ha sido empleado para procesar imágenes de otros satélites tales como Landsat,

Rapideye, etc. Sin embargo, pocos trabajos han sido llevados a cabo procesando imágenes de sensores aéreos mediante el software SNAP. De este modo, en este trabajo se plantea la utilización de dicha plataforma para determinar la humedad del suelo con imágenes de alta resolución obtenidas del Sentinel 1.

- **Programa Copérnico:** Es una iniciativa de la Comisión Europea (EC) y la Agencia Espacial Europea (ESA), conocido anteriormente como GMES (Global Monitoring for Environment and Security). Copérnico es el programa de observación de la Tierra diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana. (ESA, s.f)

El componente espacial del programa Copérnico se encuentra actualmente en una fase de implementación, compuesto por 5 misiones o sistemas con distintos campos de análisis: Sentinel 1, vinculado a las imágenes de radar; Sentinel 2, proporcionando imágenes multiespectrales de alta resolución; Sentinel 3, destinado principalmente a estudios de océanos; Sentinel 4, que aportará datos para estudios atmosféricos desde una órbita geoestacionaria; Sentinel 5, que también proporcionará datos para estudios atmosféricos pero desde una órbita polar. A partir de este programa se obtuvieron las imágenes utilizadas en el presente estudio.

- **Imágenes satelitales Sentinel 1:** Este sistema forma parte del Observatorio de Radar Europeo, asociado al programa Copérnico. Se compone de una constelación de dos satélites en órbita polar. El primero es el Sentinel 1A, lanzado mediante el cohete Soyuz ST-A9 desde el Centro Espacial de la Guayana Francesa el 3 de abril de 2014, y actualmente sigue operativo. El segundo es el Sentinel 1B, lanzado el 25 de abril de 2016 también a bordo de un cohete Soyuz desde el mismo centro espacial. Sin embargo, en la actualidad, el Sentinel 1B no está proporcionando datos debido a una anomalía ocurrida el 23 de diciembre de 2021. Esta anomalía está relacionada con la fuente de alimentación de la electrónica del instrumento, suministrada por la plataforma satelital, lo que le impide enviar información de radar. (ESA, s.f).

La constelación cuenta con sensores de Radar de apertura sintética (SAR) de Banda C, tal como sus antecesores (ERS, RADARSAT, ENVISAT), proporcionando imágenes con cobertura mundial, de doble polarización en cuatro formatos de diferentes resoluciones, desde los 5 m, con una cobertura de hasta 400 km. Todo esto con una resolución temporal de 12 días con el

SENTINEL 1A y de 6 días una vez esté en operación el SENTINEL 1B, tanto en polarización singular VV como en polarización dual VH, y no se ve afectado por la cobertura de nubes o la falta de iluminación; esto implica que puede tomar datos durante el día o la noche, bajo todo tipo de condiciones climáticas (ESA, s.f). Dentro de los objetivos de la misión está el monitoreo de bosques, suelos agrícolas, cuerpos de agua, deshielo marino, icebergs, buscando entre otras cosas, servir como soporte para el mapeo de zonas que sufren desastres naturales. Se espera que tenga una vida útil de 12 años (ESA, s.f). Los productos de Sentinel-1 son de acceso libre y se obtienen de la página web de Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Las imágenes adquiridas se han obtenido en modo interferométrico de amplia franja (IW) y los productos son de tipo GRD (Ground Range Detected) obtenidos utilizando un modelo elipsoidal de la Tierra, este último presenta un preprocesamiento, estimación del centroide Doppler, enfoque complejo de mirada única e imagen y posprocesamiento, permitiendo así el muestreo en cuadrícula de espaciado de píxeles (Copernicus, s. f.). Esto hace que se reduzca el moteado de la imagen, a costa de una menor resolución espacial. Se han descargado imágenes desde el 1 de julio de 2017 hasta el 19 de agosto de 2020; a continuación, en la Tabla 2 se muestran las fechas de las imágenes de esta misión con las que se trabajó:

Tabla 2. Fechas de imágenes satelitales zona de estudio

Finca:	Holanda Naranjo Suerte 006	Finca:	Sevilla Suete 003A	Finca:	García abajo Norte Suerte 008A
Fecha de siembra	28/07/2017	Fecha de siembra:	03/08/2017	Fecha de siembra	07/12/2017
Fechas de imágenes:	01/07/2017	Fechas de imágenes:	06/07/2017	Fechas de imágenes:	15/11/2017
	06/07/2017		13/07/2017		22/11/2017
	13/07/2017		25/07/2017		27/11/2017
	25/07/2017		30/07/2017		04/12/2017
	30/07/2017		06/08/2017		09/12/2017
	06/08/2017		11/08/2017		16/12/2017
	11/08/2017		18/08/2017		21/12/2017
	18/08/2017		23/08/2017		28/12/2017
	23/08/2017		30/08/2017		02/01/2018
	30/08/2017		04/09/2017		09/01/2018
Fecha corte 1	27/08/2018	Fecha corte 1	25/08/2018	Fecha corte 1	05/09/2018
Fechas de imágenes:	06/09/2018	Fechas de imágenes:	25/08/2018	Fechas de imágenes:	06/09/2018
	18/09/2018		06/09/2018		18/09/2018
			18/09/2018		30/09/2018
			30/09/2018		
Fecha corte 2	21/07/2019	Fecha corte 2:	10/09/2019	Fecha corte 2:	21/09/2019
Fechas de imágenes:	20/07/2019	Fechas de imágenes:	13/09/2019	Fechas de imágenes:	25/09/2019
	27/07/2019		18/09/2019		30/09/2019
	01/08/2019		25/09/2019		07/10/2019
	08/08/2019		30/09/2019		12/10/2019
	13/08/2019		07/10/2019		19/10/2019
	20/08/2019		12/10/2019		24/10/2019
Fecha corte 3:	21/07/2020				
Fechas de imágenes:	21/07/2020				
	26/07/2020				
	02/08/2020				
	14/08/2020				
	19/08/2020				

Las imágenes utilizadas en este estudio tienen un ángulo de incidencia de entre 34° y 36°, por lo que entran dentro del rango óptimo para estimar la HS (Holah et al., 2005). La polarización utilizada ha sido la VV, puesto que según Kumar y Bhagat (2017) la polarización simple (VV y HH) es más precisa para la estimación de la HS que la polarización dual (VH o HV).

A continuación, en la tabla 3, se muestra un resumen, con las principales características y especificaciones técnicas que componen al sistema Sentinel 1:

Tabla 3. Características del satélite Sentinel-1.

SENTINEL 1	
Sensor	Radar de Apertura Sintética, Banda C
Frecuencia	Sentinel 1A (12 días) y Sentinel 1B (6 días)
Resolución	20 m
Ancho de barrido	250 km
Polarización	VV + VH, HH + HV, HH y VV
Ángulo de incidencia	De 20 a 45°
Precisión Radiométrica	1 dB (3σ)
Modo de adquisición de las imágenes	Stripmap (SM), Interferometric wide swath (IW), Extra wide swath (EW) y Wave mode (WV)

Fuente: Elaboración propia con base a datos obtenidos en sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1

- **Qgis:** La representación de los datos que se analizaron en esta investigación se llevó a cabo usando el programa QGIS (Versión QGIS Desktop 3.8.2®). Este es un Software libre y de código abierto para diferentes plataformas. Con el programa se realizaron los mapas texturales de la zona de estudio y también los mapas sintéticos para el análisis del estudio.
- **Plataforma de cenicaña:** El Geoportal, una herramienta creada por Cenicaña para apoyar la práctica de la Agricultura Específica Por Sitio (AEPS) en el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Río Cauca. (cenicaña, 2020). Esta herramienta en línea desarrollada por Cenicaña mejora e integra diferentes servicios de datos geoespaciales de la agroindustria de la caña, para facilitar a ingenios y cultivadores el uso de esta información. Facilita el análisis geoespacial de la producción de caña en el valle del río Cauca, a nivel de consociación de suelo y zona agroecológica. Suministra mapas temáticos por hacienda y suerte de caña, con información asociada que resulta necesaria para la práctica de la agricultura específica por sitio en el valle del río Cauca.

A través de la plataforma se obtuvieron datos de textura, área y límites de humedad de las suertes de la zona de estudio.

- **Precipitaciones:** Los datos de lluvia fueron suministrados por el Ingenio Incauca, los cuales corresponden a los pluviómetros ubicados en las zonas de estudio.
- **Complemento Smart Map:** Es un componente de software desarrollado e integrado con QGIS, disponible en la versión 3.10 o superiores a esta. El complemento facilita la creación y análisis de semivariogramas como parte del proceso de interpolación espacial. (Nasse., et al, 2023). El complemento Smart Map se utilizó para configurar un semivariograma estadístico adecuado para cada una de las fechas y suertes en estudio, el complemento permite ajustar los datos en este caso de humedad del suelo a cinco modelos de semivariogramas teóricos: exponencial, esférico, gaussiano, lineal y lineal con meseta.

Desarrollo

Objetivo 1. Consolidar una base de datos del satélite Sentinel-1 para el periodo 2017 - 2021 para dos condiciones de textura de suelos cultivados con caña de azúcar.

Actividades desarrolladas:

- Identificación de la resolución temporal del satélite Sentinel 1 para la zona de estudio:
Se descargaron los archivos KML por medio de la página de la Agencia Espacial Europea (ESA), donde se identificaron las fechas en las cuales pasó el satélite y se determinó la frecuencia de los satélites Sentinel 1A y Sentinel 1B en la zona de interés, durante el periodo 2017 - 2020.
- Selección de satélite:
Se selecciona el satélite Sentinel 1B, dado que tiene mayor disponibilidad de imágenes y su frecuencia es de 5 y 7 días.
- Determinación de los tipos de suelo presentes en la zona de estudio:
Para conocer el estudio detallado de los suelos de las zonas de interés, se usó el geoportal de Cenicaña, donde se tomaron puntos georeferenciados de las haciendas. Posteriormente se realizaron los polígonos y puntos con estos datos en el programa QGIS, estos polígonos contienen información de porcentaje de arenas, limos, arcillas y tipo de textura. Seguido de esto se crearon mapas raster con el contenido de arcillas y arenas de cada hacienda.
En este geoportal también se identificaron los límites de humedad a saturación de cada suerte, como se muestra en la tabla 4, 5 y 6.

Tabla 4. Características de suelo hacienda Sevilla

Sevilla suerte - 003A							
Clase textural	Símbolo	Área (ha)	Porcentaje (%)	Arenas	Limos	Arcillas	Contenido de humedad saturación (%)
FL	RL	2,13	29,53	13,82	65,71	20,47	33,31
ArL	ML	4,02	55,62	9,07	45,97	44,96	26,18
FA	FL	1,07	14,84	69,62	18,66	11,72	38,7

Tabla 5. Características de suelo hacienda Holanda

Holanda suerte 006							
Clase textural	Símbolo	Área (ha)	Porcentaje (%)	Arenas	Limos	Arcillas	Contenido de humedad saturación (%)
FAr	GD	12,85	93,05	0,1595	0,5452	0,2953	32,75
FA	FL	0,91	6,65	0,6962	0,1866	0,2953	38,69
ArL	BT	0,03	0,28	0,1496	0,4498	0,4006	42,44

Tabla 6. Características de suelo hacienda Garcia Abajo Norte

Garcia Abajo Norte suerte 008A							
Clase textural	Símbolo	Área (ha)	Porcentaje (%)	Arenas	Limos	Arcillas	Contenido de humedad saturación (%)
F Ar	IE	1.59	42,42	22,22	45,68	32,1	25,01
ArL	ML	1.15	30,76	9,07	45,97	44,96	26,18
FAr	AA	0.97	25,86	32,7	38,22	29,08	32,59
F	FR	0.03	0,93	26,29	48,36	25,35	53,63

- Determinación de la temperatura del suelo:

Por medio del uso de los sistemas de información geográfica se cruzó la información de las unidades cartográficas del suelo (UCS) brindada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, mediante el mapa de suelos del departamento del Cauca a escala 1:100.000. Con los datos de la UCS se identificó que los suelos de la zona de estudio se clasifican como cálidos, por los cuales la temperatura ambiental es mayor a 24 °C.

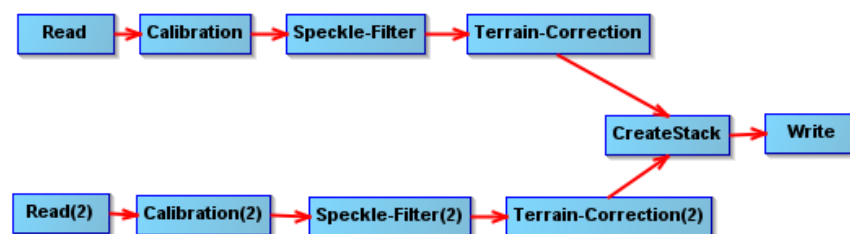
- Descarga y preprocesamiento de imágenes satelitales:

Para la selección de las imágenes satelitales se tuvo en cuenta la fecha de siembra y corte, ya que el modelo a usar requiere que el suelo se encuentre descubierto o con muy poca densidad del cultivo, para así obtener los datos de humedad del suelo.

Las imágenes satelitales se descargaron mediante el portal de Copernicus Open Access Hub, en total se descargaron 62 imágenes del periodo 2017 -2020.

Una vez descargadas las imágenes, mediante el uso de la herramienta Sentinel Application Platform (SNAP), se realizó el preprocesado de multiángulo, como se describe a continuación:

Figura 4. Flujograma preprocesamiento imágenes satelitales



Fuente: SNAP

- Entrada de imágenes: el preprocesado de multiángulo toma dos imágenes satelitales de banda C como entrada, donde una corresponde a una imagen adquirida en la mañana (A.M.) y otra en la tarde (P.M.) en el área de estudio, con una frecuencia temporal entre 5 a 7 días.
- Calibración radiométrica: se crea una imagen donde se relaciona el valor del píxel con la retrodispersión de la escena. También calcula la intensidad de la retrodispersión mediante el uso de las características de la calibración del sensor. En este caso se selecciona la polaridad VV y la calibración radiométrica a sigma 0.
- Filtro de Speckle: este filtro permite reducir el ruido por el moteado que se genera por el retorno de las ondas. En este caso se usó el filtro Boxcar de 3 x 3, ya que este se considera el más óptimo para el modelo de multiángulo (SNAP (9.0.0), 2022) (Filipponi, 2019). Este filtro es una técnica diseñada para mejorar la calidad de la imagen al reducir el ruido moteado. Al aplicarse en las etapas iniciales del procesamiento de datos SAR, el filtrado de moteado impide que el ruido se propague en los procesos subsiguientes, como la corrección del terreno o la conversión a dB. Sin embargo, es importante destacar que el uso de esta técnica puede no ser

apropiado cuando se pretende identificar pequeñas estructuras espaciales, ya que podría resultar en la eliminación de información relevante en estos casos (Filipponi, 2019).

- Corrección del terreno: convierte los datos a un sistema de coordenadas específico y reestablece la relación espacial entre los píxeles de la imagen, en este caso se estableció un espaciado de píxeles de 20 m, ya que la resolución de las imágenes corresponde a 20 m. La corrección de terreno se realizó utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) SRTM 3 segundos y la proyección cartográfica a coordenadas geográficas WGS84 (latitud/longitud), este DEM es derivado de datos de radar recopilados por el Transbordador Espacial Endeavour durante la Misión Topográfica por Radar del Transbordador (SRTM). Este conjunto de datos proporciona valores de elevación con una resolución de aproximadamente 3 segundos de arco (unos 90 metros) a nivel global .(SNAP (9.0.0), 2022)

- Creación de Stack: permite unir las imágenes (A.M. y P.M.) y ajustar sus píxeles en la misma posición geográfica. En este caso se usaron los siguientes parámetros:

Tipo de remuestreo: Vecino más cercano

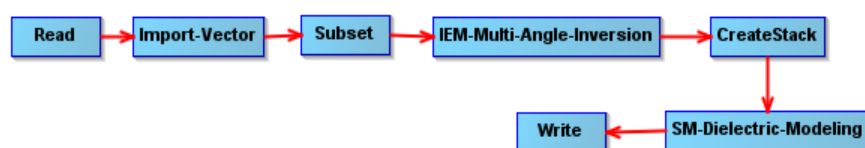
Método de compensación inicial: geolocalización de productos

- Procesamiento de las imágenes de Sentinel 1:

Una vez preprocesadas las imágenes, se continúa con el procesamiento de estas. El modelo usado para el cálculo de la humedad del suelo fue el Modelo de Ecuación Integral Multi-Ángulo, se usó este modelo ya que se ajustaba a las imágenes descargadas, las cuales tienen una polaridad VV-VV y cumplen con los parámetros de entrada que se especifican en este modelo.

Para el procesamiento se realiza lo siguiente:

Figura 5. Flujograma procesamiento imágenes satelitales



Fuente: SNAP

- Incorporación de las imágenes preprocesadas
- Importar vector: se importa del archivo tipo shape de la zona de estudio.
- Recorte: se realiza el recorte por medio de la herramienta de recorte por vista (Spatial subset from view).
- Inversión del Modelo de Ecuación Integral Multiángulo: se selecciona la polarización de las imágenes, que en este caso es VV-VV y como resultado se obtiene la constante dieléctrica real (RDC) y la raíz de la media cuadrática (RMS).
- Creación del Stack: el Stack se realizó con la imagen resultante del IEM y los mapas raster de contenido de arcillas y arenas de la zona de estudio.
- Cálculo de la humedad del suelo: para el cálculo de humedad se establece el tipo de modelo dieléctrico, en este caso se usaron ambos modelos Hallikainen y Mironov.
 - Hallikainen: este modelo calcula la humedad del suelo a partir del contenido de arenas, arcillas y el RDC.
 - Mironov: calcula la humedad del suelo a partir del RDC, el porcentaje de arcillas, arenas y la temperatura efectiva del suelo.

Para ambos modelos se tuvo en cuenta la humedad máxima a saturación de los suelos en estudio, esto con el fin de establecer el rango de esta.

- Elaboración de la base de datos de humedad y tipo de suelo: con los datos de humedad del suelo obtenidos a partir de las imágenes satelitales, se consolidó una base de datos que permite visualizar la variación de humedad en el periodo de estudio, y también información acerca de los tipos de suelo de la zona de interés.

La base de datos creada consta de imágenes tipo raster, donde cada imagen proporciona valores de humedad del suelo por pixel. Para cada fecha (tabla 2) se determinó la humedad del suelo mediante los modelos de Hallikainen y Mironov donde se realizaron las respectivas variaciones, por lo cual se obtuvieron en total 5 imágenes de humedad del suelo por fecha. Las condiciones o factores para la obtención de estas imágenes se exponen en detalle en el segundo objetivo. En el anexo 1, se pueden observar la información obtenida de cada una de las imágenes.

