

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMAS DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LA COBERTURA DE PASTOS  
DE LA REGIÓN BRUNCA DE COSTA RICA  
UTILIZANDO IMÁGENES SENTINEL-1

Trabajo final de graduación sometido a la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado  
en Geografía para optar por el grado y título de Maestría Profesional en Sistemas de  
Información Geográfica y Teledetección

JOHAUSSEN ALONSO CÓRDOBA PERAZA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.

2023

“Te doy todas las renunciaciones de cosas simples,

Que llevo hechas...”

G. Ciarlo (1945 - 2021)

## **DEDICATORIA**

A mis padres, a Rebeca y a mí.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo académico y logístico que la Universidad de Costa Rica me brindó por medio de la Plataforma Nube Académica Computacional (NAC).

Al Profesor M.Sc. Melvin Lizano Araya, por su compromiso, consejos y apoyo durante los cursos del posgrado.

A todos mis compañeros y compañeras del posgrado generación 2020, pero con especial mención para Ana Lucía, Victoria y Carolina, Marcelo, Gabriel y Marco que se destacaron por su acompañamiento, colaboración y compañerismo durante los cursos y el proceso de investigación de este Trabajo Final de Graduación.

A los profesores M.Sc. Ruben Martínez Barbáchano y Dr. Víctor Cortés Granados porque sus criterios y consejos profesionales siempre fueron certeros. A Rebeca porque me sostuvo con su apoyo y consejos en aquellos momentos que no fueron tan claros. A Keneth Prado y Keily Calderón del Departamento de Información del Instituto Meteorológico Nacional, por su apoyo y colaboración.

Y a todas aquellas personas que aunque no se mencionan en este documento, me apoyaron y me brindaron su amistad en todo este proceso...¡MUCHAS GRACIAS!

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Magíster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección”.

*Luis Fro Rodríguez*

---

Máster. Francisco Rodríguez Soto.

**Coordinador Programa de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y  
Teledetección**

*Ruben Martínez Barbáchano*

---

Máster. Ruben Martínez Barbáchano.

**Tutor**

*Melvin Lizano Araya*

---

Máster. Melvin Lizano Araya.

**Lector**

*Johausen Alonso Córdoba Peraza*

---

Johausen Alonso Córdoba Peraza

**Sustentante**

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
Resumen.....	xi
LISTA DE CUADROS .....	xii
LISTA DE TABLAS .....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xvii
LICENCIA DE PUBLICACIÓN.....	xix
CAPÍTULO 1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
1.3. ANTECEDENTES.....	9
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	15
1.4.1. Justificación para la reducción del área de estudio.....	20
1.4.1.1. Limitaciones de recursos .....	20
1.4.1.2. Enfoque más detallado.....	21
1.4.1.3. Representatividad y generalización .....	22
1.4.1.4. Eficiencia y viabilidad .....	22
1.5. OBJETIVOS .....	23
1.5.1. Objetivo principal .....	23
1.5.2. Objetivos específicos .....	23
1.6. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	23

1.7. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	25
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL.....	26
2.1. TELEDETECCIÓN .....	26
2.2. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA .....	28
2.3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....	30
2.4. PLATAFORMAS, SENSORES Y RESOLUCIÓN .....	32
2.4.1. Plataformas .....	32
2.4.2. Sensores pasivos y sensores activos .....	34
2.4.3. Resolución .....	35
2.5. TELEDETECCIÓN ÓPTICA.....	37
2.6. RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR).....	37
2.7. GEOMETRÍA DEL RADAR (SAR) .....	39
2.8. IMÁGENES RADAR (SAR) .....	41
2.8.1. Amplitud .....	43
2.8.2. Fase .....	43
2.8.3. Intensidad de la señal.....	43
2.9. PARÁMETROS DEL RADAR .....	44
2.9.1. Longitud de onda .....	44
2.9.2. Polarización .....	45
2.9.3. Ángulo de incidencia .....	47
2.10. PARÁMETROS DE LA SUPERFICIE .....	51
2.10.1. Estructura .....	52

2.10.2. Retrodispersión .....	52
2.10.3. Constante dieléctrica .....	55
2.11. COBERTURAS DE LA TIERRA Y USO DE LA TIERRA .....	57
2.11.1. Pastos .....	58
2.12. ÍNDICES.....	60
2.12.1. Índices basados en la pendiente .....	62
2.12.2. Índices basados en la distancia .....	63
2.12.3. Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada (NDVI) .....	64
2.13. PRUEBAS ESTADÍSTICAS PARAMÉTRICA .....	65
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	68
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	68
3.2. INSTRUMENTOS.....	68
3.3. SENTINEL-1 <sup>a</sup> .....	69
3.3.1. Características de la misión Sentinel-1 <sup>a</sup> .....	69
3.3.2. Modos de adquisición .....	70
3.3.3. Tipos de producto y niveles de procesamiento .....	71
3.3.4. Resolución .....	73
3.4. SENTINEL-2 <sup>a</sup> .....	73
3.5. DESCARGA Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SENTINEL 1 <sup>a</sup> GRD IW .....	74
3.5.1. Descarga de las imágenes Sentinel-1 <sup>a</sup> .....	74
3.5.2. Procesamiento de las imágenes Sentinel-1 <sup>a</sup> .....	76



3.5.3. Corrección de la órbita (Apply – Orbit-File).....	78
3.5.4. Reducción del ruido térmico (ThermalNoiseRemoval).....	79
3.5.5. Calibración (Calibration).....	81
3.5.6. Aplanamiento radiométrico de terreno (Terrain-Flattening).....	82
3.5.7. Corrección del moteado (Speckle Filter).....	83
3.5.8. Corrección del terreno (Terrain Correction).....	85
3.5.9. LinearToFromdB.....	87
3.5.10. CreateStack.....	87
3.5.11. Combinación RGB.....	89
3.5.12. Generación de Subset.....	91
3.5.13. Exportación de los Subsets.....	93
3.6. GOOGLE EARTH ENGINE NDVI SENTINEL 2A.....	94
3.7. COEFICIENTE CORRELACIÓN DE PEARSON.....	96
3.8. INTERPRETACIÓN VISUAL DE LAS COMPOSICIONES RGB.....	98
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	101
4.1. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA DE PASTOS.....	101
4.1.1. Análisis estadístico exploratorio de los datos $\sigma$ dB VH Sentinel 1A.....	101
4.4.2. Análisis interpretativo de las imágenes en RGB.....	104
4.4.2.1. Aspereza de las superficies.....	104
4.4.2.2. Humedad.....	106
4.4.3. Descripción de las imágenes radar Sentinel 1A en composición RBG.....	117

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....	126
5.1. Recomendaciones .....	127
BIBLIOGRAFÍA .....	129
ANEXOS .....	148
Anexo 1. Código en JavaScript para obtener el NDVI de las imágenes Sentinel 2A SR. .....	148
Anexo 2. Código en Rstudio para estimar el coeficiente de correlación de Pearson .....	149

## RESUMEN

Este Trabajo Final de Graduación se desarrolló en la Maestría Profesional de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, con el objetivo de analizar los cambios en la cobertura de pastos en una sección de 2,033.36 km<sup>2</sup> dentro de la región Brunca de Costa Rica. Para ello, se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-1A en el modo Interferometric Wide Swath (IW) y procesadas en nivel Ground Range Detected (GRD).