Objetivo 2. Determinar la sensibilidad del modelo de ecuación integral para estimar la humedad de las dos condiciones de suelos utilizando la herramienta computacional SNAP.

Actividades desarrolladas:

- Análisis de sensibilidad del modelo: se determina la sensibilidad del modelo con base a diferentes parámetros que permitieron conocer la variabilidad de la humedad. En este análisis, se emplearon métricas estadísticas, tales como el coeficiente de determinación (R^2), la matriz de correlación y el coeficiente de variación. Los parámetros considerados para esta evaluación fueron los siguientes:
 - Mapas texturales sintéticos: se generaron mapas con variaciones en la composición de arcillas y arenas respecto a los originales, con el propósito de evaluar la sensibilidad del modelo ante cambios en la textura del suelo. Para desarrollar estos mapas sintéticos, se consideraron las características texturales específicas de cada suerte, buscando así crear un contraste en la textura. En áreas originalmente altas en contenido de arcillas, se establecieron zonas con una alta proporción de arena, generando así una diferencia considerable. La creación de los mapas raster sintéticos se llevó a cabo en el software QGIS, partiendo de los mapas originales y modificando los porcentajes de limo, arcilla y arena.
 - Cambio de temperatura en el suelo: se establecieron diferentes temperaturas del suelo para conocer la humedad del suelo por medio del modelo de Minorov.
 - Comportamiento ante eventos de lluvia: se realizó la comparación del comportamiento de la humedad del suelo según los datos de precipitación para cada una de las haciendas.

Objetivo 3. Caracterizar la variabilidad espacial del contenido de humedad del suelo en la zona de estudio mediante semivariogramas.

Actividades desarrolladas:

Mediante el uso del software QGIS, se realizaron los semivariogramas para el período de estudio en cada hacienda. Este proceso implicó la adquisición de datos de humedad del suelo correspondientes a cada píxel georreferenciado. Estos datos se utilizaron para generar puntos en el entorno de QGIS. Posteriormente, empleando el complemento "Smart-Map", se desarrollaron semivariogramas ajustados a modelos con base a el valor de R^2 , lo que posibilitó la obtención de parámetros como nugget, sill y rango. Este enfoque permitió evaluar la distribución espacial de la humedad del suelo en las áreas objeto de estudio.

Resultados y discusión

En el transcurso de esta investigación, se ha explorado el uso de los radares de apertura sintética y su metodología para medir la humedad del suelo. El propósito central ha sido evaluar un modelo de ecuación integral para estimar la humedad del suelo usando datos de radar de apertura sintética. Este proceso ha implicado un análisis de la literatura existente, la recopilación de datos y la aplicación de metodologías pertinentes.

Los resultados se organizan de manera sistemática en consonancia con los objetivos planteados en este estudio, proporcionando una visión detallada de cada aspecto investigado. Cada resultado se presenta con el respaldo de análisis cuantitativos y cualitativos, lo que fortalece la validez y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Base de datos

El anexo 1, corresponde a la base de datos generada a partir de las imágenes procesadas previamente mencionadas en la tabla 2. Esta base de datos está estructurada en una hoja de cálculo que contiene información por píxel. Está categorizada según el tipo de tratamiento aplicado, detallando el modelo específico utilizado para obtener la humedad del suelo y el ciclo correspondiente al cultivo, ya sea siembra, corte 1, 2 o 3. La cantidad de imágenes procesadas coincide con la disponibilidad respectiva del ciclo del cultivo. Estas imágenes fueron seleccionadas detalladamente para evitar áreas con vegetación densa que pudieran influir en los resultados obtenidos.

Como resultado se obtuvieron 260 imágenes procesadas tipo raster, donde cada imagen cuenta con aproximadamente 417 píxeles (Hacienda Sevilla), 792 píxeles (Hacienda Holanda) y 210 píxeles (Hacienda García Abajo Norte). Cada imagen contiene información de la ubicación georreferenciada de cada píxel (longitud y latitud), la constante dieléctrica real (RDC) y los porcentajes de arcillas y arenas. El procesamiento de cada imagen corresponde a la obtención de la humedad del suelo a partir del modelo de Hallikainen, con datos texturales originales y sintéticos. Adicionalmente el procesamiento con el modelo Minorov y los cambios de temperatura de 20, 25 y 30 °C respectivamente.

Influencia de la textura del suelo en la recuperación de la humedad

La textura del suelo es fundamental en la incidencia de las ondas y por consiguiente en los modelos dieléctricos, dado que la proporción de agua ligada y libre del suelo varían en función del

área total de partículas sólidas por unidad de volumen de suelo, lo que a su vez depende de la textura y mineralogía de las partículas sólidas del suelo (Hallikainen et al., 1985).

Los modelos Hallikainen y Mironov consideran el porcentaje de arcillas y arenas para poder determinar la HS, debido a que esto puede variar significativamente la recuperación de dicho parámetro. Para evaluar la sensibilidad de los modelos ante los cambios de textura, se elaboraron mapas sintéticos que permitieron el cambio de textura en cada una de las haciendas.

Figura 6. Mapa textural de la suerte 003A Hacienda Sevilla.

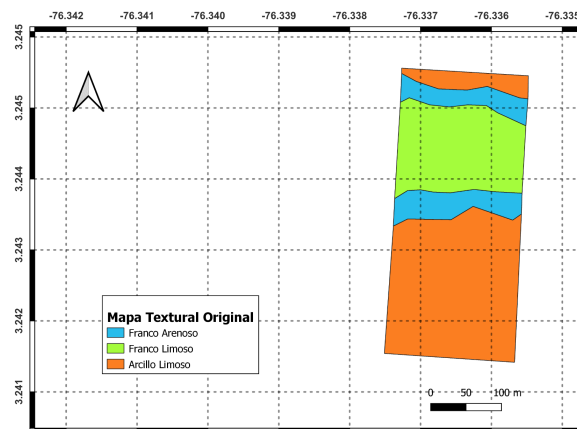


Tabla 7. Porcentaje de área por textura de la suerte 003A Hacienda Sevilla

Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Franco Arenoso	1.07	14.82
Franco Limoso	2.13	29.50
Arcillo Limoso	4.02	55.68
Área Total	7.22	100%

Figura 7. Mapa textural sintético de la suerte 003A Hacienda Sevilla.

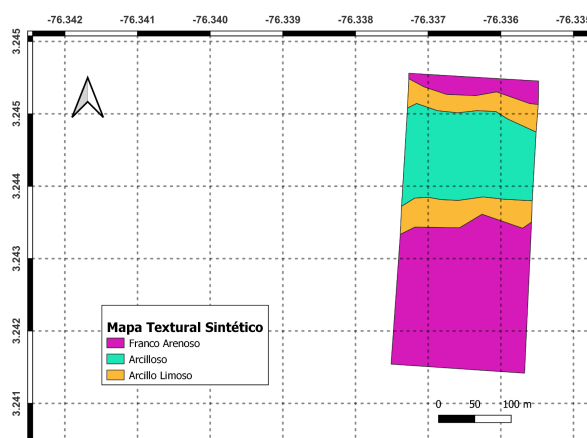


Tabla 8. Porcentaje de área por textura sintético de la suerte 003A Hacienda Sevilla

Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Arcilloso	2.13	29.50
Arcillo Limoso	1.07	14.82
Franco Arenoso	4.02	55.68
Área Total	7.22	100%

En la figura 6 se presenta la distribución espacial de los grupos texturales en la suerte 003A de Sevilla. Se destaca que la mayor extensión del área corresponde al grupo textural arcillo limoso; Seguidamente se encuentra el suelo franco limoso, ambos reconocidos por su notable capacidad de retención de agua, atribuida a la presencia significativa de limo en su composición. No obstante, es importante señalar que el suelo arcillo limoso tiende a retener aún más agua que el franco limoso, debido a que predominan las partículas de arcilla en su estructura. En menor proporción, se encuentra el suelo franco arenoso, caracterizado por una distribución equitativa de arena, limo y arcilla. Esta composición conlleva una rápida percolación del agua gracias a la presencia predominante de arena, lo cual facilita un flujo rápido del agua a través del suelo.

El mapa sintético para esta suerte, presentado en la figura 7, muestra la sustitución de cada una de las clases texturales del mapa original. En este mapa, los suelos franco arenoso y arcilloso son predominantes, presentando capacidades contrastantes de retención de agua debido a sus composiciones texturales distintas. El suelo franco arenoso, a pesar de tener proporciones balanceadas de arena, limo y arcilla, tiende a drenar el agua rápidamente gracias a la presencia de partículas de arena, que se encuentran en mayor proporción. Esta estructura facilita un rápido flujo del agua a través del suelo, limitando su capacidad para retener grandes volúmenes de humedad. Por el contrario, el suelo arcilloso tiene una alta capacidad de retención de agua, debido a las partículas de arcilla, las cuales poseen una alta área superficial en relación con su tamaño, permitiendo la retención de agua entre ellas.

Figura 8. Mapa textural de la suerte 006 Hacienda Holanda.

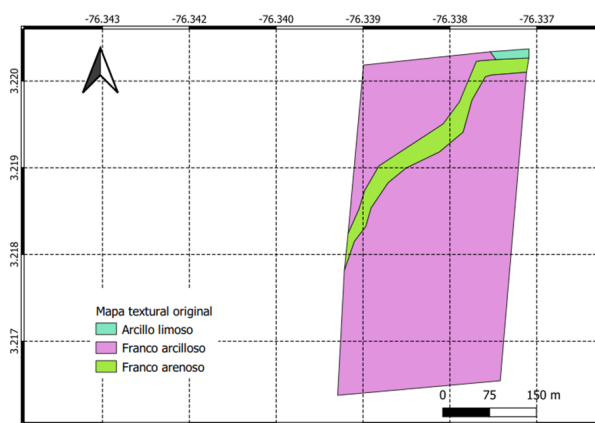


Tabla 9. Porcentaje de área por textura de la suerte 006 Hacienda Holanda.

Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Arcillo limoso	0.08	0.64
Franco Arcilloso	12.73	92.22
Franco Arenoso	0.98	7.13
Área Total	13,79	100%

Figura 9. Mapa textural sintético de la suerte 006 Hacienda Holanda.

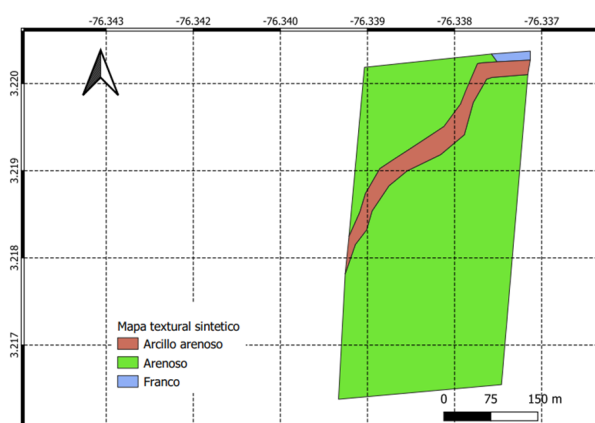


Tabla 10. Porcentaje de área por textura sintética de la suerte 006 Hacienda Holanda.

Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Arcillo Arenoso	0.98	7.13
Arenoso	12.73	92.22
Franco	0.08	0.64
Área Total	13,79	100%

Para el caso de la suerte 006 de la Hacienda Holanda, se evidencia en la figura 8 que el mayor porcentaje del área corresponde a la clase textural franco arcilloso, la cual se caracteriza por su capacidad de regulación hídrica que se sitúa en un punto intermedio entre los suelos francos y los arcillosos puros. Este tipo de suelo se caracteriza por tener una composición equilibrada entre arena, limo y arcilla, con una proporción mayor de arcilla que en el suelo franco pero menos que en el arcilloso. Esto permite al suelo franco arcilloso tener propiedades particulares en términos de regulación hídrica. Esta combinación de retención y drenaje moderado brinda al suelo franco arcilloso una capacidad de regulación hídrica equilibrada.

El mapa sintético correspondiente a esta suerte se presenta en la figura 9, el cual evidencia la sustitución del suelo franco arcilloso por uno de tipo arenoso. Este último se caracteriza por su capacidad reducida para retener humedad, atribuida principalmente a la predominancia de partículas de arena. Dichas partículas, al ser más grandes y presentar espacios más amplios entre sí, posibilitan una rápida infiltración y drenaje del agua a través del suelo.

Figura 10. Mapa textural de la suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.

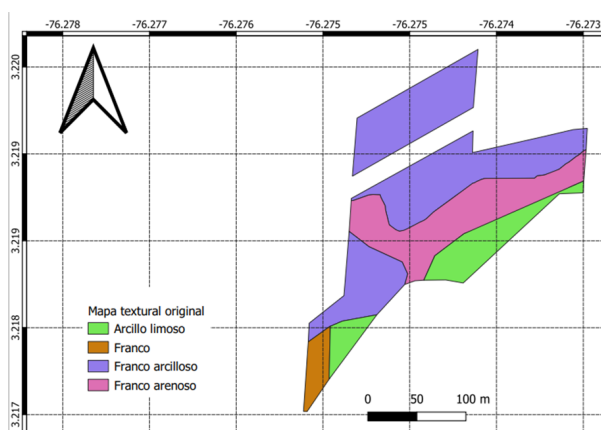


Tabla 11. Porcentaje de área por textura suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.

Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Arcillo limoso	0.51	13.63
Franco	0.16	4.32
Franco arcilloso	2.16	57.48
Franco arenoso	0.92	24.55
Área Total	3.75	100%

Figura 11. Mapa textural sintético de la suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.

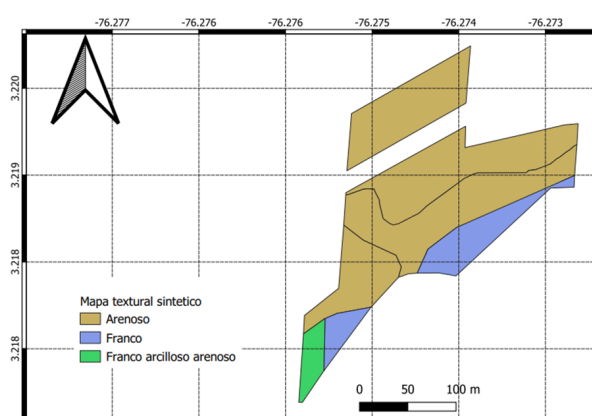


Tabla 12. Porcentaje de área por textura sintético suerte 008A Hacienda García Abajo Norte.

Textura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Arenoso	3.08	82.03
Franco	0.51	13.63
Franco arcilloso arenoso	0.16	4.32
Área Total	3.75	100%

El mapa textural de la suerte de la suerte 008A de la hacienda García Abajo Norte se muestra en la figura 10. El mayor porcentaje del área presenta un suelo de tipo franco arcilloso y franco

arenoso, los cuales contienen una mezcla equilibrada de partículas. Sin embargo, la diferencia clave radica en la proporción de cada uno de estos componentes, lo que resulta en variaciones significativas en su capacidad para retener humedad, el franco arcilloso tiene una mayor capacidad de retención de agua debido a una proporción más alta de arcilla, mientras que el franco arenoso retiene menos agua debido a la predominancia de partículas de arena.

En la figura 11 se evidencia el contraste en el mapa sintético para esta suerte, donde predomina el suelo arenoso, el cual a diferencia del suelo franco arcilloso, tiene una capacidad reducida de retención de humedad.

Con el fin de comparar la variabilidad en la HS respecto al cambio textural, se muestra en la figura 12, la HS promedio obtenida en cada suerte a partir del modelo Hallikainen con los mapas textuales originales y sintéticos:

Figura 12. Humedad promedio modelo Hallikainen original y sintético



Se evidencia que la humedad promedio del modelo Hallikainen con la banda de contenido de arcillas y arenas original, en la mayoría de los casos tiende a ser mayor que en el modelo que contiene el mapa sintético para todas las haciendas. Estos resultados se atribuyen a los cambios de textura del suelo, ya que este factor es determinante en la obtención de dicha variable. Por lo tanto,

resulta de gran importancia conocer el comportamiento espacial de las suertes, principalmente en los días con mayor y menor contenido de humedad respectivamente. Las figuras 13, 14 y 15 ilustran dicho comportamiento para el día para el día con menor promedio de humedad del suelo, mientras que las figuras 16, 17 y 18 representan el comportamiento en el día con el mayor promedio de HS.