La metodología empleada se basa en un enfoque empírico-analítico que combina análisis estadístico para evaluar los datos de la intensidad de la retrodispersión en la cobertura de pastos. Además, se complementó con la fotointerpretación visual de las imágenes S1A en composición RGB. Para llevar a cabo este TFG, se utilizaron diversas herramientas y programas de uso libre, como SNAP, Google Earth Engine, Rstudio, QGIS Desktop 3.22.5 y Google Earth Pro, con el propósito de procesar, analizar y representar los resultados obtenidos.

El análisis estadístico exploratorio, que se realizó con el coeficiente de correlación de Pearson, muestra una relación positiva entre las variables medidas, aunque las correlaciones no fueron fuertes. Sin embargo, los valores p obtenidos indicaron una evidencia muy fuerte en contra de la hipótesis nula, lo que sugiere que la correlación observada no es producto del azar. Además, se observó heterocedasticidad en la distribución de los puntos. Esto indica una variación no constante de la dispersión de los datos.

La interpretación de las imágenes en RGB mostró que los pastos en áreas de potreros se comportan como superficies lisas o poco rugosas cuando interactúan con el radar. Esto se debe a sus características, como raíces poco profundas, tallos cilíndricos con nudos y hojas alternas. Como resultado, las áreas cubiertas por pastos se presentan en las imágenes de radar con colores oscuros o negros.

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Bandas utilizadas en SAR.....	45
Cuadro 2. Valores del coeficiente de retro dispersión.....	55
Cuadro 3. Distribución de imágenes para el análisis multitemporal de los cambios en la cobertura de pastos.....	89

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de imágenes Sentinel-1 utilizadas para el análisis de cambios en la cobertura de pasto .....	76
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Región Brunca de Costa Rica.....	8
Figura 2. Porcentaje total de nubes del ISCCP para el período de 1983 - 1990 .....	18
Figura 3. Subregión de análisis para el área de estudio .....	21
Figura 4. Elementos de la teledetección .....	28
Figura 5. Ondas correspondientes a los campos electromagnético y eléctrico.....	30
Figura 6. Espectro electromagnético y sus regiones.....	32
Figura 7. Patrones orbitales de los satélites .....	34
Figura 8. Geometría de adquisición SAR .....	40
Figura 9. Longitudes de onda y frecuencias .....	44
Figura 10. Tipos de polarizaciones .....	46
Figura 11. Ángulo de incidencia y penetración en las superficies.....	48
Figura 12. Distorsiones geométricas inversión del relieve .....	49
Figura 13. Distorsiones geométricas por desplazamiento de estructuras .....	50
Figura 14. Distorsiones geométricas por sombras .....	50
Figura 15. Interacción de la señal del radar Mecanismos de retrodispersión .....	53
Figura 16. Interacción de la señal del radar con las superficies .....	54
Figura 17. Parámetros de la superficie: Constante dieléctrica.....	56
Figura 18. Relación entre la reflectancia de la Banda infrarroja y la reflectancia de la Banda Roja.....	62
Figura 19. Relación entre la reflectancia de la Banda infrarroja y la reflectancia de la Banda Roja valores de pendiente para índices basados en la distancia .....	64
Figura 20. Modos de adquisiciones del sensor Sentinel-1 .....	71
Figura 21. Filtros para la selección de las imágenes Sentinel-1 .....	75
Figura 22. Flujo de trabajo para el procesamiento de las imágenes Sentinel-1 .....	78
Figura 23. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Apply – Orbit-File” .....	79

Figura 24. Parámetros para la aplicación de la herramienta “ThermalNoiseRemoval” .....	80
Figura 25. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Calibration”.....	82
Figura 26. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Terrain-Flattening” .....	83
Figura 27. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Speckle Filter” .....	85
Figura 28. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Terrain Correction” .....	86
Figura 29. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Create Stack” .....	88
Figura 30. Herramienta composición “RGB” .....	90
Figura 31. Herramienta composición “RGB” .....	91
Figura 32. Herramienta subset para delimitación geográfica .....	92
Figura 33. Herramienta subset para seleccionar las bandas.....	92
Figura 34. Herramienta Estadísticas de Zona .....	94
Figura 35. Interfase de la herramienta Google Earth Engine .....	95
Figura 36. Pruebas de correlación r Pearson entre NDVI e Intensidad de la Retrodispersión en dB .....	98
Figura 37. Gráficos de dispersión para los meses de enero, febrero, marzo, abril, julio, octubre y noviembre, 2019. ....	103
. Figura 38. Cobertura de pastos en el cantón de Buenos Aires, región Brunca .....	106
. Figura 39. Cobertura de pastos en el cantón de Buenos Aires, región Brunca .....	106
Figura 40. Croquis de la ubicación y distribución de las estaciones meteorológicas del IMN dentro de la Región Brunca de Costa Rica .....	108
Figura 41. Resúmenes en los histogramas de frecuencias de las composiciones en RGB de las imágenes Sentinel 1A GRD IW.....	109
Figura 42. Histograma composición RGB (Ene-Feb-Mar) .....	110
Figura 43. Histograma composición RGB (Mar-Abr-May) .....	111
Figura 44. Histograma composición RGB (May-Jun-Jul).....	112
Figura 45. Histograma composición RGB (Jul-Ago-Set).....	113
Figura 46. Histograma composición RGB (Set-Oct-Nov).....	114

Figura 47. Histograma composición RGB (Oct-Nov, Dic) .....	115
Figura 48. Gráficos del registro de las precipitaciones mensuales para la región Brunca año 2019 (el número bajo el gráfico es el código de la estación).....	116
Figura 49. Composición RGB: Enero, febrero, marzo 2019. ....	120
Figura 50. Composición RGB: Marzo, abril, mayo, 2019.....	121
Figura 51. Composición RGB: Mayo, junio, julio, 2019. ....	122
Figura 52. Composición RGB: Julio, agosto, setiembre, 2019.....	123
Figura 53. Composición RGB: Setiembre, octubre, noviembre, 2019. ....	124
Figura 54. Composición RGB: Octubre, noviembre, diciembre, 2019. ....	125



## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
ASF	Alaska Satellite Facility
CCRS	The Canada Centre for Remote Sensing
CENIGA	Centro Nacional de Información Geoambiental
CIA	Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica
CORFOGA	Corporación de Fomento Ganadera
DGM	Dirección de Geología y Minas
ESA	Agencia Espacial Europea
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GGE	Google Earth Engine
GRD	Ground Range Detected
HH	Modo en que la onda es transmitida horizontalmente y recibida horizontalmente por el RADAR
HV	Modo en que la onda es transmitida verticalmente y recibida horizontalmente por el RADAR
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
InSAR	Interferometría SAR
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria
IW	Interferometric Wide Swath
LCLU	LandCover LandUse.
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar
MAG	Ministerio de Agricultura y Agronomía
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
MOCUPP	Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RF	Random Forest
SAR	Radar de Apertura Sintética
SCALA	Ambición Climática para Mejorar el Uso de la Tierra y la Agricultura
SHP	ESRI Shapefile
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SNAP	Sentinel Application Platform
SNIT	Sistema Nacional de Información Territorial
TFG	Trabajo Final de Graduación
VH	Modo en que la onda es transmitida verticalmente y recibida horizontalmente por el RADAR
VV	Modo en que la onda es transmitida verticalmente y recibida verticalmente por el RADAR



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

SEP Sistema de  
Estudios de Posgrado

**Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.**

Yo, Johaussen Córdoba Peraza, con cédula de identidad 109980383, en mi condición de autor del TFG titulado Análisis de cambios en la cobertura de pastos de la Región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes Sentinel - 1 Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI  NO \*

\*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: \_\_\_\_\_ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

  
**FIRMA ESTUDIANTE**

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

## CAPÍTULO 1. INFORMACIÓN GENERAL

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Para Vroey et al. (2021), los pastizales abarcan ecosistemas vastos y diversos que proporcionan alimento, hábitat para la vida silvestre y almacenamiento de carbono. De igual manera, Mogadouro (2022) plantea que los pastizales entendidos como una comunidad vegetal compleja, predominan extensamente sobre la superficie global cubriendo aproximadamente el 40% de ella. Por lo tanto, su amplio rango en la intensidad del uso de la tierra afecta significativamente su valor ecológico y el equilibrio entre estos bienes y servicios (Vroey et al., 2021).

Sancho-Jiménez y Brenes-Cambronero (2021) indican que los pastos son formaciones vegetales que están compuestas por gramíneas de diferentes especies, catalogadas como hierbas. Estos autores ratifican que los pastos en algunas ocasiones están acompañados de algunos árboles y arbustos esparcidos, con el objetivo de ofrecer sombra al ganado. Aunque el uso principal de los pastos sea la actividad ganadera o lechera (Sancho -Jiménez, & Brenes-Cambronero, 2021).

Sandoval-Mejía et al. (2008) proponen que los pastos tropicales representan la principal fuente de alimento en ganaderías tropicales en Centroamérica. Lo anterior, según Bonilla (s.f.), se podría deber a que es un forma barata y accesible para alimentar el ganado.

En Costa Rica, la ganadería es una de las principales actividades antrópicas y está ligada directamente a la producción de forrajes y pastoreo para la alimentación animal (Aguilar-Arias et al., 2020). De acuerdo con los datos del INEC (2015), para el año 2011, la principal actividad de producción de las fincas en Costa Rica era el ganado vacuno con un 28,5% y se contabilizaron 93.017 fincas dedicadas a la producción agropecuaria en una extensión de 2 406 418,4 hectáreas, lo que representa el 47,1% del territorio nacional; de las cuales 1 044 909.6 hectáreas están destinadas al pastoreo, el equivalente a un 43.4 % de la superficie agropecuaria (Aguilar-Arias et al., 2020).

Murgueitio et al. (2014) sugieren que los sistemas ganaderos de pastoreo en el mundo en su mayor extensión son totalmente dependientes de la disponibilidad de los recursos naturales y son afectados por el cambio climático. En ese orden de ideas, Lobert et al. (2021) postulan que la intensidad del uso y manejo de la tierra en los pastizales permanentes afecta tanto a la biodiversidad como a importantes servicios ecosistémicos.

También cabe resaltar, que estas situaciones podrían determinar la disponibilidad de forraje y traer como consecuencia la reducción en la productividad pecuaria (Steinfeld et al., 2009), lo que implicaría un impacto negativo a la seguridad alimentaria de un país y el ingreso de divisas por esta actividad.

Dentro de ese orden de ideas Murgueitio et al. (2014) advierten que modelaciones hechas a nivel mundial señalan que los sistemas ganaderos que dependen del pastoreo serán drásticamente afectados particularmente en África, Australia, América Central y Asia Meridional, por los efectos negativos del cambio climático. Por lo tanto, el monitoreo mediante la teledetección es una opción cada vez más importante de utilizar y de bajo costo que permite determinar el estado de salud de estos sistemas y así mejorar las estimaciones del rendimiento de estos.

En relación con lo anterior, Komisarenko et al. (2022) consideran que las investigaciones sobre el uso de técnicas de teledetección para identificar pastizales y vegetación agrícola generalmente se clasifica en las siguientes categorías: a. Identificación de pastizales de otros tipos de tierras, b. Clasificación de tipos de pastizales, c. Monitoreo de eventos de pastizales. Por esto, la teledetección juega un papel esencial en muchos entornos complejos como la agricultura (Komisarenko et al., 2022).

Asimismo, autores como Moran et al. (1997), Moulin et al. (1998) y Komisarenko et al. (2022) ratifican que la teledetección óptica ofrece una amplia gama de técnicas para monitorear eventos agrícolas y prácticas de manejo. De este modo los enfoques típicos para evaluar el estado de los pastizales y su dinámica se basan en el uso de datos ópticos de satélite

combinados con mediciones espectrales de campo y datos in situ (Boschetti et al., 2007; Dusseux et al., 2013; Komisarenko et al., 2022).

Sin embargo, la disponibilidad de datos ópticos durante la temporada de crecimiento de los cultivos es limitada, como consecuencia de la nubosidad que puede resultar en intervalos más cortos o largos en las series temporales de imágenes (Komisarenko et al., 2022), debido a que la cubierta de nubes impide que los instrumentos de teledetección de los satélites ópticos obtenga vistas claras de la superficie de la Tierra (Whitcraft et al., 2015), lo que motiva el estudio de otras técnicas de teledetección para monitorear pastizales (Komisarenko et al., 2022).

Por esto, McNairn et al. (2009); Voormansik et al. (2020) y Komisarenko et al. (2022) indican que los datos del radar de apertura sintética (SAR) transportados por el espacio se consideran una solución eficaz para monitorear las actividades agrícolas ya que la señal del Radar de Apertura Sintética (SAR) puede penetrar las nubes en diversas condiciones climáticas mientras proporciona datos continuos que cubren un área grande (Komisarenko et al., 2022).

Según Balzter (2001), el SAR es un sensor que transmite pulsos de radiación electromagnética en el espectro de la microondas y que varios estudios han investigado la idoneidad del SAR para el mapeo de la cobertura terrestre y muestran que el sensor Sentinel-1A es una fuente de datos importante que puede complementar el mapeo de la cobertura terrestre con teledetección óptica, especialmente en condiciones de nubosidad (Balzter et al., 2015).

Por otra parte, entre las ventajas de la teledetección activa SAR se encuentran las siguientes: el SAR funciona bajo cualquier condición meteorológica; además, se puede monitorear la superficie de la tierra durante el día y la noche (Podest, 2018). También, dependiendo de la disponibilidad de onda que emita el sensor, se puede penetrar la vegetación, los suelos y puede utilizarse para monitorear pastizales y cultivos agrícolas (Wiseman et al., 2014; Barrett et al., 2014). De igual manera, es sensitivo a las propiedades dieléctricas de las superficies y a las estructuras de los componentes en la superficie de tierra (Podest, 2018).

Sin embargo, Podest (2018) también advierte que este tipo de teledetección presenta varias desventajas, por ejemplo: La información es diferente a las imágenes ópticas y algunas veces es difícil de interpretar espacialmente porque pueden presentar distorsiones por influencia de la topografía y el efecto “speckle”<sup>1</sup>. Asimismo, la energía de microondas dispersada por la vegetación depende de la estructura de las coberturas (tamaño, densidad, orientación) y a las propiedades dieléctricas de los elementos en la superficie terrestre (Podest, 2018).

Además, las imágenes pueden presentar disminuciones en las calidades vinculadas a la interacción de las ondas con los objetos como las gotas de lluvia, generando efectos de atenuación, absorción, dispersión, refracción y difracción (Pérez Gracia, 2001), lo que dificulta su interpretación y adecuado análisis.

Basados en el contexto anterior, este documento corresponde a un Trabajo Final de Graduación (TFG) cuyo objetivo principal fue aplicar una metodología consistente y replicable que permitió analizar los cambios en la cobertura de pastos de la Región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes Sentinel-1<sup>a</sup> captadas en el año 2019. Lo anterior por medio del uso de técnicas de teledetección que permitieron el procesamiento de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) en programas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) de acceso libre.

Esto facilitó la generación de productos cartográficos que podrían ser utilizados como insumos en la gestión de la cobertura de pastos y al mismo tiempo sugerir medidas vinculadas al pastoreo racional, la regeneración de la cobertura arbórea en pastizales, conservar la biodiversidad, la posible protección del recurso hídrico y tratar de reducir el riesgo por el impacto del cambio climático de dicha actividad.

---

<sup>1</sup> Se explicará el significado con detalle en el Capítulo 2 Marco Conceptual.

## 1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La región Brunca se ubica en el extremo sureste de Costa Rica, según el MAG (s.f.), entre las coordenadas 8° 00' y 9° 30' latitud norte, 82° 15' y 84° 00' longitud oeste. Limita al norte con los cantones de Paraíso y Turrialba de la Provincia de Cartago, al noreste con Talamanca de la Provincia de Limón; al noroeste con los cantones de Dota y Tarrazú de la Provincia de San José, al suroeste con Aguirre de la Provincia de Puntarenas; al sureste con la República de Panamá y al sur con el Océano Pacífico (MAG, s.f.).

Esta región abarca una extensión territorial de 9.528.44 Km<sup>2</sup> (Figura 1), lo que representa un 18.6% del territorio nacional. Está integrada por seis cantones: Uno es Pérez Zeledón de la provincia de San José y los cinco restantes de la provincia de Puntarenas: Buenos Aires, Coto Brus, Corredores, Golfito y Osa. A nivel cantonal Buenos Aires es el cantón de mayor extensión, 25% del área de la Región; y Corredores con la menor con un 6.5 % (MAG, s.f.).

Con base en los datos del MIDEPLAN (2014) y el MAG (s.f.) la población total de la región para el año 2011<sup>2</sup> era de 329.528 habitantes equivalente al 7.6% de la población del país de las cuales 163.343 son hombres equivalentes al 49.5% y 50.5% son mujeres. El cantón con mayor porcentaje de población es Pérez Zeledón con el 40.9% del total, seguido por Buenas Aires con el 13.8%. Además, en esta región se encuentran doce territorios indígenas de los veinticuatro territorios con los que cuenta Costa Rica. Según MAG (s.f.), la población en estos territorios en el año 2011 representó el 3.8% del total de la región.

La geología de la zona de estudio es variada en cuanto al tipo, el origen y la edad de los materiales que la componen, así como, por su distribución geográfica. Por ejemplo, la zona de Pérez Zeledón está constituida principalmente, por formaciones de origen sedimentario e ígneo asociados directamente con la génesis de la Cordillera de Talamanca (DGM, 2020).

---

<sup>2</sup>Estos datos fueron los más recientes y completos para el momento en que se desarrolló y redactó este TFG, dado que los resultados preliminares y finales del Censo de Población de Costa Rica para el año 2023 no se había publicado.



Por su parte, el cantón de Buenos Aires está formado geológicamente por materiales de los periodos Terciario y Cuaternario, siendo las rocas sedimentarias (intrusivo y volcánico) del Terciario las que predominan en este cantón (DGM, 2020).

Por otro lado, el cantón de Osa presenta una geología compuesta por rocas de los periodos Cretáceo, Terciario y Cuaternario, en donde las rocas del periodo Cuaternario son las que predominan (DGM,2020).

Además, Golfito se caracteriza porque la geología de la zona está conformada por rocas calizas arrecifales y detríticas, así como por depósitos del Cuaternario (DGM, 2020). En tanto, el cantón Corredores presenta formaciones con rocas calizas y areniscas de las Formaciones Brito, Terraba y Puerto Armuelles, pero también hay presencia de depósitos fluviales y coluviales (DGM, 2020). Por último, el cantón de Coto Brus está constituido por materiales de los periodos Terciario y Cuaternario, predominando las rocas de origen sedimentario intrusivo y volcánico del periodo Terciario (DGM, 2020).