-Días de menor humedad

Figura 13. Mapa día de menor humedad Hacienda Sevilla

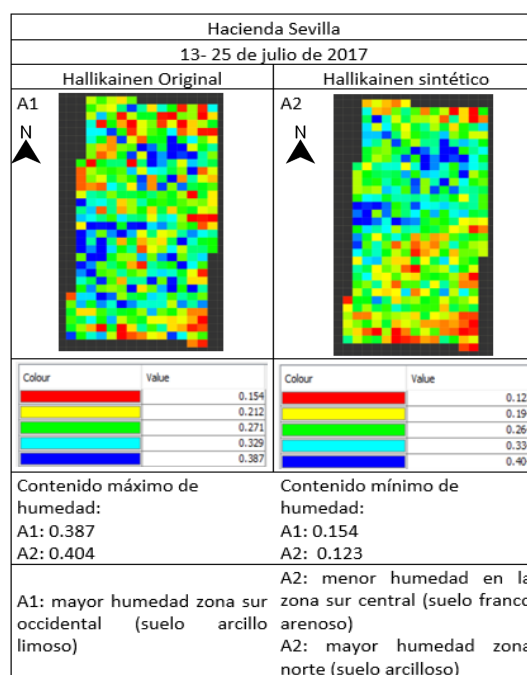


Figura 14. Mapa día de menor humedad Hacienda Holanda

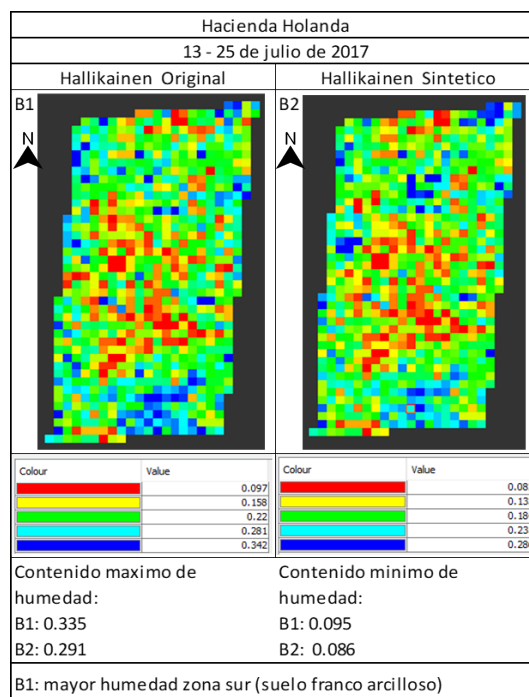
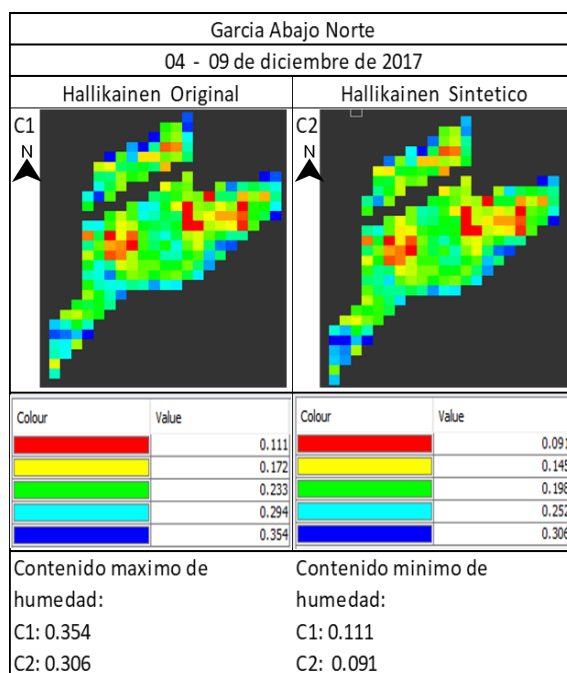


Figura 15. Mapa día de menor humedad Hacienda García Abajo Norte



- Días de mayor humedad

Figura 16. Mapa día de mayor humedad Hacienda Sevilla

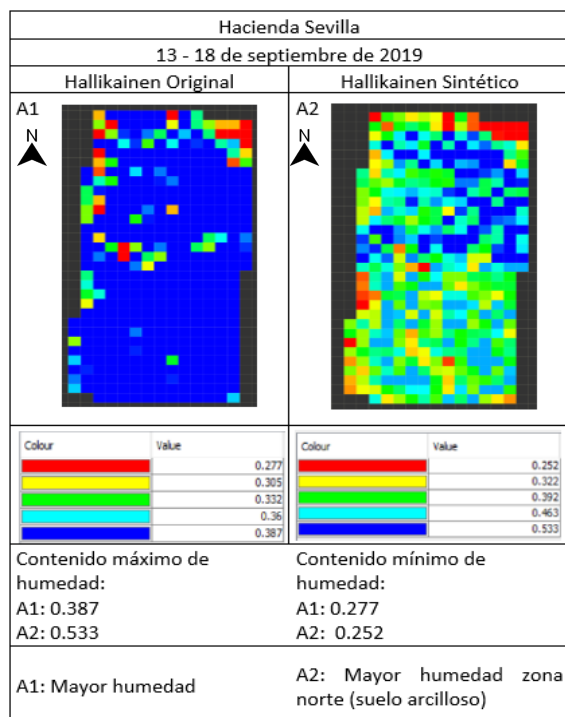


Figura 17. Mapa día de mayor humedad Hacienda Holanda

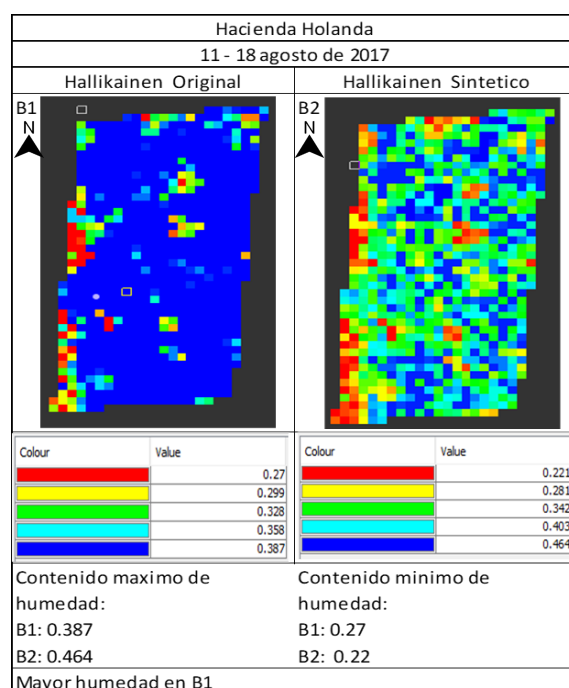
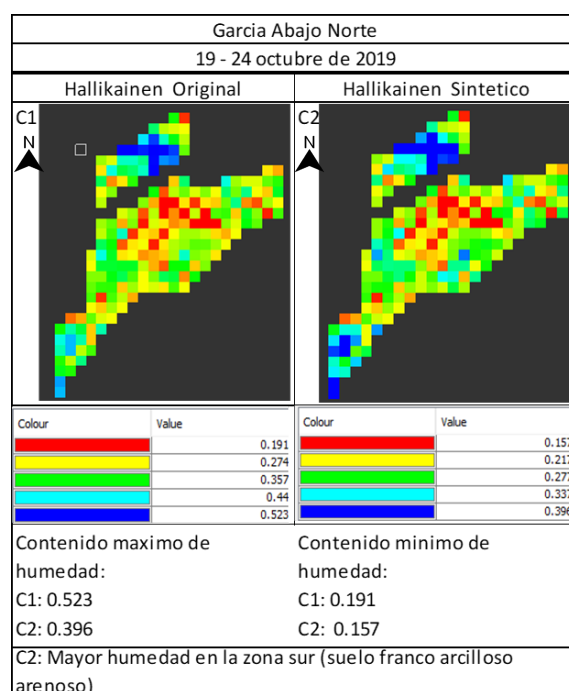


Figura 18. Mapa día de mayor humedad Hacienda García Abajo Norte



La humedad del suelo varía típicamente entre las diferentes texturas de este, debido a la capacidad de retención de agua y drenaje de las partículas que lo componen. En el caso de los mapas originales de las haciendas, donde predominan los suelos franco arcillosos y arcillo limosos, la capacidad de retención de humedad es mayor comparado con los mapas sintéticos donde predominan los suelos arenosos y franco arenosos, esto debido a que las arcillas tienen una alta

capacidad de retención de agua, debido a que los pequeños espacios porosos en estas les permiten atraer y retener moléculas de agua de manera efectiva, mientras que el suelo arenoso tiene baja capacidad de retención de agua. Las partículas de arena grandes no tienen tanta superficie para retener las moléculas de agua en comparación con las partículas de suelo más finas como la arcilla o el limo (Largaespada & Henríquez, 2015).

La constante dieléctrica del suelo varía en función de la humedad. La constante dieléctrica de un suelo seco es aproximadamente 5 y la del agua aproximadamente 80 (a 25 °C) (Robinson et.al., 1999). Es así, como se puede estimar la HS a partir de la constante dieléctrica. El agua en suelo puede estar libre o ligada, lo cual va a depender de las características texturales y minerales del suelo (Hallikainen et al., 1985). Por lo tanto, esta constante además de depender de la humedad del suelo, está influenciada por otros factores como la temperatura, salinidad, estructura, porosidad y de las características de la frecuencia de radiación incidente (Alvarez, 2005). Esta última es una propiedad que tiene en cuenta la respuesta del material para polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado y por lo tanto, su capacidad para interactuar con la radiación electromagnética.

La cantidad de absorción y reflexión de la radiación depende de la frecuencia de ésta, la composición del suelo y su contenido de agua. Los suelos arcillosos pueden absorber más radiación en comparación con suelos arenosos debido a su mayor capacidad de retención de agua. Es por esto que los suelos arcillosos tienen una constante dieléctrica más alta que los suelos arenosos, lo que significa que son mejores conductores de electricidad y pueden polarizarse más fácilmente en respuesta a un campo eléctrico (Perez, 2001).

La correlación entre la humedad del suelo (HS), la constante dieléctrica real (RDC), contenido de arcillas y arenas, para el modelo de Hallikainen con los datos originales y sintéticos se muestran a continuación:

Figura 19. Matriz de correlación modelo de Hallikainen Original y Sintético Hacienda Sevilla.

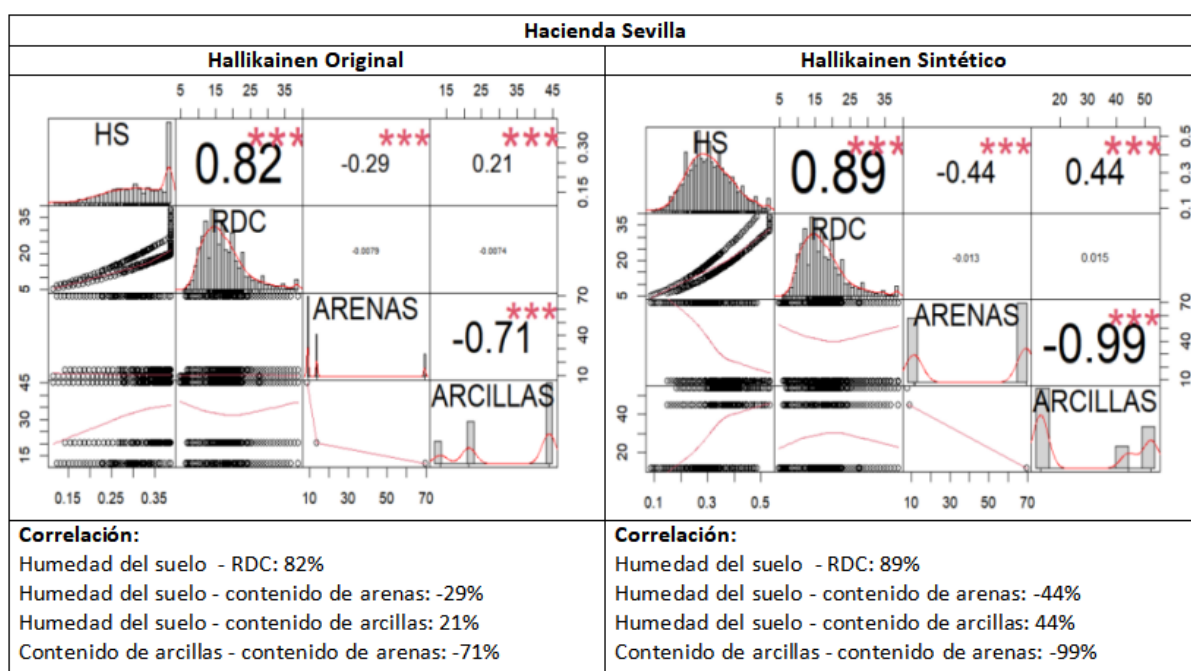


Figura 20. Matriz de correlación modelo de Hallikainen Original y Sintético Hacienda Holanda

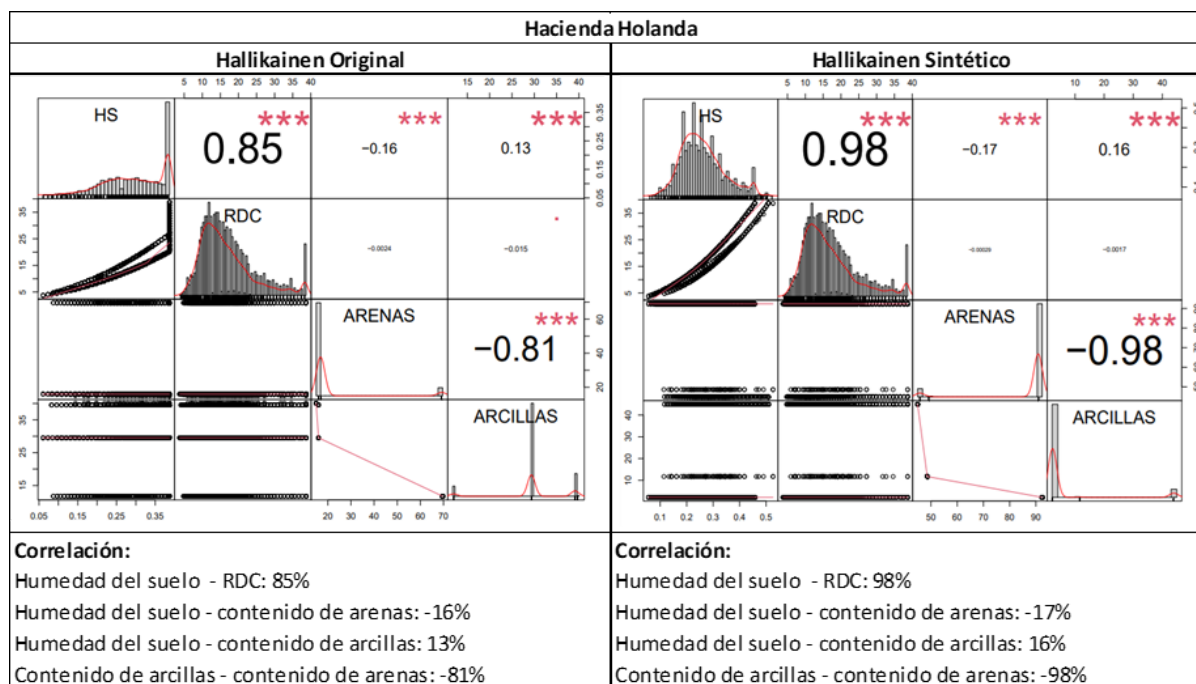
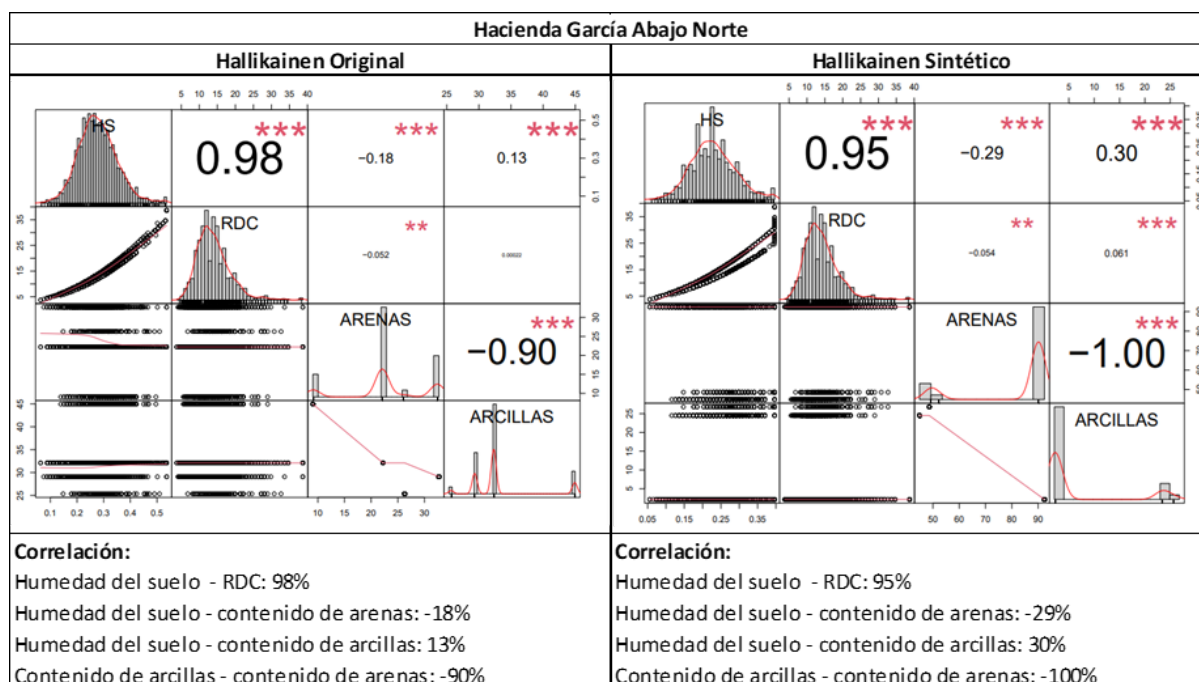


Figura 21. Matriz de correlación modelo de Hallikainen Original y Sintético Hacienda García Abajo Norte



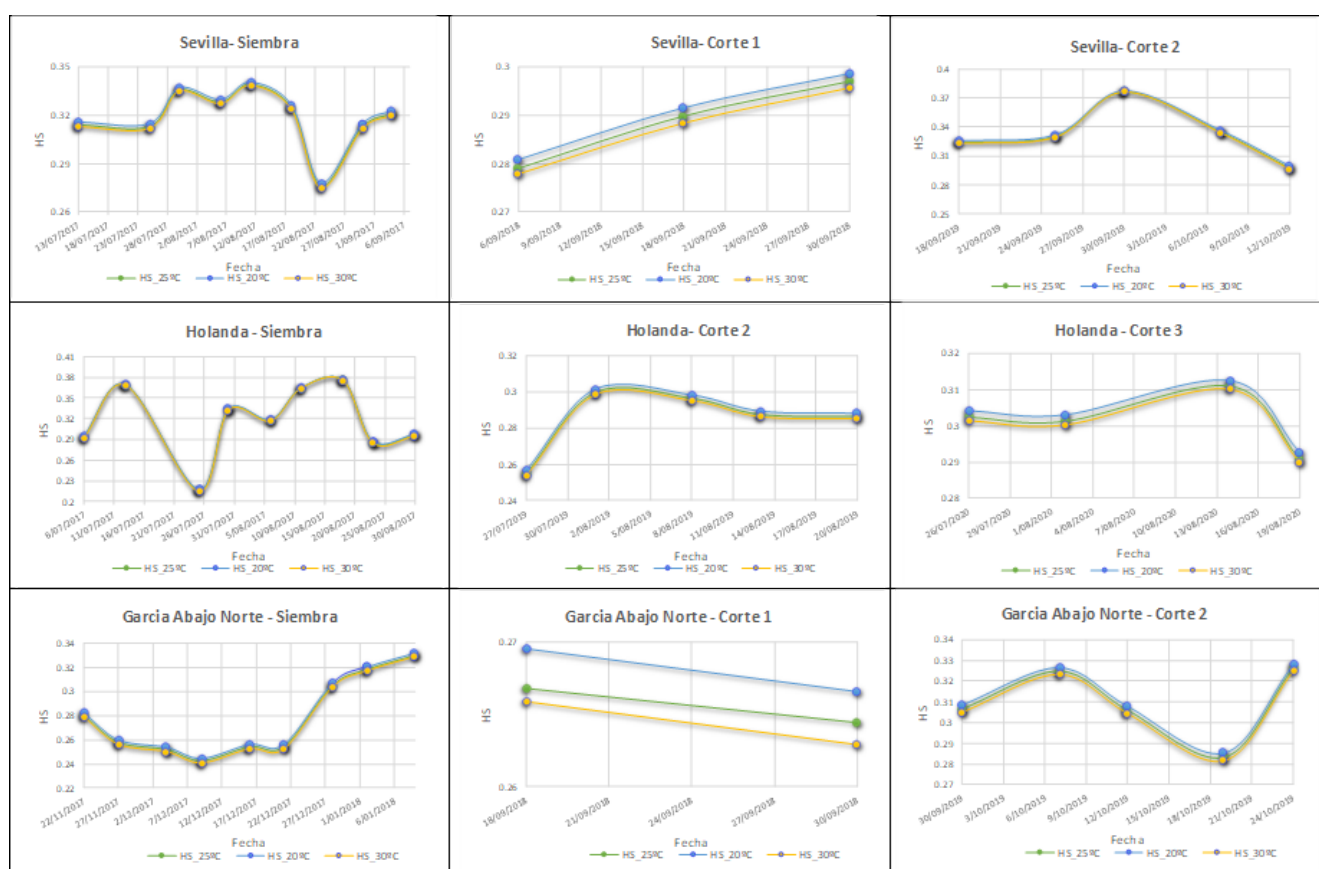
Como se evidencia en los resultados anteriores, la humedad del suelo está directamente relacionada con el RDC obteniendo una correlación directa del 82% al 98%, con un nivel de significancia del 0.001. En el caso de la humedad del suelo y el contenido de arenas, se tiene una correlación inversa de 16% al 44%, mientras que la humedad del suelo y contenido de arcillas la correlación es directa del 13% al 44%. Estos resultados revelan que la constante dieléctrica real está influenciada por el contenido de humedad del suelo, lo cual, a su vez, está vinculado con la composición granulométrica de dicho suelo.