El relieve de la región es bastante irregular y se caracteriza por presentar las mayores elevaciones del territorio nacional, con cerros que sobre pasan los 3 800 m.s.n.m. (Cerro Chirripó) en la Cordillera de Talamanca. Solano y Villalobos (2001) indican que en esta región predomina una topografía irregular, formada por montañas, filas y serranías, áreas de pie de monte, valles, llanuras y cuencas hidrográficas.

El MAG (s.f.) describe que esta región presenta seis unidades geográficas principales: a) Cordillera de Talamanca, b) Valle de El General y Valle de Coto Brus, c) Fila Costeña o Brunqueña, d) Valle de Diquís y Valle Coto Colorado, e) Golfo Dulce y Península de Osa y f) Eje Dominical – Uvita Ojochal.

Solano y Villalobos (2001) indican que la presencia de contrastes geográficos como extensos valles, la barrera montañosa de la Cordillera de Talamanca al norte, además de la influencia oceánica generan en esta región un régimen de lluvias sumamente contrastado con relación al resto de las regiones de la vertiente. Esta heterogeneidad se percibe en un clima en donde

el período seco es muy favorable y corto y el lluvioso intenso; aunado a esto, aparecen áreas pequeñas con clima tropical húmedo y lluvias todo el año (Solano, & Villalobos, 2001).

Para ampliar lo descrito en el párrafo anterior, el IMN (s.f.a) indica que la región pacífico sur presenta una precipitación promedio cercana a los 3 700 mm anuales, con una temperatura máxima de 27.9° C y una mínima de 20.5°C. Además, la magnitud de la precipitación anual aumenta hacia el sur de la región. La lluvia es menor en las partes altas de la cordillera (2 500 - 3 000 mm en promedio) donde hay influencia del viento Alisio en los meses secos y de veranillo (Solano, & Villalobos, 2001).

Sin embargo, estos mismos autores (Solano, & Villalobos, 2001; IMN, s.f.a) explican que la lluvia aumenta en el pie de monte y los valles (3 000 a 4 000 mm) donde se produce un importante aporte de las brisas de montaña. Los mayores núcleos de precipitación (4 000 - 6 000 mm), se presentan en la Península de Osa, al norte de Golfito y en Ciudad Neily. Esta es la zona más lluviosa del país gracias a su estructura geográfica (la cordillera más alta), la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical y los vientos predominantes (IMN, s.f.a; Solano, & Villalobos, 2001).

En relación con los tipos de suelos presentes en el área de estudio, también se observa una diversidad en cuanto a su distribución geográfica, propiedades físicas y químicas, los cuales son derivados de distintos procesos y materiales geológicos.

El mapa de suelos de Costa Rica elaborado por el CIA de la UCR (CIA, s.f.) y los cálculos realizados para este TFG con los archivos descargados del CIA, se identificaron los siguientes órdenes de suelos y sus respectivos porcentajes en la región Brunca: Entisoles (4,87%), Entisoles-Andisoles (0,34%), Entisoles (10,49%), Entisoles-Histosoles (0,52%), Ultisoles-Oxisoles (2,16%), Espodosoles (0,08%), Ultisoles (46%), Inceptisoles (17,56%) y Andisoles (16,68%).

En particular, se destaca la predominancia de los suelos Ultisoles en el área de estudio. Según el INTA (2016), estos suelos se caracterizan por desarrollarse en relieves que van desde

ligeramente ondulados hasta fuertemente ondulados. Son suelos profundos y bien desarrollados, con propiedades físicas que presentan texturas finas, en algunos casos arcillosas, así como una estructuración adecuada y buen drenaje interno (INTA, 2016).



**Figura 1. Región Brunca de Costa Rica**

Fuente: MIDEPLAN (s.f.) y elaboración propia, 2023.

Es importante destacar que en esta sección se describen de manera general las características de toda la Región Brunca. No obstante, debido a razones detalladas en el apartado de la Justificación (Apartado 1.4.) del presente Capítulo, se tomó la decisión de reducir el área de estudio. Esta elección permitió enfocarse de manera más detallada y exhaustiva en los procesos y cambios específicos en la cobertura de pastizales que tuvieron lugar en la zona seleccionada.

### 1.3. ANTECEDENTES

La teledetección como disciplina y herramienta aplicada a las geociencias cuenta con una trayectoria que se remonta desde el siglo pasado. García et al. (2012) afirman que a partir de los satélites LANDSAT (década de los 70), el interés de la comunidad científica internacional y la sociedad en general por la teledetección ha crecido exponencialmente, contándose por miles los estudios realizados con las imágenes que proporcionan los satélites.

Asimismo, autores como Scurlock y Hall (1998); Ali et al. (2016); Elachi y Van Zyl (2021) y Komisarenko et al. (2022) enfatizan que la teledetección es un tema de investigación bien establecido y tiene una rica literatura sobre el tema de los pastizales (para el pastoreo). Por lo tanto, en este apartado solo se citan y mencionan aquellas investigaciones que se consideraron pertinentes de abordar, ya que reúnen los datos y elementos necesarios para el desarrollo de este Trabajo Final de Graduación (TFG).

Balzter (2001) produjo un artículo científico cuyo título es “El uso de la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) para el mapeo y monitoreo de los bosques”; para lo cual, el autor hace una revisión de los sensores SAR, así como un resumen de los fundamentos físicos de la interferometría SAR y los pasos prácticos del procesamiento de datos que esto conlleva. Además, el artículo proporciona una descripción general de las aplicaciones de InSAR al mapeo y monitoreo forestal, cubriendo el volumen y la biomasa del tronco de los árboles, los tipos de bosques y la cobertura del suelo, las cicatrices de incendios, los bosques y el estado y altura del dosel del bosque.

En la región sur de Bélgica, específicamente en Wallonia; Vroey et al. (2021) elaboraron una investigación que lleva por nombre “Detección de siega de pastizales mediante series temporales de Sentinel-1: potencial y limitaciones”. En dicha investigación, el objetivo principal fue evaluar cuantitativa y estadísticamente el potencial del SAR de banda C Sentinel-1 para detectar eventos de siega en varios pastizales agrícolas, utilizando un conjunto de datos de referencia recopilados in situ y se evaluaron minuciosamente varios

métodos de detección de siega, basados en retrodispersión SAR y series temporales de coherencia interferométrica (Vroey et al., 2021).

En Alemania, Lobert et al. (2021) desarrollaron una investigación para la detección de eventos de siega en pastizales permanentes: evaluación sistemática de las características de entrada de las series temporales Sentinel-1, Sentinel-2 y Landsat 8. Según estos autores, se evaluaron sistemáticamente el uso sinérgico de las adquisiciones de imágenes captadas por los sensores Sentinel-1, Sentinel-2 y Landsat 8 para detectar la ocurrencia, la frecuencia y la fecha de los eventos de siega como indicador de la intensidad del manejo de los pastizales (Lobert et al. 2021).

Además, estos autores utilizaron como características de entrada series temporales densas de NDVI (Sentinel-2 y Landsat 8), retrodispersión  $\gamma$  0, relación cruzada de retrodispersión, métricas de textura de segundo orden de retrodispersión, así como coherencia interferométrica de 6 días (Sentinel-1). Se probaron todas las combinaciones posibles de características de entrada para entrenar una red neuronal convolucional unidimensional, que permite una mejor explotación del dominio temporal de los datos. La evaluación se realizó en 64 prados para un total de 257 eventos de siega entre 2017 y 2019 en Alemania.

En España, Villarroya-Carpio et al. (2022) realizaron un estudio del uso de datos de coherencia interferométrica con Sentinel-1 como herramienta de monitoreo de cultivos. Por esto, se utilizaron series temporales de imágenes captadas por los sensores Sentinel 1 y 2 a lo largo del año 2017. El estudio se realizó en un área agrícola de Sevilla, España, en donde se analizaron 16 especies de cultivos diferentes.

El estudio concluyó que las series de tiempo de coherencia de pase repetido de 6 días a partir de datos S1, medidos en los canales **VV** y **VH**<sup>3</sup>, se pueden aplicar de manera efectiva como índices de vegetación para el monitoreo de cultivos agrícolas; además la coherencia **VV** es,

---

<sup>3</sup> Modo en que el sensor radar transmite y recibe las ondas. Para más información ver el Capítulo 2. Marco Conceptual información sobre la polarización.

en general, la mejor opción para describir la evolución de los cultivos, mientras que **VH** es más adecuada para ciertos tipos de cultivos menos densos (zanahoria y cebolla). Por último, la coherencia interferométrica y la retrodispersión (intensidad de la imagen) proporcionan información complementaria como índices de vegetación y podrían explotarse conjuntamente (Villarroya-Carpio et al., 2022).

En Estonia, Komisarenko et al. (2022) publicaron un artículo cuyo título es “Explotación de series temporales de Sentinel-1 y Sentinel-2 para detectar eventos de siega de pastizales mediante aprendizaje profundo con región de rechazo”, en el cual desarrollaron un modelo de aprendizaje profundo con una opción de rechazo integrada para detectar eventos de siega de pastizales utilizando series temporales de imágenes ópticas Sentinel-1 y Sentinel-2 adquiridas de 2000 campos en Estonia en 2018 durante la temporada vegetativa.

Dentro de las conclusiones esta investigación los autores establecen que el modelo de aprendizaje profundo para la identificación de eventos de siega en pastos logra una precisión de eventos del 73,3 % y una precisión de fin de temporada del 94,8 %. Además, el modelo propuesto proporciona una opción de región de rechazo que permite que el modelo se abstenga de la predicción en caso de baja confianza, lo que aumenta la confianza en el modelo (Komisarenko et al., 2022).

En Australia Crabbe et al. (2020) elaboraron un estudio en diferentes especies de pastos para el pastoreo y publicaron un artículo titulado: “Discriminación de los tipos de composición de especies de un paisaje de pastos pastoreados utilizando datos de Sentinel-1 y Sentinel-2”.

El estudio demostró la capacidad del radar de apertura sintética Sentinel-1 (S1) y el instrumento multiespectral Sentinel-2 (S2) para discriminar campos de pastos con composición de una sola especie, composición de dos especies y composición de múltiples especies para un paisaje pastoral en Australia. El estudio utilizó K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF) y Support Vector Machine (SVM) clasificadores para evaluar las fortalezas de las características S1 solo y S2 solo y la combinación de estas características S1 y S2 para discriminar los tipos de composición (Crabbe et al., 2020).

En América latina, Clerici et al. (2017) aplicaron una metodología para la fusión de datos Sentinel -1A y Sentinel -2A para el mapeo de la cobertura terrestre, para lo cual definieron un estudio de caso en la región del bajo Magdalena, Colombia.

El enfoque metodológico que estos autores propusieron fue fusionar información de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 para un mapeo preciso de la cobertura terrestre. El preprocesamiento de datos se llevó a cabo utilizando la plataforma de aplicaciones Sentinel de la Agencia Espacial Europea y las cajas de herramientas SEN2COR. La clasificación LCLU se realizó siguiendo un enfoque de clasificación espectral y basado en objetos, aprovechando también los índices de vegetación.

Medina Valderrama (2018) desarrolló una tesis de investigación para Evaluación de la capacidad de las imágenes de Radar de Apertura Sintética para la detección del cultivo del Café en Pitalito Huila. Para lo anterior el autor desarrolló un marco metodológico orientado al aprovechamiento de las propiedades de la radicación coherente de los sensores SAR en el reconocimiento de características morfológicas y estructurales de la vegetación agrícola como insumo principal en la detección y clasificación del café a libre exposición solar, con densidad media de sombra y alta densidad de sombra.

Además, según Medina Valderrama (2018), la clasificación de las plantaciones de café en función de la densidad de sombrero se apoyó en la aplicación del algoritmo de Bosques Aleatorios (RF por su sigla en inglés) con enfoque monosensor SAR (Sentinel-1) y enfoque multisensor SAR/óptico (Sentinel-1 y Sentinel-2): en el enfoque monosensor se evaluó la clasificación Random Forests, en donde se incluyeron descriptores de textura por cada polarización de la imagen SAR VH – VV y el valor de la intensidad de los pulsos retrodispersados para las polarizaciones VH y VV apilados en una sola imagen (Medina Valderrama, 2018).

Por otra parte, Vásquez Prieto y Cardona Morales (2019) establecieron un diseño de metodología de clasificación de coberturas de manglar empleando imágenes SAR polarimétricas. Según Vásquez Prieto y Cardona Morales (2019), este estudio evalúa los

datos de radar de apertura sintética SAR de dos polarizaciones ofrecidos por el satélite Sentinel-1, para presentar una alternativa de clasificación de la cobertura de manglar en dicha zona de estudio. Para este fin, se efectuaron tres clasificaciones diferentes empleando el algoritmo Random Forest, las dos primeras utilizan por un lado la señal de la retrodispersión y por otro los parámetros polarimétricos resultado de la descomposición dual H-Alpha, y una tercera clasificación que combina los dos enfoques anteriores además de la variable de elevación proporcionada por el modelo SRTM (Vásquez Prieto, & Cardona Morales, 2019).

Asimismo, Valencia y Upegui (2020) definieron una propuesta metodológica para generar mapas de cobertura de la tierra a partir de imágenes de radar ALOS/PALSAR: Estudio de caso Mompós, Colombia.