Las variaciones en la humedad del suelo se observan de manera más significativa en los suelos con mayor contenido de arcillas, lo cual se debe a que sus partículas ofrecen áreas superficiales más extensas para la adsorción de agua y, además, muestran una mayor capacidad de atracción hacia las moléculas de agua, debido a que según la textura del suelo se originan por las diferencias en la cantidad de agua adherida a las partículas superficiales en los distintos tipos de suelos. Las moléculas de agua que están unidas o adheridas a estas superficies tienen una capacidad limitada para moverse en comparación con las moléculas de agua que no están ligadas y que tienen mayor libertad de movimiento, lo que resulta en un efecto dieléctrico inferior en comparación con el agua libre en los espacios porosos del suelo (Solorza, 2013). En general, esto demuestra que el modelo de Hallikainen está relacionado con la textura del suelo, lo cual responde a la sensibilidad del modelo para este parámetro.

Influencia de la temperatura del suelo en la recuperación de la humedad

La temperatura y la humedad del suelo son variables que están interconectadas y tienen un impacto significativo en diversos procesos naturales. La ecuación de Mironov describe la relación entre la temperatura y la humedad. Para evaluar la influencia de la temperatura en el suelo con el modelo de Mironov, se determinó la humedad del suelo a 25°C basándose en los resultados obtenidos del piso térmico según la UCS, donde se encuentran las zonas de estudio y la variación de la humedad a temperaturas de 20 °C y 30 °C establecidas para las diferentes suertes en estudio. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las suertes:

Figura 22. Humedad promedio modelo Minorov ante cambios de temperatura



Según las gráficas anteriores, se evidencia que la humedad del suelo tiene una relación inversa con la temperatura. Adicionalmente, la tabla 13 muestra el porcentaje de variación de cada hacienda y ciclo del cultivo:

Tabla 13. Porcentaje de variación de humedad ante cambios de temperatura

Porcentaje de variación de la humedad del suelo					
Hacienda	Temperatura °C	% Variación			
		Siembra	Corte 1	Corte 2	Corte 3
Sevilla	20	0.47%	0.60%	0.37%	-
	30	0.32%	0.45%	0.25%	-
Holanda	20	0.43%	0.75%	0.60%	0.53%
	30	0.31%	0.56%	0.43%	0.37%
Garcia	20	0.76%	0.91%	0.68%	-
Abajo norte	30	0.56%	0.46%	0.47%	-

En la tabla anterior se evidencia que la humedad promedio varía de 0.37% a 0.91% cuando la temperatura del suelo pasa a ser de 25°C a 20°C y de 0.25% a 0.56% cuando pasa a ser de 25°C a 30°C respectivamente.

La Tabla 14 muestra los resultados de los coeficientes de variación ante los cambios de temperatura:

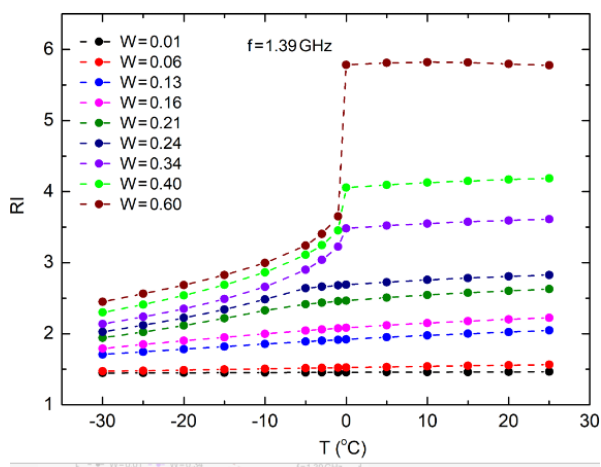
Tabla 14. Coeficiente de variación de humedad ante cambios de temperatura.

Coeficiente de variación					
Hacienda	Temperatura °C	Siembra	Corte 1	Corte 2	Corte 3
Sevilla	20	0.33	0.43	0.26	-
	30	0.23	0.32	0.18	-
Holanda	20	0.30	0.53	0.43	0.37
	30	0.22	0.40	0.30	0.26
Garcia Abajo norte	20	0.54	0.64	0.48	-
	30	0.40	0.32	0.34	-

Para este caso, se evidencia que el coeficiente de variación ante el cambio de temperatura a 20°C fue de 0.26 a 0.64 y para el cambio de temperatura a 30°C fue de 0.18 a 0.40, lo cual demuestra que la humedad tuvo mayor variación en la temperatura de 20°C.

La base de datos DDOAS (Savin et al., 2020) presenta información del comportamiento dieléctrico de suelos orgánicos árticos. El DDOAS se creó a partir de las mediciones dieléctricas de siete muestras de suelos ricos en materia orgánica recolectadas en varias partes de la tundra ártica, donde se relaciona la temperatura y la humedad del suelo, donde muestra que el índice de refracción (IR) a diferentes temperaturas y varios niveles de humedad no varía significativamente para temperaturas de 0 a 25°C aproximadamente; mientras que para temperaturas entre -30 a 0°C el índice de refracción aumenta a medida que aumenta la temperatura, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. El índice de refracción vs la temperatura de la muestra de suelo para varios niveles de humedad a una frecuencia de $f=1.39$ GHz.



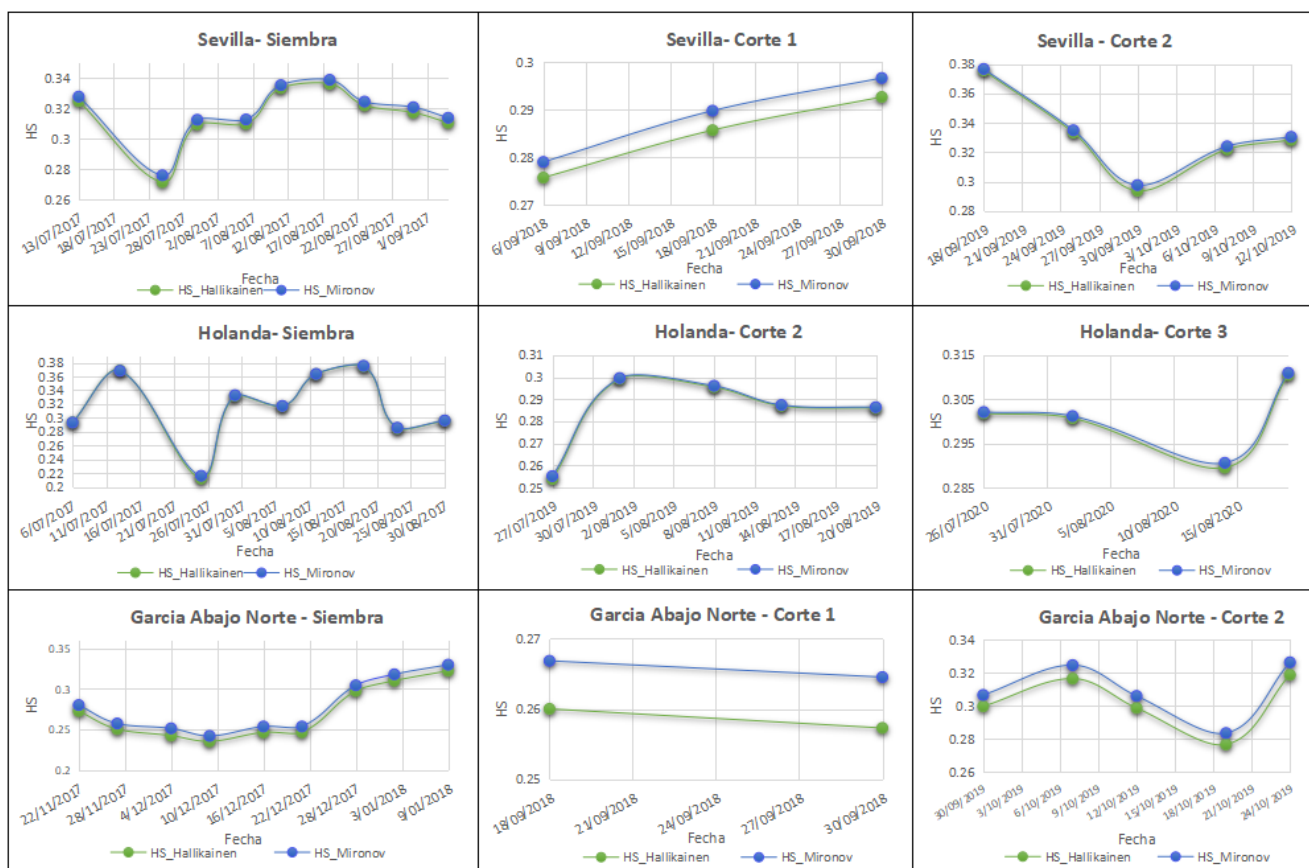
Fuente: Savin et al., 2020. Dielectric database of organic Arctic Soils (DDOAS)

Esta información se considera relevante como punto de referencia para contrastar los resultados obtenidos en este estudio, dado que no se halló información concerniente a suelos minerales, tal y como se detalla en este estudio, que pudiera contribuir de manera significativa al análisis comparativo expuesto. Los resultados obtenidos del DDOAS muestran que la temperatura influye en la humedad del suelo, dependiendo de cómo sea su variación. Sin embargo, se considera que la temperatura del suelo es un factor de menor importancia comparado con otros como la textura y mineralogía que tienen más impacto en la constante dieléctrica del suelo (Alvarez, 2005).

Influencia de los modelos Hallikainen y Mironov en la recuperación de la humedad

Para enfoques de recuperación de humedad del suelo, según Suman et al. 2021, los modelos dieléctricos proporcionados por Mironov, Dobson, Wang & Schmugge y Hallikainen, tienen los mejores rendimientos debido a su fácil implementación y al requisito de relativamente menos parámetros de entrada para el cálculo de diversas propiedades del suelo, como la temperatura terrestre y fracciones de arena y arcilla en comparación con otros modelos. Para este estudio se analizaron los modelos de Hallikainen y Mironov. Con el fin de comparar la variabilidad de la HS respecto a los modelos de Hallikainen y Mironov se muestra a continuación las gráficas de la HS promedio obtenidas para las diferentes áreas de estudio y ciclos del cultivo:

Figura 24. Humedad promedio de los modelos Hallikainen y Minorov para las diferentes haciendas y sus respectivos ciclos del cultivo.



La figura 24 muestra los datos de humedad del suelo promedio obtenidos mediante el uso de los modelos Hallikainen y Mironov correspondientes a la hacienda de Sevilla, Holanda y García Abajo Norte, respectivamente. Los datos de HS corresponden a condiciones de igual textura para cada una de las zonas de estudio. Para la hacienda Sevilla el periodo de estudio fue del 6 julio de 2017 - 12 octubre de 2019. Durante el periodo del 13 al 18 de septiembre de 2019 se registró una humedad volumétrica promedio de aproximadamente 0.3755, siendo está la mayor durante el periodo de estudio. Este intervalo temporal corresponde al ciclo de corte 2 del cultivo y se encuentra climatológicamente asociado a la fase de transición existente entre la segunda temporada seca y la segunda temporada lluviosa del valle del río Cauca, según lo establece calendario pluviométrico de Cenicaña. El menor valor de humedad volumétrica promedio fue correspondiente al periodo del 13 al 25 de julio del 2017 con un valor de 0.2714. Este lapso de tiempo coincide con el ciclo de siembra del cultivo y se ubica en la fase de la segunda temporada seca.

Para la Hacienda de Holanda Naranjo el periodo de estudio fue del 1 de julio de 2017 - 19 de agosto de 2020. El periodo del 11 al 18 de agosto de 2017 la humedad volumétrica promedio fue de

aproximadamente 0.3747, siendo está la mayor durante el periodo de estudio. El menor valor de humedad volumétrica promedio fue correspondiente al periodo del 13 al 25 de julio del 2017 con un valor de 0.2121. Este lapso de tiempo coincide con el ciclo de siembra del cultivo y se ubica en la fase correspondiente a la segunda temporada seca.

Para la Hacienda García Abajo Norte el periodo de estudio fue del 15 de noviembre de 2017 - 24 de octubre de 2019. El periodo del 19 al 24 de octubre de 2019 la humedad volumétrica promedio fue de aproximadamente 0.3187, siendo está la mayor durante el periodo de estudio. Este intervalo temporal corresponde al ciclo de corte 2 del cultivo y se encuentra climatológicamente asociado a la fase de la segunda temporada lluviosa del valle del río Cauca. El menor valor de humedad volumétrica promedio fue correspondiente al periodo del 4 al 9 de diciembre del 2017 con un valor de 0.2356. Este lapso de tiempo coincide con el ciclo de siembra y se encuentra asociado a la fase de transición entre la segunda temporada lluviosa y la primera temporada seca.

Con el fin de conocer el comportamiento espacial de la humedad del suelo de cada una de las suertes, en las figuras 25, 26, 27, 28, 29 y 30 se muestran los mapas correspondientes a los días de mayor y menor humedad hallada por los modelos de hallikainen y mironov.

- Días menor humedad

Figura 25. Mapa día de menor humedad Hacienda Sevilla.

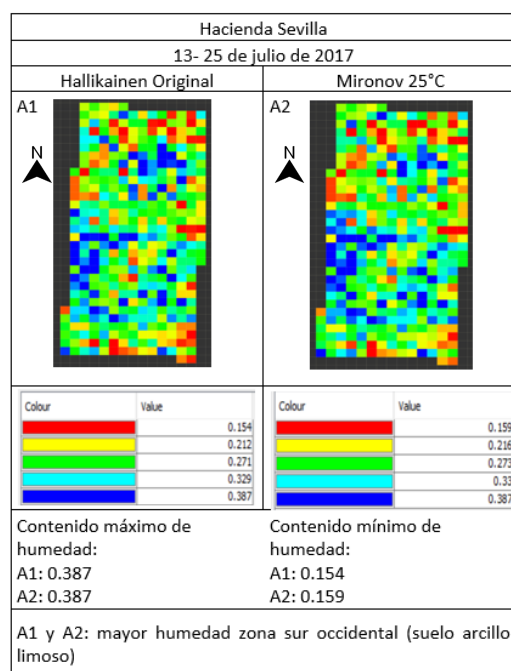


Figura 26. Mapa día de menor humedad Hacienda Holanda

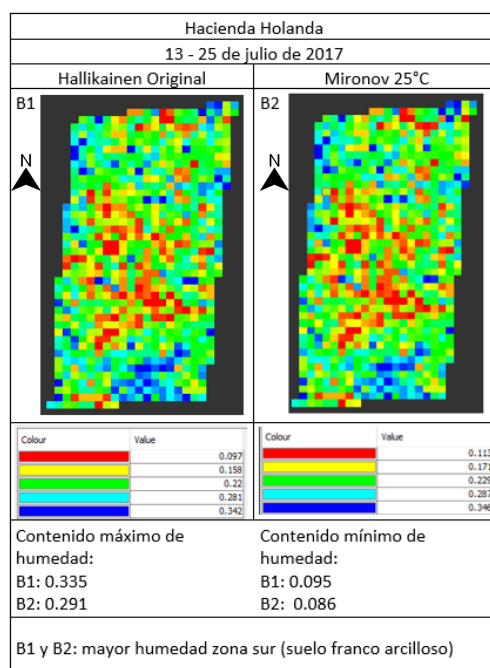
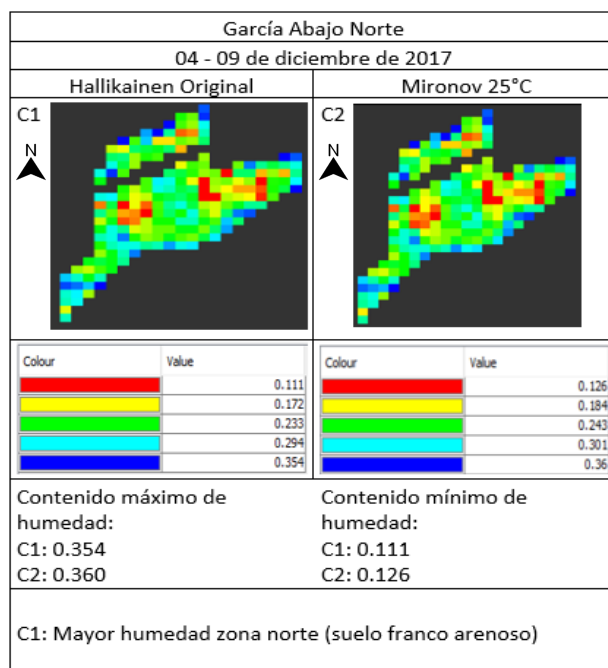


Figura 27. Mapa día de menor humedad Hacienda García



- Días mayor humedad

Figura 28. Mapa día de mayor humedad Hacienda Sevilla

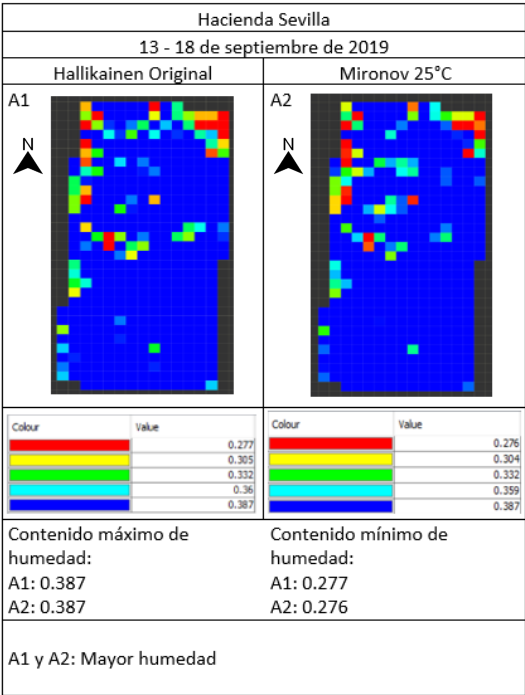


Figura 29. Mapa día de mayor humedad Hacienda Holanda

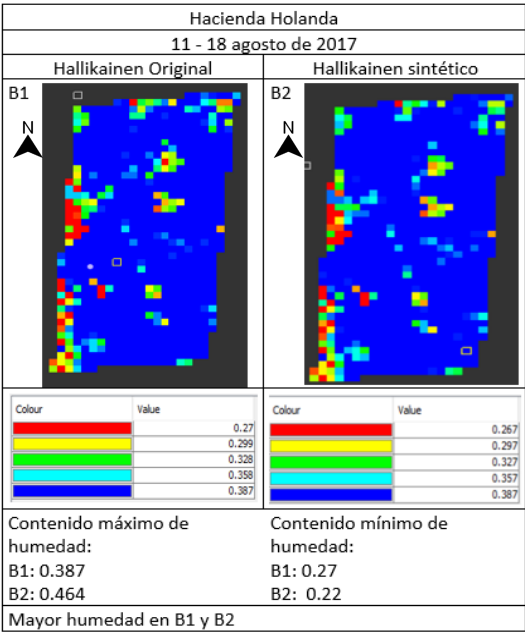
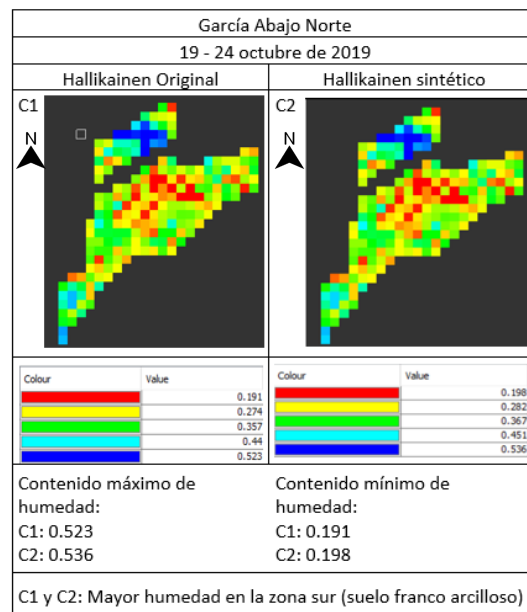


Figura 30. Mapa día de mayor humedad Hacienda García



A partir de los gráficos anteriores se observa que la variabilidad de los datos de humedad en los mapas raster de cada suerte no tienen un cambio visible que sea significativo o que muestre diferencias cualitativas entre el modelo de Hallikainen y el modelo de Mironov. Sin embargo, en los datos obtenidos en las gráficas de la figura 24 se puede apreciar que para la hacienda Sevilla, Holanda y García Abajo Norte en sus tres períodos, los datos de HS obtenidos por el modelo de Mironov en gran parte de las fechas de estudio son mayores a los del modelo de Hallikainen. Por lo que se deduce que los resultados son sensibles a la selección de los modelos dieléctricos.

La recuperación de HS del modelo Hallikainen indica una distribución menor que la del modelo de Mironov. Según Suman et al., 2021, la razón principal de que el modelo Hallikainen tiene valores menores de humedad podrían atribuirse a que es un modelo empírico que sigue una descripción matemática de la relación entre las propiedades dieléctricas y otras características de un medio, especialmente el contenido volumétrico de agua y la información de textura, además de que se basa en datos experimentales de permitividad del suelo para condiciones de cinco tipos de suelo, por lo que la recuperación de la HS se limita a estos. Las ecuaciones matemáticas empleadas por los modelos empíricos no necesariamente tienen una base física y están limitadas por los conjuntos de datos experimentales que se utilizaron para desarrollar la relación. Singh et al. 2018, informó que el modelo empírico de Hallikainen produce resultados inconsistentes y que podría deberse al hecho de que las relaciones empíricas son generalmente específicas del sitio y varían mucho según los parámetros locales del suelo. El posible resultado más alto de Mironov puede atribuirse a una relación física más precisa, puesto que se evaluó en varios tipos de suelos y fue mejorado varias

veces con el fin de tener en cuenta el efecto de la temperatura del suelo, este modelo fue construido y validado con base en datos del suelo que abarcan todo el rango de textura, por tanto, puede ser adecuado para aplicaciones más amplias. (Yayong et al., 2019).

Para evaluar la intensidad y pertinencia de la relación entre los valores de humedad de suelo obtenidos por los modelos de Hallikainen y Mironov, se calculó el valor de R^2 para cada una de las suertes en estudio.

Figura 31. Coeficiente de determinación para los valores de humedad del suelo obtenidos por los modelos de mironov y hallikainen de la Hacienda Sevilla.

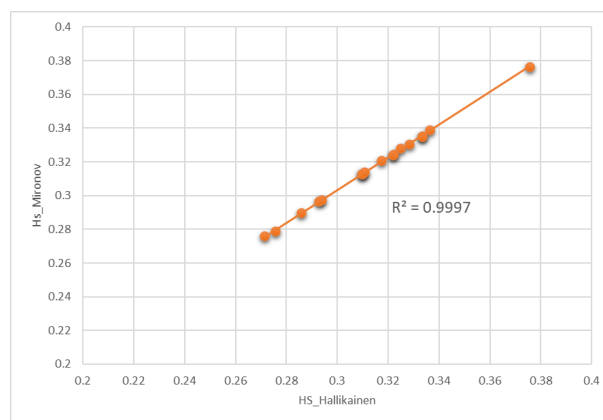


Figura 32. Coeficiente de determinación para los valores de humedad del suelo obtenidos por los modelos de mironov y hallikainen de la Hacienda Holanda.

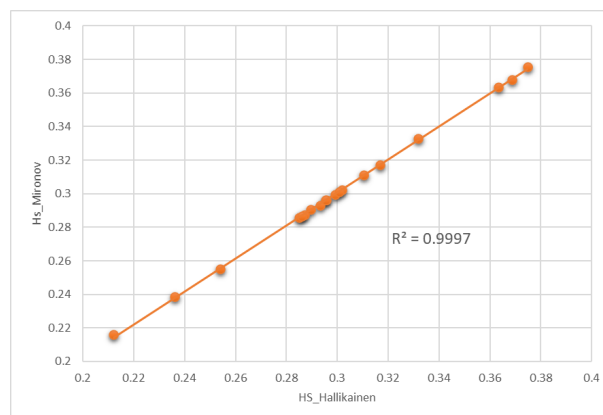
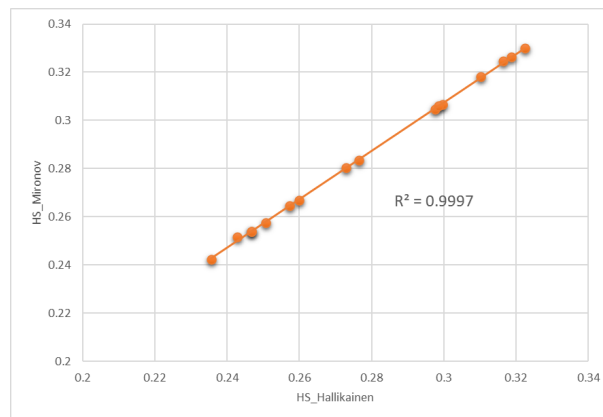


Figura 33. Coeficiente de determinación para los valores de humedad del suelo obtenidos por los modelos de mironov y hallikainen de la Hacienda García Abajo Norte.



Aunque existen diferencias en los datos promedios de la HS obtenidos por los dos modelos, estos presentan cierta relación y una distribución similar. Esto se evidencia, por ejemplo, en la gráfica 24, donde la mayoría de las fechas de los ciclos productivos de las suertes muestran una tendencia similar en los datos. Así mismo en las gráficas 31, 32 y 33 se puede observar que el valor de R^2 es de 0.9997 para todas las suertes analizadas, este valor indica una fuerte relación entre los valores de humedad del suelo predichos por el modelo de Hallikainen y Mironov. El elevado coeficiente de determinación sugiere que aproximadamente el 99.97% de la variabilidad en la variable dependiente puede ser explicada por el modelo. Este hallazgo respalda la capacidad del modelo para prever y explicar los niveles de humedad del suelo en las condiciones específicas consideradas en este estudio.

Es fundamental tener en cuenta que estos valores de R^2 son pertinentes para las condiciones particulares contempladas en la investigación. La consistencia en la tendencia de los datos y el alto R^2 fortalecen la confianza en la capacidad del modelo de Hallikainen y Mironov para explicar la variabilidad en la humedad del suelo bajo las condiciones específicas examinadas.

Con el propósito de evaluar la congruencia de los datos generados por los modelos, se calculó la diferencia de humedad promedio entre estos. Se observó que para la Hacienda Sevilla la menor discrepancia se registró del 13 al 18 de septiembre de 2019 (día de mayor humedad promedio), mientras que el día con mayor discrepancia corresponde del 13 al 25 de julio del 2017 (día de menor valor de humedad promedio). Para la Hacienda Holanda la menor discrepancia se registró del 1 al 6 de julio de 2017 y el día con mayor discrepancia corresponde del 13 al 25 de julio del 2017 (día de menor valor de humedad promedio). Respecto a la Hacienda García Abajo Norte la

menor discrepancia se registró del 25 al 30 de septiembre de 2019, mientras que el día con mayor discrepancia corresponde del 27 de noviembre al 12 de diciembre de 2017. Se identificó para la hacienda Sevilla una relación inversa entre el valor de humedad promedio y la magnitud de la discrepancia, es decir, entre mayor sea el valor de humedad menor es el valor de la discrepancia y viceversa. Sin embargo este patrón no se repite de manera consistente para las otras dos haciendas, lo que impide asociar estos resultados a una tendencia específica relacionada con el valor de humedad promedio.

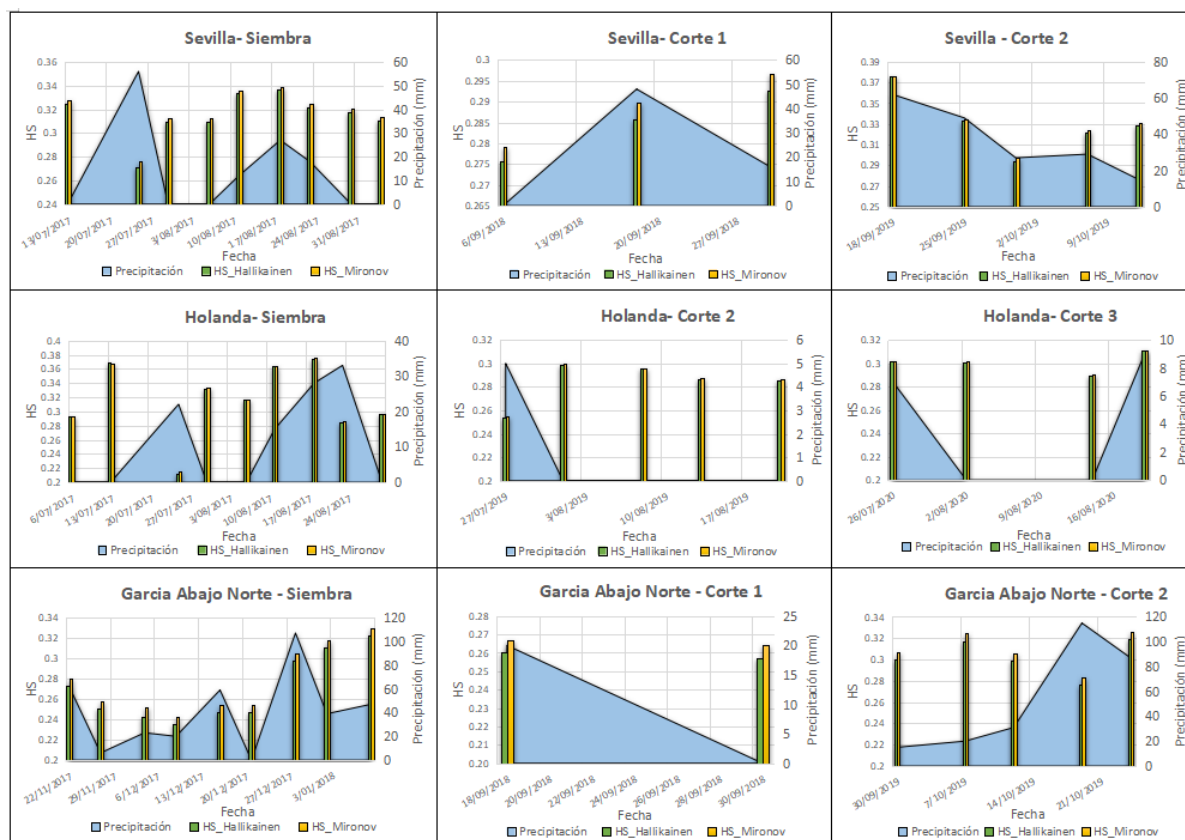
A pesar de las discrepancias en los datos promedio, la relación y uniformidad en la distribución de los datos, junto con el elevado R^2 , respaldan la validez y aplicabilidad del modelo para explicar la variabilidad en la humedad del suelo en el contexto específico de este estudio, por esta razón, ambos modelos son herramientas valiosas para la recuperación de la humedad del suelo y su elección depende de la aplicación específica, la disponibilidad de datos y las condiciones ambientales del área de estudio.

Relación entre la precipitación y la recuperación de la humedad del suelo

Partiendo del análisis de la información de precipitación obtenida del meteoportel-clima de CENICAÑA, se planteó estudiar el fenómeno para los meses que incluyen los datos de las imágenes satelitales Sentinel-1B, teniendo en cuenta que el análisis de la información de precipitación se realizó para determinar periodos húmedos y secos para la zona de estudio y así centrar de manera más detallada los meses a evaluar durante el año.

La figura 34 presenta la relación de la precipitación con los datos estimados de humedad para cada una de las zonas de estudio.

Figura 34. Variaciones temporales en las mediciones de la precipitación del suelo y estimaciones de la humedad del suelo en las suertes de estudio.



En la figura 34 se observa que para algunas fechas existe cierto grado de relación entre los eventos de precipitación y la humedad del suelo. Es posible diferenciar que después de un evento de lluvia significativo aumenta la humedad, y en los meses donde la precipitación es baja o no hubo eventos significativos también se presenta una disminución en la humedad del suelo. Por ejemplo, para la hacienda de Sevilla en el periodo de siembra, en las fechas del 6 al 18 de agosto de 2017 la HS fue incrementando junto con la precipitación y del 18 al 30 de agosto la HS fue disminuyendo de la misma manera que lo hizo la precipitación, esto comprueba que se relacionan de manera coherente los eventos de precipitación y los valores estimados de humedad del suelo.

Con el fin de comparar la variabilidad de la humedad entre un periodo seco y uno húmedo se muestran las gráficas para cada hacienda.

Figura 35. Mapa período seco y húmedo para la Hacienda Sevilla

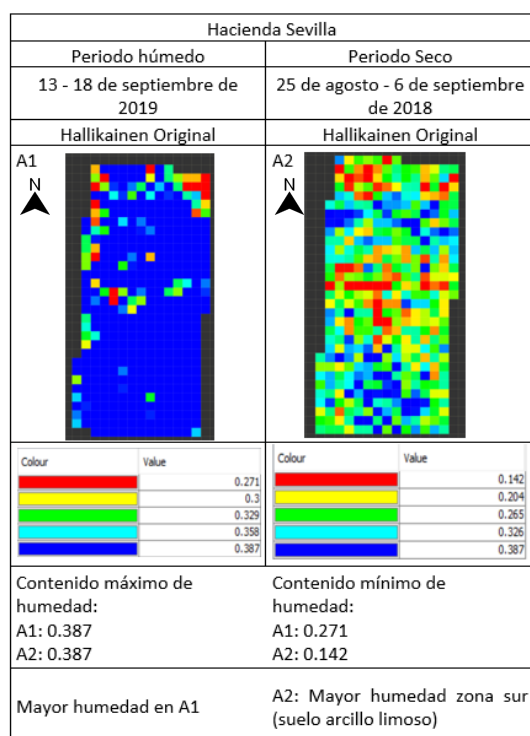


Figura 36. Mapa período seco y húmedo para la Hacienda Holanda

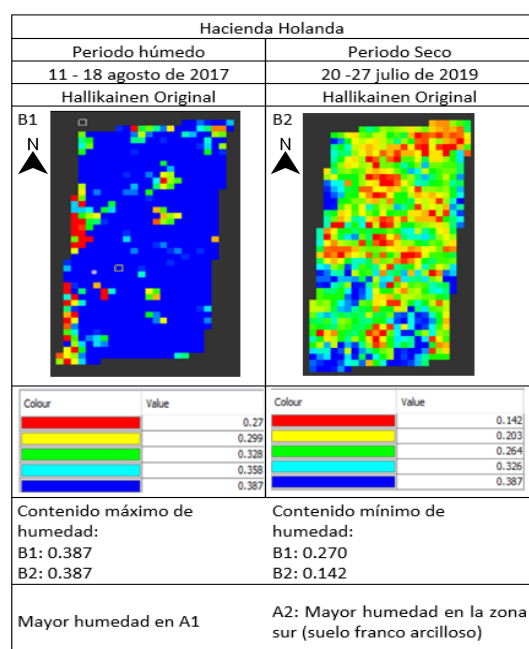
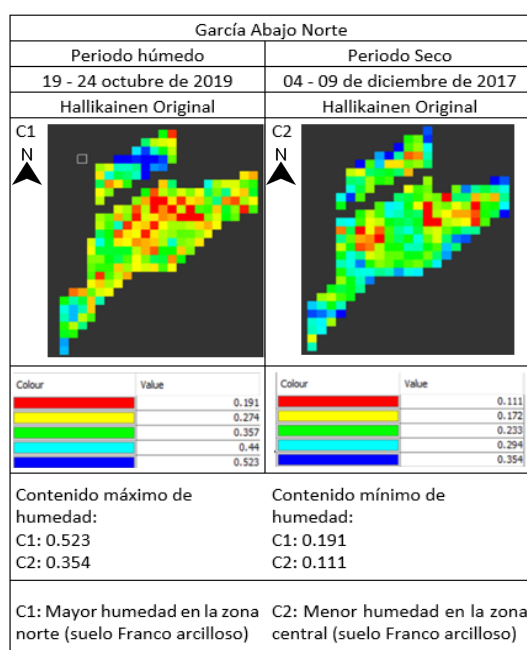


Figura 37. Mapa período seco y húmedo para la Hacienda Holanda



Se observa en las figuras 35, 36 y 37 que la variación de la humedad en la serie de mapas es cualitativamente distintiva durante el periodo seco y húmedo. Haciendo la comparación para la suerte de la hacienda Sevilla, los eventos en aquellos días en los que no hubo precipitaciones del 25 de agosto al 6 de septiembre del 2018 que corresponden a la fase de transición entre la segunda temporada seca y la segunda temporada lluviosa, presentan zonas con contenido de humedad más bajo que las otras fechas. Por el contrario en el periodo húmedo del 13 al 18 de septiembre del 2019, en el cual hubo datos de precipitación más frecuentes, que corresponden igualmente a la fase de transición; se obtienen mayores valores de humedad. Utilizando el valor promedio de cada mapa, se comprueba que la fecha del periodo seco presenta menor humedad en el suelo con valores aproximados de 0,2687, mientras que para la fecha con eventos de lluvias la media se aproxima a valores de 0,3737.