En este trabajo se identificaron las coberturas presentes en el municipio de Santa Cruz de Mompós ubicado en el departamento de Bolívar, Colombia, generando un mapa temático de coberturas de la tierra usando dos imágenes SAR dual-pol con nivel de procesamiento SLC del sensor PALSAR del satélite ALOS, para una temporalidad que se caracterizó por la elevada presencia de nubosidad, debido al acontecimiento del fenómeno de La Niña y a la ola invernal del año 2010. El mapa se obtuvo mediante la técnica de clasificación supervisada orientada a objetos con base en la información derivada de la descomposición polarimétrica incoherente H/A/Alpha, alcanzando un coeficiente kappa de 0,83 (Valencia y Upegui, 2020).

Por otra parte, Caíta y Castañeda (2021) elaboraron una tesis para la determinación de la mejor clasificación de coberturas obtenidas con imágenes satelitales de Radar, óptica y su sinergia en el periodo 2015 - 2020 e implementación de un modelo de predicción de la pérdida de bosque al año 2030 en seis municipios de la Amazonia Colombiana.

En esta investigación Caíta y Castañeda (2021) identifican las zonas de deforestación y erosión de la región amazónica colombiana, haciendo uso de clasificaciones supervisadas por el algoritmo Random Forest y siguiendo la metodología de clasificación Corine Land Cover. Además, se evalúan los resultados de dichas clasificaciones con el índice Kappa,



estableciendo así entre los tres métodos de captura de información cual resulta más eficiente en esta aplicación específica (Caita y Castañeda, 2021).

En el país suramericano de Ecuador, Valverde Chávez (2022) propuso una investigación para análisis de la dinámica de deforestación ocurrida en la zona intangible Tagaeri Taromenane (ZITT) mediante aplicación de tecnologías geoespaciales. La investigación se basó determinar la pérdida de bosque utilizando imágenes de radar (Sentinel-1), ópticas (Landsat 8) y la combinación de ambas mediante el programa Google Earth Engine (GEE) utilizando el algoritmo Random Forest y posteriormente se evaluó la precisión de cada una de las imágenes resultantes mediante el plugin Acatama del programa QGIS.

Siempre en Ecuador, Sevillano et al. (2022) utilizaron imágenes Sentinel-1 en un proyecto de investigación para la diferenciación de áreas de cultivo de arroz en la cuenca baja del río Guayas, en esta investigación se detectaron fases y estados fenológicos del cultivo de arroz. Para esto, se generaron cubos de datos espaciotemporales de las imágenes satelitales entre las fechas 2019-06-01 y 2020-03-20 con las polarizaciones VV, VH y VV-VH (Sevillano et al., 2022). Las correcciones radiométricas de las imágenes se realizaron la API de Google Earth Engine.

En América Central, específicamente en Honduras, Brenes et al. (2022) propusieron una metodología para la clasificación automática de los árboles en fincas (TonF) y su aplicación en el análisis de la biodiversidad en un paisaje productivo de Olancho, Honduras. Con esto, crearon un mapa de cercas vivas, se generó un análisis para la caracterización del paisaje en términos de su estructura, en donde las cercas vivas ocupan el 14,06 % de la superficie del área de estudio. Por último, se estimó la relación de las cercas vivas y su aporte en la conectividad de paisaje usando modelos de ocupación, para la cual se utilizó como especies focales (Brenes et al., 2022).

Por su parte, en Costa Rica, para el 2021, el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), por medio del Laboratorio PRIAS, presentó el Informe Final del Paisaje Productivo de Pastos para el año 2018, dentro del MOCUPP. En este, Aguilar-Arias et al. (2021) establecieron y

evaluaron una metodología para la identificación de la capa de paisajes productivos de pastos hasta el 30% para el año 2018 en las regiones de Costa Rica. Estos autores utilizaron imágenes y Sentinel-2 y software SNAP además de imágenes Landsat 8 como complemento.

Las imágenes utilizadas recibieron tratamientos y preprocesos como correcciones radiométricas y atmosféricas. Los productos corregidos y normalizados fueron clasificados y estimaron que en el país la capa total del paisaje productivo de pastos generada cubre una superficie de 1.015.155,26 hectáreas lo que equivale a un 19,84 % del territorio costarricense y es aceptada con un 90% de exactitud y un estadístico kappa de 0,8 (Aguilar-Arias et al., 2021).

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Acevo Herrera (2011) detalla que la comunidad científica ha mostrado gran interés por estudiar los fenómenos que ocurren sobre la superficie de la tierra, específicamente los que suceden en la atmósfera, los océanos, o la superficie del suelo y que afectan el clima o modifican la superficie de la tierra.

Para Pérez (2011) es en este punto donde la teledetección entra en juego, puesto que es la técnica que permite medir tales fenómenos de forma remota sin necesidad de entrar en contacto directo con un objeto o una superficie. Lo anterior implica directamente grandes posibilidades y ventajas como la localización de espacios geográficos, observación de fenómenos temporales e integración de resultados en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G) (Pérez, 2011).

Además, la teledetección proporciona parámetros de estado de la vegetación que indican el desarrollo y la fenología de los diferentes cultivos en el tiempo y en las distintas áreas de interés (Schomwandt, s.f.). Esto permite, según Sebem (2005), la valorización de las condiciones de cultivo, la predicción de producciones, la cartografía de las zonas cultivadas, el seguimiento de los cambios y, por último, la detección de contaminación y la evaluación de su impacto en el medio ambiente.

Por otra parte, Millano y Paredes (2016) postulan que, en Latinoamérica, la dinámica de la vegetación requiere entenderse para garantizar el manejo sustentable del elemento natural suelo, con especial énfasis en la conservación del patrimonio forestal, en la gestión integral de los recursos hídricos y en el aprovechamiento, manejo y conservación de todos los componentes de la diversidad biológica.

Es por eso, que la teledetección se presenta como una solución económica y de tiempo para proporcionar información precisa sobre los pastizales (Komisarenko et al., 2022), además de ser una herramienta de gran importancia que permite mejorar las estimaciones de rendimiento de los cultivos siendo de gran ayuda a las administraciones públicas responsables para la toma de decisiones en políticas agrarias (Sebem, 2005). Todo lo anterior basado en un contexto de desarrollo sustentable, uso armónico del territorio y competitividad en los mercados (Peña, 2009).

Vásquez Prieto y Cardona Morales (2019) explican que los sensores remotos juegan un papel indispensable dentro de las actividades enmarcadas en las fases de caracterización, zonificación, diagnóstico y planes de monitoreo dado que permiten identificar, delimitar y cuantificar las coberturas en grandes extensiones y en diferentes periodos de tiempo.