Comparando la suerte de la hacienda García abajo Norte, los eventos en aquellos días en los que no hubo lluvia significativa del 4 al 9 de diciembre de 2017 que corresponde a la fase de terminación de la segunda temporada lluviosa y entra a la fase de transición, presentan zonas con contenido de humedad más bajo que las otras fechas. Por el contrario en el periodo húmedo del 19 al 24 de octubre del 2019 en el que se tuvieron datos de precipitación más frecuentes y que corresponden a la fase de la segunda temporada lluviosa; se obtienen mayores valores de humedad. Utilizando la media de los valores de cada imagen comprueba que la fecha del periodo seco presenta menor humedad en el suelo con valores aproximados de 0.2513, mientras que para la fecha con eventos de lluvias la media se aproxima a valores de 0.3224.

Comparando los eventos climáticos sucedidos en la suerte de la hacienda Holanda Naranjo, los días en los que no hubo lluvia significativa fueron del 20 al 27 de septiembre de 2019 correspondiente a la fase de transición entre la segunda temporada seca y la segunda temporada lluviosa, presentan zonas con contenido de humedad más bajo que las otras fechas. Por el contrario en el periodo húmedo del 11 al 18 de agosto del 2017 en el cual se tuvieron datos de precipitación más frecuentes; se obtienen mayores valores de humedad. El valor promedio de los datos de cada imagen comprueban que la fecha del periodo seco presenta menor humedad en el suelo con valores aproximados de 0,2467, mientras que para la fecha con eventos de lluvias la media se aproxima a valores de 0,3716.

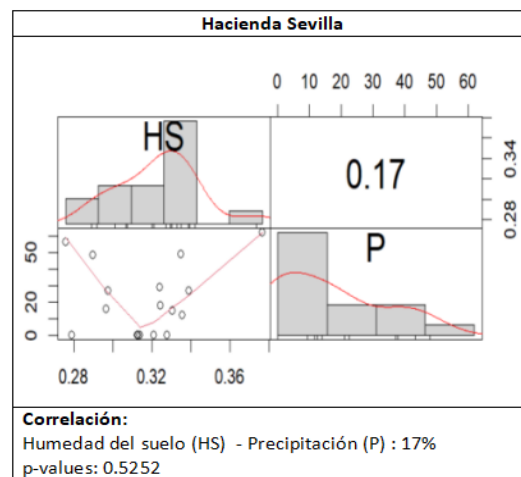
Los datos de precipitación y humedad del suelo presentados en las gráficas 35, 36 y 37 muestran una tendencia general a estar relacionados, respaldando la hipótesis de que, en términos generales, la precipitación conduce a un aumento de la humedad del suelo. Específicamente, para las fechas mencionadas anteriormente, la metodología empleada ha logrado establecer de manera efectiva la conexión entre los eventos de precipitación y la humedad del suelo, presentando además de manera coherente la distribución espacial de la humedad en los mapas correspondientes.

Aunque se identificó una relación entre la HS-P en algunas fechas, hubo otras fechas en las que no se observó tal relación. En la gráfica 34 se puede visualizar que algunas fechas tienen una relación negativa, por ejemplo para la hacienda de García Abajo Norte en la fecha del 12 al 19 de octubre de 2019 hubo un pico de precipitación de 115 mm, sin embargo, la humedad del suelo disminuyó, lo que indica que esta reacciona a la precipitación de manera opuesta.

Estas relaciones negativas fueron identificadas en otros estudios y se atribuyen a diferentes factores ambientales y climáticos (Cook et al. 2006 ; Guillod et al. 2015). Por ejemplo, Yang et al., 2018 especificaron que las relaciones negativas ocurren en lugares que tienen mecanismos físicos limitantes, como tener una humedad del suelo limitada o tener un bajo aporte de energía. Adicional a estos factores, existen otros escenarios que no se tuvieron en cuenta pero que pueden alterar la humedad del suelo aunque no haya ocurrido un periodo de lluvia y se da a partir del riego. Las suertes en estudio son áreas de producción de caña de azúcar por lo que son tierras de cultivo que mantienen constantes dinámicas de riego (Sehler et al., 2019).

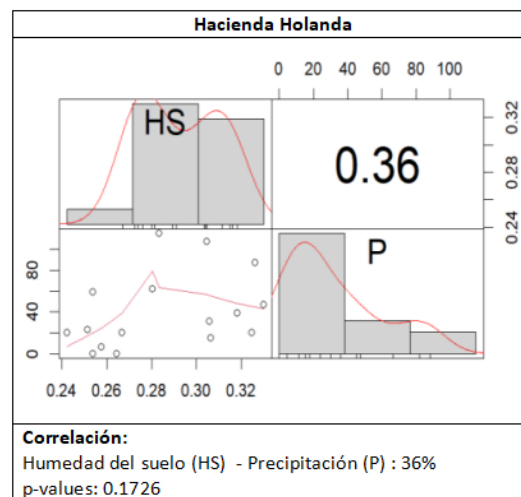
Con el propósito de respaldar la anterior idea de que no siempre a mayor precipitación hay mayor humedad, se generaron gráficos de correlación de Pearson. A continuación se muestran los gráficos correspondientes a cada suerte de las tres haciendas en estudio.

Figura 38. Matriz de correlación humedad del suelo y precipitación para la Hacienda Sevilla.



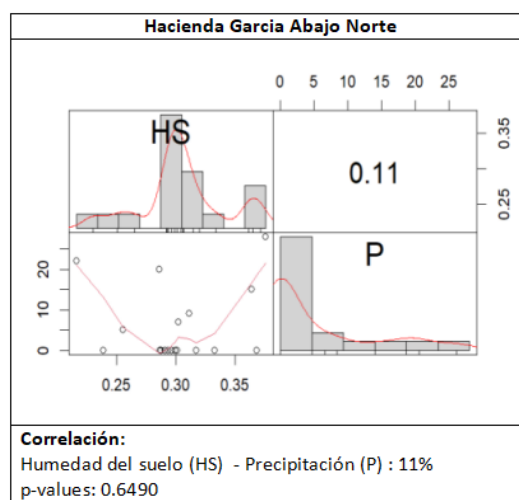
Como se evidencia en la figura 38, la humedad del suelo y la precipitación para la suerte 003A de la hacienda Sevilla, tiene una relación positiva del 17% y un valor de significancia de 0.5252. Esto demuestra que la correlación es débil y no es estadísticamente significativa según el valor p proporcionado.

Figura 39. Matriz de correlación humedad del suelo y precipitación para la Hacienda Holanda.



La figura 39, muestra la correlación existente entre la humedad del suelo y la precipitación para la suerte 006 de la hacienda Holanda y tiene una relación positiva del 36% y un valor de significancia de 0.1726. Esto demuestra que la correlación es positiva y moderada, pero no es estadísticamente significativa según el valor p proporcionado.

Figura 40. Matriz de correlación humedad del suelo y precipitación para la Hacienda García Abajo Norte.



La figura 40, muestra la correlación existente entre la humedad del suelo y la precipitación para la suerte 009 de la hacienda García Abajo Norte y tiene una relación positiva del 11% y un valor de significancia de 0.6490. Esto demuestra que la correlación es positiva pero muy débil, y no es estadísticamente significativa según el valor p proporcionado.

Aunque es común esperar una relación positiva entre la humedad del suelo y la precipitación, hay varios factores que pueden influir en que esta relación no sea siempre claramente positiva o que, incluso, pueda presentar variaciones negativas en algunos casos. Uno de los factores clave es la textura del suelo, debido a que el porcentaje de arcilla, limo o arena presente, puede afectar cómo el suelo retiene la humedad. Algunos suelos pueden retener agua de manera más efectiva que otros, lo que podría influir en la relación entre la precipitación y la humedad del suelo.

Otro factor relevante es la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas que pueden contrarrestar el efecto de la precipitación. En tales casos, la humedad del suelo puede no reflejar completamente la cantidad de precipitación recibida, puesto que parte de esa agua puede perderse por estos procesos. HS. (Boe, 2013). Una cuestión importante en el estudio de humedad del suelo y la precipitación (HS-P) es qué tan fuerte es el impacto local de la ET-P. Esto se debe principalmente al hecho de que la evapotranspiración-precipitación puede ser no local. La mayoría de los estudios que se han realizado para evaluar estas variables han asumido que HS-P es predominantemente local, pero esta suposición no ha sido justificada, por lo que se pueden dar errores al interpretar estos como datos puntuales. (Wei y Dirmeyer, 2012). Aunque es una variable de gran importancia para entender la interacción real que existe entre la precipitación, en este estudio no se tuvo en cuenta.

Adicionalmente la presencia y tipo de vegetación también desempeñan un papel crucial en esta relación. En áreas con una densa cobertura vegetal, la transpiración de las plantas puede influir en la humedad del suelo independientemente de la cantidad de precipitación registrada. La vegetación actúa como un regulador adicional, afectando la disponibilidad de agua en el suelo de manera más compleja. (Sehler, 2019). Estas consideraciones resaltan la complejidad de la interacción entre la precipitación y la humedad del suelo, subrayando la importancia de tener en cuenta factores como la textura del suelo, los procesos de evaporación y transpiración, así como la presencia y tipo de vegetación al interpretar las variaciones en la humedad del suelo en respuesta a la precipitación.

Es importante tener en cuenta que la relación entre la precipitación y la humedad del suelo puede ser altamente variable y dependerá de las características específicas del entorno. Los estudios detallados y el monitoreo continuo son esenciales para entender mejor estas complejidades y para adaptar modelos que puedan explicar la variabilidad observada.

Variabilidad espacial de la zona de estudio a partir de semivariogramas

Con el objeto de conocer el comportamiento espacial de la humedad del suelo en la zona de estudio, se muestran en las figuras 41, 42 y 43 los semivariogramas correspondientes para cada una de las haciendas en el periodo de estudio. Estos semivariogramas se determinaron a partir de los datos de humedad obtenidos por el modelo de Mironov, debido a que en los análisis anteriores se definió que este modelo es el más adecuado.

Figura 41. Semivariogramas de la humedad del suelo Hacienda Sevilla

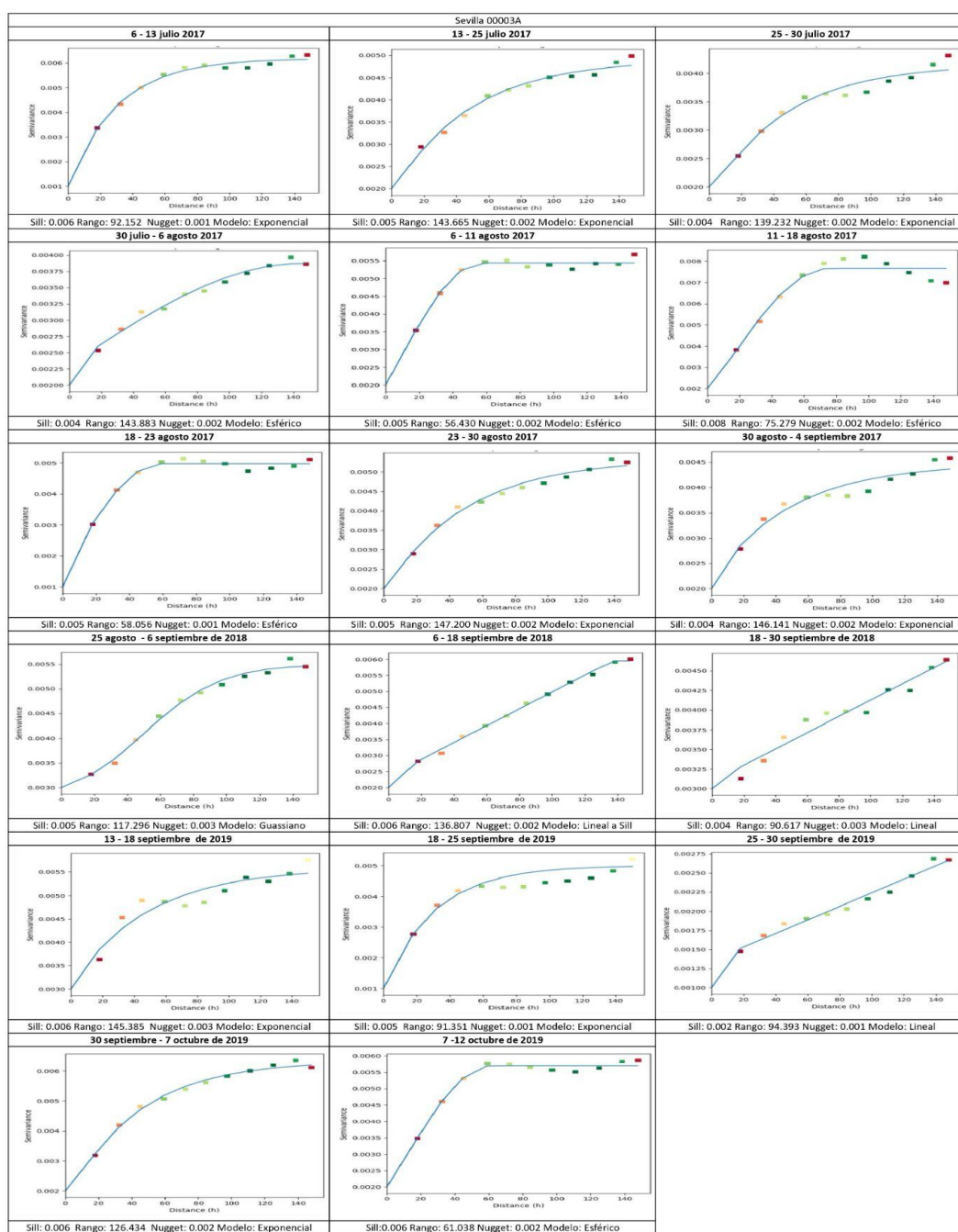


Figura 42. Semivariogramas de la humedad del suelo Hacienda Holanda

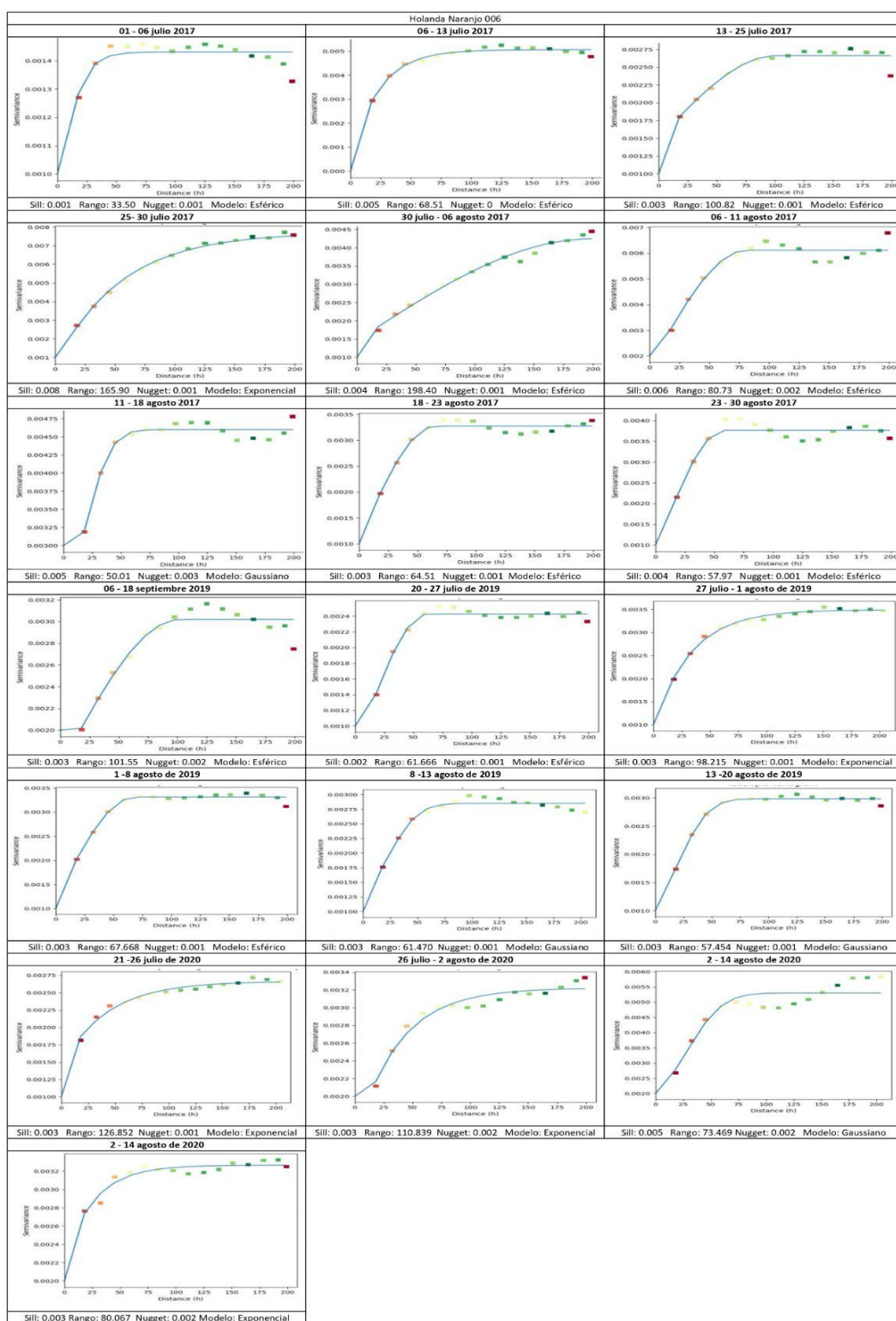
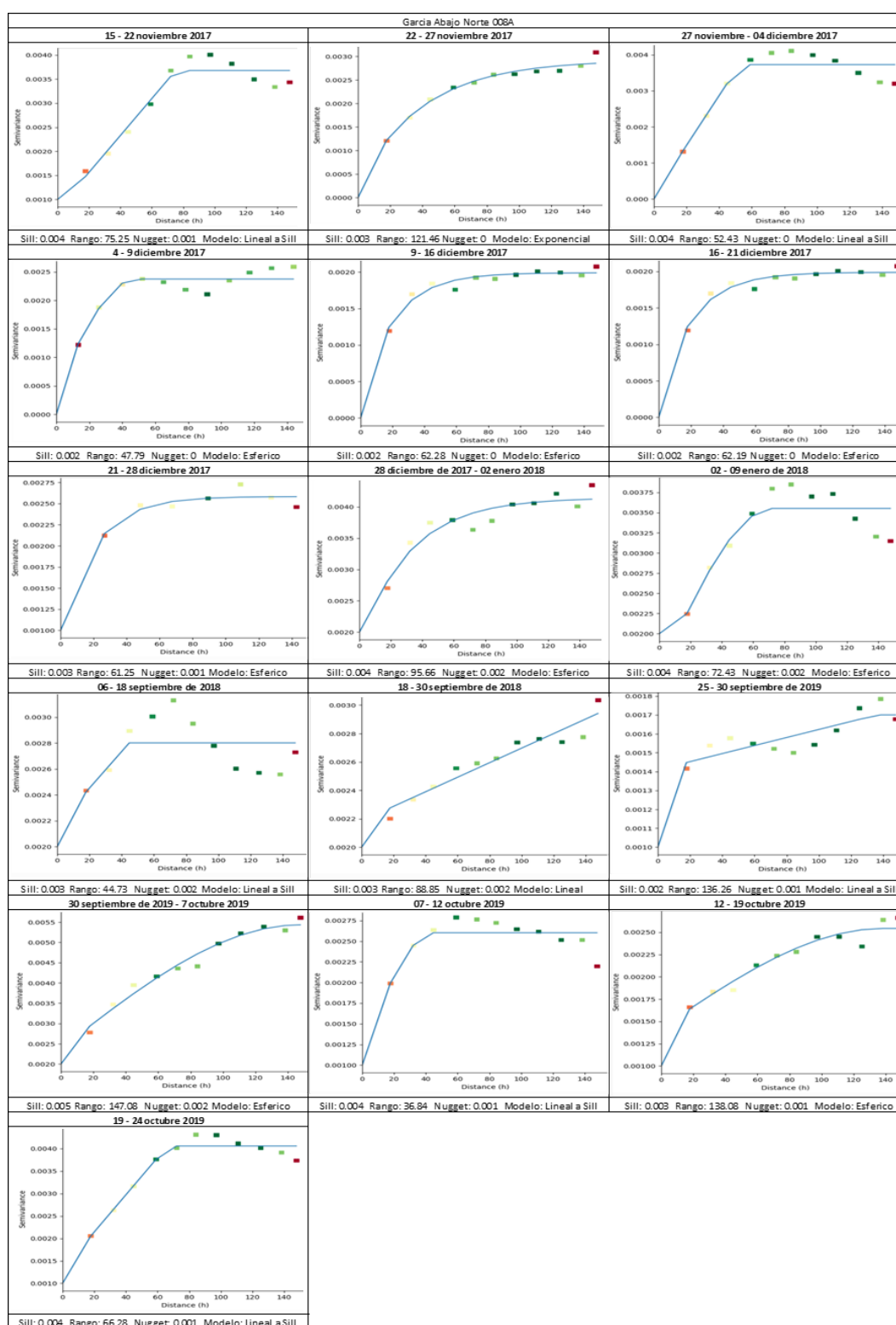


Figura 43. Semivariogramas de la humedad del suelo Hacienda García Abajo Norte



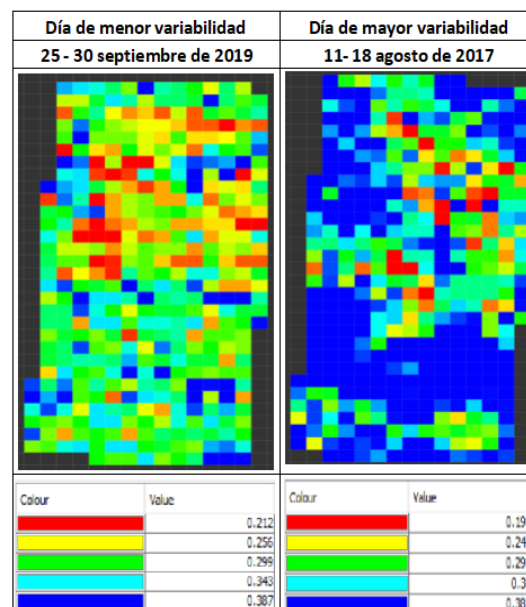
Al estimar los semivariogramas para todos los periodos de estudio se obtiene una regresión significativa para todas las haciendas, dado que al aumentar la distancia, aumenta la variabilidad, esto en la mayoría de los casos, demostrando así una fuerte dependencia espacial (Jaramillo, 2002).

Los semivariogramas se ajustaron a los modelos teóricos más usados: esférico, exponencial, Gaussiano y lineal, adicional se tomó como referencia el valor de R^2 , para poder determinar cual de los modelos se acoplaban a los datos. Siendo más precisos y repetitivos los modelos exponencial y esférico.

El rango para la hacienda Sevilla varía entre los 56 y 147 metros, el efecto nugget varió entre 0.001 a 0.003 (cm³ agua/ cm³ suelo) y se obtuvieron valores de sill entre 0.002 a 0.008. Para el caso de la hacienda Holanda Naranjo el rango varía entre los 33 y 198 metros, el efecto nugget varió entre 0 a 0.002 (cm³ agua/ cm³ suelo) y se obtuvieron valores de sill entre 0.001 a 0.008. El rango para la suerte de la hacienda García Abajo Norte, varía entre los 36.84 a 147.08 metros, el efecto nugget varió entre 0 a 0.002 (cm³ agua/ cm³ suelo) y se obtuvieron valores de sill entre 0.002 a 0.005; Los resultados sugieren que, para diferentes valores de cero en los nuggets, hay una variabilidad espacial local presente a distancias inferiores a la distancia de muestreo (Giraldo, s.f).

Teniendo en cuenta que la humedad del suelo se ve afectada por diferentes factores como la textura, estructura del suelo, clima, entre otros, se analiza específicamente los variogramas para los días de mayor y menor variabilidad de la humedad en el suelo, en las figuras 44, 45 y 46 se muestran los mapas respectivos.

Figura 44. Mapas de HS con menor y mayor variabilidad espacial en Hacienda Sevilla.



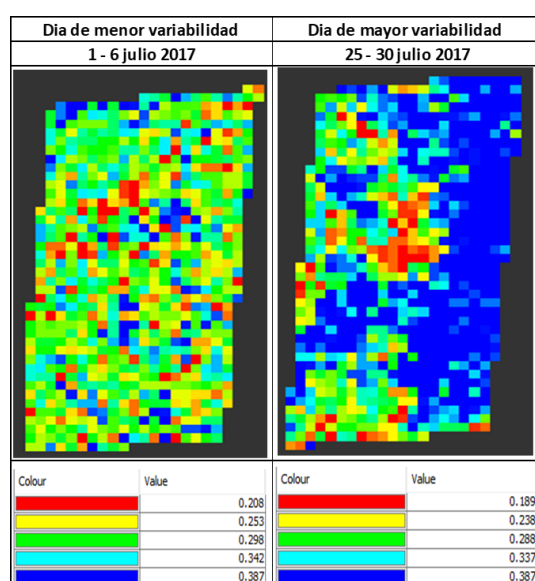
La figura 44 corresponde a la hacienda Sevilla, el periodo con menor variabilidad abarca del 25 al 30 de septiembre de 2019. Este periodo coincide con la transición entre la segunda temporada seca y la segunda temporada lluviosa. Los parámetros derivados del semivariograma son los

siguientes: rango de 94.39 metros, sill de 0.002, nugget de 0.001 y modelo lineal. A pesar de tener menor variabilidad según los parámetros mencionados, la presencia de un modelo lineal sugiere que no hay una dependencia espacial significativa. Esto se debe a que la pendiente pronunciada en este modelo indica un cambio rápido en la variabilidad a medida que aumenta la distancia, indicando una transición abrupta entre los valores en el espacio. En consecuencia, la variabilidad observada en este periodo no está vinculada de manera significativa con la proximidad espacial de las observaciones, ya que el modelo lineal implica una falta de dependencia espacial.

En el período del 11 al 18 de agosto de 2017, que corresponde a la segunda temporada seca, se observa que los parámetros del semivariograma fueron los siguientes: rango de 75.28 metros, sill de 0.008, nugget de 0.002, y se ajustó un modelo esférico. La presencia de un rango de 75.28 metros indica que la variabilidad espacial es significativa hasta esa distancia. A distancias superiores al rango, la variabilidad se estabiliza en un valor máximo de 0.008, indicando que se ha alcanzado la máxima amplitud de variabilidad espacial. El nugget con un valor de 0.002, sugiere que existe variabilidad a escalas muy pequeñas.

El modelo esférico implica que la transición entre los valores en el espacio es más gradual en comparación con el modelo lineal descrito anteriormente. La pendiente más suave característica de un modelo esférico contribuye a una transición más gradual en la variabilidad a medida que aumenta la distancia espacial. Además, al tener un rango más pequeño en comparación con el modelo lineal indica que la variabilidad se estabiliza a distancias menores.

Figura 45. Mapas de HS con menor y mayor variabilidad espacial en Hacienda Holanda Naranjo.

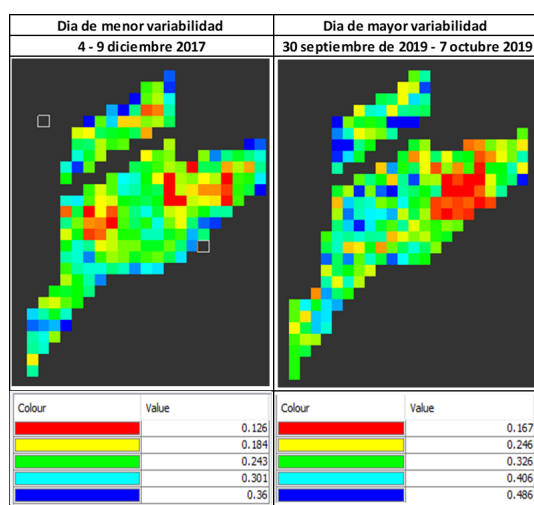


La figura 45 corresponde a la hacienda Holanda Naranjo, el periodo con menor variabilidad abarca del 1 al 6 de julio de 2017. Este periodo coincide con la segunda temporada seca. Los parámetros derivados del semivariograma son los siguientes: rango de 33.50 metros, el sill fue de 0.001, el nugget de 0.001 y se ajustó al modelo esférico. Los datos anteriores evidencian que el semivariograma alcanza un valor de sill a una distancia corta, lo que sugiere que existe una dependencia espacial fuerte y una correlación significativa entre los datos a esas distancias.

En el período del 25 al 30 de julio 2017, que corresponde a la segunda temporada seca, se observa que los parámetros del semivariograma fueron los siguientes: rango de 165.90 metros, sill de 0.008, nugget de 0.001, y se ajustó un modelo exponencial. Esto indica que existe una dependencia espacial débil, ya que el rango es notable, lo que se refiere a que los valores de los datos pueden variar considerablemente entre ubicaciones cercanas, y la estructura espacial de los datos es menos predecible.

En general estos resultados muestran que a pesar de que el periodo del 01 al 06 de julio de 2017 tiene una variabilidad “menor”, al tener un modelo esférico puede indicar una variabilidad espacial más abrupta y limitada a distancias específicas, ya que alcanza su variabilidad máxima de manera más rápida y luego se estabiliza, mientras que el semivariograma del 25 al 30 de julio de 2017, al ajustarse al modelo exponencial puede indicar una variabilidad más extendida, ya que la variación continúa aumentando a medida que la distancia se incrementa, aunque de manera más gradual que en el modelo esférico.

Figura 46. Mapas de HS con menor y mayor variabilidad espacial en Hacienda García Abajo Norte



La figura 46 corresponde a la hacienda García Abajo Norte, el periodo con menor variabilidad abarca del 4 al 9 de diciembre de 2017. Este periodo coincide con la transición entre la segunda

temporada lluviosa y la primera temporada seca. Los parámetros derivados del semivariograma son los siguientes: el rango fue de 47.79 metros, el sill fue de 0.002, el nugget de 0 y se ajustó al modelo esférico, estos resultados indican que la variabilidad espacial es significativa hasta una distancia de 47.79 metros, donde la semivarianza alcanza su máximo de 0.002. La ausencia de un nugget indica que no hay variabilidad a escalas más pequeñas que la distancia de muestreo.

En el periodo del 30 septiembre al 07 octubre de 2019, que corresponde a la transición entre la segunda temporada seca y la segunda temporada lluviosa, se observa que los parámetros del semivariograma fueron los siguientes: rango de 147.08 metros, sill de 0.005, nugget de 0.002, y se ajustó un modelo esférico. Esto muestra que la variabilidad espacial es significativa hasta una distancia de 147.08 metros, donde la semivarianza alcanza su máximo de 0.005. Y al tener un nugget de 0.002 evidencia que hay variabilidad a escalas más pequeñas que la distancia de muestreo.

En general, los resultados obtenidos de los semivariogramas muestran que la variabilidad espacial de la humedad del suelo no está directamente relacionada con los valores promedios de humedad, debido a que se pueden tener áreas con valores promedio altos y tener una baja variabilidad espacial, o viceversa. La variabilidad espacial está más relacionada con cómo los valores individuales de humedad del suelo se distribuyen en el espacio. Un área con valores de humedad del suelo más uniformes tendrá menor variabilidad espacial, mientras que una región con valores de humedad más dispersos tendrá mayor variabilidad espacial.

Conclusiones

- La manipulación de 62 imágenes SAR en la zona de estudio resultó en la generación de 260 mapas de humedad del suelo utilizando diversas técnicas de procesamiento. La implementación de este procedimiento se fundamentó en la metodología detallada en este estudio, la cual dio lugar a una guía específica diseñada para simplificar su comprensión y facilitar la reproducción de datos. A pesar de su aparente simplicidad, esta metodología se revela como una herramienta de gran utilidad en el análisis de la humedad del suelo, estableciendo conexiones con propiedades como la textura y temperatura del suelo. Esto permite obtener estimaciones de manera fácil y rápida, resaltando su aplicabilidad potencial en la investigación de esta variable esencial.
- Los resultados revelan una diferencia significativa en la humedad promedio entre el modelo Hallikainen con los datos originales de arcillas y arenas y el modelo que emplea mapas sintéticos para las diversas haciendas. En la mayoría de los casos, los suelos con predominio

de arcillas y limos, caracterizados en los mapas originales, exhiben una mayor capacidad de retención de humedad en comparación con los suelos arenosos y franco arenosos presentes en los mapas sintéticos. Además, se evidencia una relación directa notable entre la humedad del suelo y el coeficiente de reflexión dieléctrica (RDC), con correlaciones entre el 82% y el 98%, y un nivel de significancia del 0.001. Esta relación corresponde a la textura del suelo, mostrando una correlación inversa con el contenido de arenas y una correlación directa con el contenido de arcillas, lo que enfatiza la sensibilidad del modelo de Hallikainen a la textura del suelo.

- La metodología para determinar la sensibilidad del modelo de ecuación integral ante los cambios de temperatura en el suelo, evidencia una relación significativa entre esta y la humedad del suelo, destacando que las variaciones térmicas influyen en la humedad. Al disminuir la temperatura de 25°C a 20°C, la humedad varía de 0.37% a 0.91%, mientras que al aumentar de 25°C a 30°C, la variación es de 0.25% a 0.56%. Además, al analizar los coeficientes de variación, se constata que ante la disminución a 20°C, estos oscilan entre 0.26 y 0.64, mientras que al aumentar a 30°C, se sitúan entre 0.18 y 0.40. Estos resultados indican una mayor variabilidad en la humedad a una temperatura de 20°C en comparación con la variación observada a 30°C. Sin embargo, es importante resaltar que, a pesar de esta influencia, se considera que la temperatura del suelo posee un papel menos determinante en comparación con otros factores como la textura y mineralogía del suelo, los cuales ejercen un impacto más sustancial en la constante dieléctrica del suelo.
- Mediante el análisis del cambio de la humedad del suelo con respecto a las precipitaciones y teniendo en cuenta los datos diarios de precipitación y los datos estimados de la humedad del suelo, se observó que para unas fechas específicas existe una relación, en donde se evidencia un aumento de la humedad en el suelo cuando los eventos de lluvia son notables, y una disminución de esta cuando existe déficit de lluvia. Sin embargo, a pesar de estas observaciones, los valores de correlación de Pearson indican una relación moderada a baja para la humedad del suelo y la precipitación. Para una comprensión más completa de estas relaciones, se recomienda la inclusión de otras variables como la evapotranspiración, la escorrentía, la textura del suelo, la presencia o ausencia de vegetación.
- Comparando los resultados obtenidos por los modelos de Hallikainen y Mironov para predecir la Humedad del Suelo (HS), se observan diferencias en los datos promedio. Los

resultados del modelo de Mironov fueron mayores a los de hallikainen, indicando sensibilidad a la elección del modelo. Los valores menores obtenidos por Hallikainen se atribuyen a que es un modelo empírico y está restringido para un número limitado de texturas del suelo, mientras que Mironov, con una base física más precisa y se ha evaluado en un gran número de texturas de suelo. A pesar de las diferencias en los promedios, se destaca una consistente relación y distribución similar en la tendencia de los datos. La fuerte correlación (R^2 de 0.9997) respalda que alrededor del 99.97% de la variabilidad en la HS puede explicarse por el modelo de Mironov, consolidando su capacidad predictiva. Estas conclusiones son específicas para este estudio, y la validez del modelo puede variar en otros contextos. La consistencia en la tendencia de los datos, respaldada por análisis estadísticos, fortalece la confianza en la capacidad de los modelos para explicar la variabilidad en la HS bajo condiciones particulares, resaltando la importancia de considerar el entorno al evaluar y aplicar dichos modelos. Estas conclusiones proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y decisiones relacionadas con el manejo y monitoreo de la humedad del suelo en contextos similares.

- El procedimiento que se llevó a cabo en este estudio ofrece la posibilidad de no utilizar datos in-situ cómo se realizó en este trabajo, puesto que con las imágenes adquiridas del Sentinel 1 se pueden obtener datos de humedad en la zona que se requiera. Sin embargo, se recomienda validar el método con datos en campo para determinar su confiabilidad en la estimación de la humedad. Este estudio representa un primer paso hacia la aplicación de estas nuevas herramientas, proporcionando una base importante para futuras investigaciones y validaciones que respalden su uso. En el futuro, esto puede contribuir a mejorar el bienestar social y la calidad de vida de la comunidad al abordar las consecuencias negativas de la alta humedad en el suelo de manera más eficiente.
- Los resultados derivados de los semivariogramas revelan que la variabilidad espacial de la humedad del suelo no sigue una relación directa con los valores promedios. La presencia de áreas con valores promedio elevados no garantiza una alta variabilidad espacial, y viceversa. En cambio, la variabilidad espacial parece estar intrínsecamente ligada a la distribución puntual de los valores individuales de humedad del suelo en el espacio. Áreas con una distribución más uniforme de la humedad exhiben menor variabilidad espacial, mientras que regiones con una dispersión más amplia de los valores de humedad manifiestan una mayor variabilidad espacial. Esta conclusión subraya la importancia de considerar la distribución

espacial de los datos para comprender la complejidad de la variabilidad espacial de la humedad del suelo de manera más precisa.

Recomendaciones

- Dentro del marco de este estudio, se recomienda para futuras investigaciones profundizar en el análisis de la variabilidad espacial de la humedad del suelo. Este enfoque más detallado podría proporcionar información crucial para la toma de decisiones prácticas en campo, como la determinación del balance hídrico o la identificación de la frecuencia óptima de riego. Estos análisis complementarios podrían enriquecer significativamente el conocimiento y mejorar la aplicabilidad de los resultados obtenidos en este estudio.
- Se sugiere realizar pruebas en campo para consolidar y enriquecer los datos preliminares obtenidos en este estudio. Este proceso no solo permitirá ampliar el alcance de los resultados, sino que también posibilitará la validación y ajuste necesario para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados.
- Se propone generar y publicar mapas de humedad del suelo disponibles para toda la comunidad, que contengan estimaciones de error aceptables para escalas semidetalladas, utilizando la base de datos de suelos semidetalladas de la CVC y detalladas de Cenicaña, esto con el objetivo de generar información precisa y útil sobre la humedad del suelo, utilizando datos confiables y de alta calidad. La disponibilidad de estos mapas ayudará a informar y respaldar decisiones relacionadas con la gestión del agua y la agricultura en la región, beneficiando a diversos actores, desde agricultores hasta planificadores ambientales y autoridades locales. Este proyecto representará una valiosa contribución al conocimiento científico y al desarrollo sostenible de la región.
- Se sugiere emplear otras bandas usando datos de imágenes radar, como la banda L, que tiene una longitud de onda de aproximadamente 1-2 metros, permitiendo una mejor penetración a través de la vegetación densa y los suelos, lo que posibilita obtener información sobre la estructura interna y la humedad del suelo debajo de la cubierta vegetal. El uso de esta banda permite corregir la variabilidad observada en los datos capturados. Esta variabilidad, en muchos casos, puede ser causada por la presencia de residuos de materia orgánica o vegetación. El uso combinado de múltiples bandas permitirá mejorar la calidad de

los datos y facilitará la identificación y corrección de factores que afectan la interpretación precisa de las imágenes de radar en aplicaciones específicas.

- Aunque el título del proyecto de grado describe una amplia área al establecer la "zona sur del Valle del río Cauca", el enfoque se centra en tres áreas específicas en municipios del norte del departamento del Cauca. Por lo que resultaría beneficioso generar un mapa de humedad del suelo para estos tres municipios, mostrando la potencialidad, aplicación o utilidad de esta información para la comunidad, en especial para el sector agrícola. Esto permitirá demostrar de manera más efectiva cómo la información detallada sobre la humedad del suelo puede beneficiar a los agricultores y otros actores clave en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua y el cultivo de cultivos en esta región específica del departamento del Cauca.

Referencias

- Acevo R. (2011). *Sistemas de teledetección activos y pasivos embarcados en sistemas aéreos no tripulados para la monitorización de la tierra*.
- Alvarez, J. (2005). *Evaluación de la aplicabilidad de la teledetección radar a la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas*.
- Álvarez J, Casalí J, González M, & López J. (2005). *Estimación de la humedad superficial del suelo mediante teledetección radar en presencia de una cubierta de cereal*.
- Arango, E. (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)”*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Arias, J. (2007). *Introducción al Análisis de Series Temporales* (Vol. 1). Universidad Complutense de Madrid.
- Arias, M., Notarnicola, C., Campo-Bescós, M. Á., Arregui, L. M., & Álvarez-Mozos, J. (2023). Evaluation of soil moisture estimation techniques based on Sentinel-1 observations over wheat fields. *Agricultural Water Management*, 287, 108422. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108422>
- Asocaña. (2022). *Sector Agroindustrial de la Caña*. Sector Agroindustrial de La Caña En Colombia. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
- Asocaña. (2023). *Informe anual 2022-2023*.
- Barrett, B. W., Dwyer, E., & Whelan, P. (2009). Soil moisture retrieval from active spaceborne microwave observations: An evaluation of current techniques. *Remote Sensing*, 1(3), 210–242. <https://doi.org/10.3390/rs1030210>

- Benninga, H. J. F., van der Velde, R., & Su, Z. (2020). Sentinel-1 soil moisture content and its uncertainty over sparsely vegetated fields. *Journal of Hydrology* X, 9, 100066. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROA.2020.100066>
- Bindlish, R., & Barros, A. P. (2000). Multifrequency Soil Moisture Inversion from SAR Measurements with the Use of IEM. *Remote Sensing of Environment*, 71(1), 67–88. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00065-6)
- Boé, J. Modulación de las interacciones humedad-precipitación del suelo en Francia mediante circulación a gran escala. *Clim Dyn* 40, 875–892 (2013). <https://doi-org.bd.univalle.edu.co/10.1007/s00382-012-1380-6>
- Brocca, L., Tullo, T., Melone, F., Moramarco, T., & Morbidelli, R. (2012). Catchment scale soil moisture spatial–temporal variability. *Journal of Hydrology*, 422–423, 63–75. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.12.039>
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016>
- Cenicaña. (1995). *El Cultivo de la Caña en la Zona Azucarera de Colombia*. https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p3-394.pdf
- Cenicaña. (2015, March 17). *Drenaje de suelos cultivados con caña de azúcar*. <https://www.cenicana.org/drenaje-de-suelos-cultivados-con-cana-de-azucar/>
- Cenicaña. (2018). *Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 01-1940*.
- Chuvieco Salinero, E. (2006). *Teledetección ambiental : la observación de la tierra desde el espacio* (2ª ed. [act.]) [Book]. Ariel.
- Chymyrov, A., Betz, F., Baibagyshov, E., Kurban, A., Cyffka, B., & Halik, U. (2018). Floodplain Forest Mapping with Sentinel-2 Imagery: Case Study of Naryn River, Kyrgyzstan. In D. Egamberdieva & M. Öztürk (Eds.), *Vegetation of Central Asia and Environs* (pp. 335–347). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99728-5_14
- Clerici, N., Valbuena Calderón, C. A., & Posada, J. M. (2017). Fusion of sentinel-1a and sentinel-2A data for land cover mapping: A case study in the lower Magdalena region, Colombia. *Journal of Maps*, 13(2), 718–726. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1372316>
- CONADESUCA. (2015). *Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum L.)*.
- Cook, B. I., Bonan, G. B., & Levis, S. (2006). *Soil Moisture Feedbacks to Precipitation in Southern Africa*.

- Copernicus. (s. f.). Sentinel-1 SAR - Level-1. Retrieved April 08, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>
- Daza H. (2017). *Investigación en sensores remotos y sistemas de información geográfica*. 1–24.
- Díaz Vieira, M. A. (2002). Geoestadística Aplicada. Instituto de Geofísica, UNAM. 118-123
- Dobson, M. C., & Ulaby, F. T. (1986). Active Microwave Soil Moisture Research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(1), 23–36. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1986.289585>
- Dorigo, W. A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., Van Oevelen, P., Robock, A., & Jackson, T. (2011). The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1675–1698. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>
- Eltahir, E. A. B. (1998), A Soil Moisture–Rainfall Feedback Mechanism: 1. Theory and observations, *Water Resour. Res.*, 34(4), 765–776, doi:10.1029/97WR03499.
- Enciso, J., Porter, D., Evett, S., Périés, X., & Peters, T. (2012). Irrigation Monitoring with Soil Water Sensors. *Texas A&M AgriLife*, 1–11.
- European Space Agency. (n.d.-a). *Programa Copérnico*.
- European Space Agency. (n.d.). Introducing Sentinel-1. from https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Introducing_Sentinel-1
- European Space Agency. (n.d.). ESA. Radar de Apertura Sintética (SAR). Retrieved December 21, 2023, from https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMVKXF64RH_0.html
- European Space Agency. (n.d.-b). *Radiometric Calibration of Level-1 Products - Sentinel-1 SAR Technical Guide - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved February 11, 2022, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/radiometric-calibration-of-level-1-products?inheritRedirect=true>
- European Space Agency. (n.d.-c). *Sentinel-1 - Overview - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved February 11, 2022, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>
- European Space Agency. (2020). *SNAP (8.0)*. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- Fieuzal, R., Duchemin, B., Jarlan, L., Zribi, M., Baup, F., Merlin, O., Hagolle, O., & Garatuza-Payan, J. (2011). Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1117–1129. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1117-2011>

- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing.
- Forero Camacho, C. A., & Sánchez Jiménez, R. J. (2016). *Modelo productivo manejo agronómico de la caña de azúcar y producción agroindustrial de panela en la hoya de río Suárez*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13747#Yg63RCzT7kQ.mendeley>
- Foucras, M., Zribi, M., Albergel, C., Baghdadi, N., Calvet, J. C., & Pellarin, T. (2020). Estimating 500-m resolution soil moisture using sentinel-1 and optical data synergy. *Water (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030866>
- Fragoso-Campón, L., Quirós, E., Mora, J., Gutiérrez Gallego, J. A., & Durán-Barroso, P. (2020). Overstory-understory land cover mapping at the watershed scale: accuracy enhancement by multitemporal remote sensing analysis and LiDAR. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 75–88. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04520-8>
- Fung, A. K., Li, Z., & Chen, K. S. (1992). Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 356–369. <https://doi.org/10.1109/36.134085>
- Giraldo, R. (s.f.). *Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación* (Departamento de Estadística. Universidad Nacional de Colombia).
- Gharechelou, S., Tateishi, R., Sumantyo, J. T. S., & Johnson, B. A. (2021). Soil Moisture Retrieval Using Polarimetric SAR Data and Experimental Observations in an Arid Environment. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2021, Vol. 10, Page 711, 10(10), 711. <https://doi.org/10.3390/IJGI10100711>
- Gomes, E. N., Arellana, J., Franco, M., Grings, F., & More, E. (2019). Soil dielectric constant estimation using gnss reflectometry and the interference pattern technique. *Anales de La Asociación Física Argentina*, 30(4), 90–100. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2019.30.4.90>
- Guillod, B. P., Orlowsky, B., Miralles, D. G., Teuling, A. J., & Seneviratne, S. I. (2015). Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms7443>
- Hallikainen, M., Ulaby, F., Dobson, M., El-rayes, M., & Wu, L. (1985). Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(1), 25–34. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289497>
- Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A., & King, C. (2005). Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 96(1), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.008>
- IGAC. (2014). *INSTRUCTIVO. CÓDIGOS PARA LOS LEVANTAMIENTOS DE SUELOS*.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*.

- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., Gordon, C. T., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., Liu, P., Lu, C.-H., Malyshev, S., McAvaney, B., Mitchell, K., Mocko, D., Oki, T., Oleson, K., Pitman, A., ... Yamada, T. (2004). Regions of Strong Coupling between Soil Moisture and Precipitation. *Science*, 305(5687), 1138–1140. <http://www.jstor.org.bd.univalle.edu.co/stable/3837616>
- Kumar, S., & Bhagat, V. (2019). Remote Sensing Satellites for Land Applications: A Review. *Remote Sensing of Land*, 2(2), 96–104. <https://doi.org/10.21523/gcj1.18020203>
- Largaespada, K., & Henríquez, C. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Scielo*, 39, 137–147.
- Leo, D. (2015). Artículo de divulgación Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. In *AGROMENSAJES* (Vol. 41).
- Lira, J. (2002). *Sistema Radar de Imágenes*. Geofísica UNAM.
- MADR. (2021). *Cadena Agroindustrial de la panela*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/2019-12-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Martínez-Fernández, J., & Ceballos, A. (2005). Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *Journal of Hydrology*, 312(1), 28–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.007>
- Merzouki, A., & McNairn, H. (2015). A Hybrid (Multi-Angle and Multipolarization) Approach to Soil Moisture Retrieval Using the Integral Equation Model: Preparing for the RADARSAT Constellation Mission. [Http://Dx.Doi.Org.Bd.Univalle.Edu.Co/10.1080/07038992.2015.1104629](http://Dx.Doi.Org.Bd.Univalle.Edu.Co/10.1080/07038992.2015.1104629), 41(5), 349–362. <https://doi.org/10.1080/07038992.2015.1104629>
- Molina Montes, F. D., & Quiñonez Castro, F. G. (2021). *Análisis, diseño e implementación de un Banco de prácticas para el uso de antenas de la Banda C, KU, VHF Y UHF*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20806>
- Muñoz, F. (2009). *Importancia del agua en la nutrición de los cultivos*.
- Murillo Sandoval, P. J., Carbonell González, J. A., Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia., & Colombia. Departamento Administrativo de Ciencia, T. e I. (2012). *Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia*. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.
- Nasser, Z., Abedali, A. & Alkanaani, H. (2023). Reliability of smart noise pollution map. *Noise Mapping*, 10(1), 20220167. <https://doi.org/10.1515/noise-2022-0167>
- Perez, M. (2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Ponnurangam, G. G., Jagdhuber, T., Hajnsek, I., & Rao, Y. S. (2016). Soil moisture estimation using hybrid polarimetric SAR data of RISAT-1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2033–2049. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2494860>
- Punithraj, G., Pruthviraj, U., & Shetty, A. (2020). Surface Soil Moisture Retrieval Using C-Band Synthetic Aperture Radar (SAR) over Yanco Study Site, Australia—A Preliminary Study. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 33, 107–121. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7067-0_8
- Punithraj, G., Umesh, P., & Shetty, A. (2021). Modeling of surface soil moisture using C-band SAR data over bare fields in the tropical semi-arid region of India. *Applied Geomatics*, 13(4), 555–564. <https://doi.org/10.1007/S12518-021-00370-7/FIGURES/13>
- Rana, V. K., & Suryanarayana, T. M. V. (2019). Evaluation of SAR speckle filter technique for inundation mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 16, 100271. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2019.100271>
- Restrepo, S., & Bedoya, D. (2015). *El uso del agua en el cultivo de caña de azúcar. Una mirada desde la huella hídrica* [Trabajo de grado, Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/13091/CB-0519672.pdf?sequence=1>
- Reuter, F. (2009). *Principios de teledetección*.
- Reyna, T., Reyna, S., Lábaque, M., Fulginiti, F., Riha, C., & Linares, J. (2011). Importancia de la determinación de la humedad en estudios de infiltración y escorrentía superficial para períodos largos. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(2), 91–110.
- Robinson, D. A. , G. C. M. K. , and C. J. D. (1999). Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Hydrology*, 223, 198–211.
- Sánchez, R. (2015). *Estimación de humedad de suelo con base en imágenes de satélite*. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1785/TH-1508.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 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*. <https://doi.org/10.22490/21456453.1404>
- Savin, I., Mironov, V., Muzalevskiy, K., Fomin, S., Karavayskiy, A., Ruzicka, Z., & Lukin, Y. (2020). Dielectric database of organic Arctic soils (DDOAS). *Earth System Science Data*, 12(4), 3481–3487. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3481-2020>
- Sehler, R., Li, J., Reager, J., & Ye, H. (2019). Investigating Relationship Between Soil Moisture and Precipitation Globally Using Remote Sensing Observations. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 168(1), 106–118. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2019.03324.x>

- Singh, A., Meena, G. K., Kumar, S., & Gaurav, K. (2018). ANALYSIS OF THE EFFECT OF INCIDENCE ANGLE AND MOISTURE CONTENT ON THE PENETRATION DEPTH OF L- AND S-BAND SAR SIGNALS INTO THE GROUND SURFACE. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-5, 197–202. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-197-2018>
- Solorza R. (2013). *Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano*.
- Song, Y., Sohn, H., & Park, C. (2007). Efficient Water Area Classification Using Radarsat-1 SAR Imagery in a High Relief Mountainous Environment. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*, 285–296.
- Srivastava, H. S., Sivasankar, T., Gavali, M. D., & Patel, P. (2023). Soil moisture estimation underneath crop cover using high incidence angle C-band Sentinel-1 SAR data. *Kuwait Journal of Science*. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.07.007>
- Suman, S., Srivastava, P. K., Pandey, D. K., Prasad, R., Mall, R. K., & O'Neill, P. (2021). Comparison of soil dielectric mixing models for soil moisture retrieval using SMAP brightness temperature over croplands in India. *Journal of Hydrology*, 602, 126673. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126673>
- Tipler, P., & Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (5th ed., Vol. 2B). Reverté S.A.
- Torres, J. S., Carbonell, J., Ortiz, B., Daza, O., Cruz, R., Villegas, F., & Clave, R. P. (2004). Grupos de humedad para el manejo del cultivo en condiciones difíciles. *Revista Palmas*, 25(especial), 115–120. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1073>
- Ulaby, F. T., Dubois, P. C., & Van Zyl, J. (1996). Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of Hydrology*, 184(1–2), 57–84. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02968-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02968-0)
- Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M. S., & Mattia, F. (2008). On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar. In *Sensors* (Vol. 8, Issue 7, pp. 4213–4248). <https://doi.org/10.3390/s8074213>
- Wegmuller, U. (1999). Automated terrain corrected SAR geocoding. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3, 1712–1714. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772070>
- Wei, J., & Dirmeyer, P. A. (2012). Dissecting soil moisture-precipitation coupling. *Geophysical Research Letters*, 39(19). <https://doi.org/10.1029/2012GL053038>
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111402>

- Yang, L., Feng, X., Liu, F., Liu, J., & Sun, X. (2018). Potential of soil moisture estimation using C-band polarimetric SAR data in arid regions. *https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1516320*, 40(5–6), 2138–2150. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1516320>
- Yang, L., Li, Y., Li, Q., Sun, X., Kong, J., & Wang, L. (2017). Implementation of a multiangle soil moisture retrieval model using RADARSAT-2 imagery over arid Juyanze, northwest China. *https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.036029*, 11(3), 036029. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.036029>
- Yang, L., Sun, G., Zhi, L., & Zhao, J. (2018). Negative soil moisture-precipitation feedback in dry and wet regions. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22394-7>
- Yayong, S., Jianwei, M., Jie, P., Shifeng, H., Kun, Y., Peng, Z., & He, Z. (2019). Preliminary Applicability Analysis of Soil Dielectric Constant Model of the Different Soil Texture Condition. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7148–7151. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900240>
- Zhang, L., Li, H., & Xue, Z. (2020). Calibrated Integral Equation Model for Bare Soil Moisture Retrieval of Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Linze County. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 7921, 10(21), 7921. <https://doi.org/10.3390/APP10217921>
- Zhu, L., Walker, J. P., Ye, N., & Rüdiger, C. (2019). Roughness and vegetation change detection: A pre-processing for soil moisture retrieval from multi-temporal SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 225, 93–106. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.02.027>