Gao et al. (2017) afirman que el reciente despliegue de los satélites operativos Sentinel de la ESA ha establecido un nuevo paradigma para las aplicaciones de teledetección ya que las imágenes de radar Sentinel-1 presentan alta resolución espacial y temporal. Además, permiten la toma de información e imágenes en condiciones atmosféricas desfavorables con presencia de nubes en una determinada área geográfica.

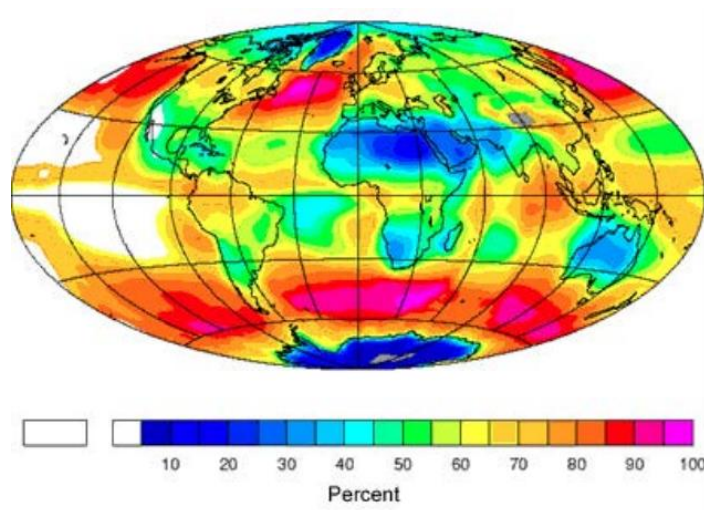
Además, el sensor Sentinel-1 utiliza un radar para recopilar datos de imágenes de la superficie terrestre en cualquier condición climática y en cualquier momento del día. Fernández Ordoñez y Soria Ruíz (2015) explican que las microondas de radas se propagan en la atmósfera con escaso deterioro de sus propiedades, por los que los sensores pueden generar imágenes de manera prácticamente independiente de perturbaciones por nubosidad, lluvia, niebla, bruma y humo.

Moreira et al. (2013), citados por Fernández Ordoñez y Soria Ruíz (2015), advierten que las condiciones atmosféricas mencionadas anteriormente se incrementarán considerablemente a nivel mundial. Estos autores explican que hace escasos veinte años, dichas perturbaciones comprendían aproximadamente el 48 % del globo terráqueo; hoy se han incrementado hasta cubrir un 62 % y dentro de 20 años podrían superar el 80 % de manera irreversible (Moreira et al., 2013). Por lo tanto, la percepción remota óptica dependiente de la luz solar (pasiva) no será aplicable para el seguimiento y estudio de grandes áreas tropicales y subtropicales (Fernández Ordoñez, & Soria Ruíz, 2015).

Basados en el contexto anterior es que se plantearon las razones para la selección del área de estudio de este Trabajo Final Graduación. La primera razón, se relacionó con la climatología que presenta la Región Brunca.

Se mencionó en el apartado 1.2, que la Región Climática del Pacífico sur manifiesta un patrón donde el período seco es muy favorable y corto y el lluvioso intenso, además, también existen áreas pequeñas con clima tropical húmedo y lluvias todo el año (Solano, & Villalobos, 2001), lo que supone una importante presencia de cobertura nubosa, esto implicaría que el uso de imágenes captadas por sensores ópticos podría verse reducido en su disponibilidad por la presencia de nubes.

Para ratificar lo descrito anteriormente, en la Figura 2 de la International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) se presentan los valores porcentuales de la fracción media de cobertura de nubes anual para el periodo 1983 -1990. En América Central donde se ubica Costa Rica, cercano a la línea del ecuador, predominan los colores amarillos y naranjas que significan los porcentajes entre el sesenta y el ochenta por ciento de nubosidad para el periodo, situación que condiciona el uso de imágenes ópticas libres de nubes para el monitoreo de la superficie terrestre y, por tanto, implica que el uso de las imágenes SAR son una opción cada vez más viable.



**Figura 2. Porcentaje total de nubes del ISCCP para el período de 1983 - 1990**

Fuente: <https://isccp.giss.nasa.gov/>

La segunda razón para seleccionar el área de estudio se relacionó con la cobertura y el uso de la tierra en la región Brunca, específicamente en cuanto a los pastos. Según Sánchez (2015), la ganadería bovina ha sido históricamente una de las actividades productivas más importantes de Costa Rica, no solo por su contribución a la economía familiar, sino también al desarrollo del país en términos de desarrollo rural, nutrición de la población, seguridad alimentaria e ingresos en divisas (Sánchez, 2015).

En este contexto, se identificó la relevancia de analizar y comprender los cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca. Esto se debe a la importancia socioeconómica y ambiental de la ganadería en la zona, así como a la necesidad de evaluar la sostenibilidad de esta actividad en relación con el uso de la tierra. Por lo tanto, la selección del área de estudio se justifica por la importancia de la ganadería bovina y los pastos en la región Brunca, así como por la necesidad de comprender los cambios en la cobertura de pastos y su relación con el uso de la tierra en esta área.

La Cámara Nacional de Productores de Leche (Proleche, s.f.) indican que el sector de producción de ganado bovino de Costa Rica requiere una mayor capacidad para integrar innovaciones tecnológicas en el área de producción de forrajes y otros alimentos para mantener su competitividad en escenarios económicos y ambientes muy dinámicos (Proleche, s.f.).

La Corporación Ganadera (CORFOGA), el Programa SCALA FAO-PNUD con la colaboración del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Osa Conservación, la Cámara de Productores Unidos y la Cámara de Ganaderos Independientes del Sur (FAO, 2022), lanzaron en el año 2022 un primer pilotaje en quince fincas de la Región Brunca, con el objetivo de identificar y monitorear la aplicación de buenas prácticas de manejo y producción de carne bovina libre de pérdida de cobertura boscosa (FAO, 2022).

Según la FAO (2022), la ganadería puede disminuir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la captura de carbono, a través de un correcto manejo de suelos y pastos, ayudando a las personas productoras a optimizar la productividad del ganado para mejorar los medios de vida rurales, la seguridad alimentaria y nutricional, y mitigar los efectos provocados por el cambio climático (FAO, 2022).

Dado lo anterior, es que el uso de imágenes captadas por el Sentinel-1 para monitoreo de cambios en las coberturas vegetales (como los pastos) se presenta como una herramienta valiosa que permite obtener una cobertura global de alta resolución espacial con capacidad de penetración de nubes, sensibilidad a la humedad del suelo y frecuencia de adquisición de datos. Estas características hacen que el Sentinel-1 sea una herramienta importante para el monitoreo de cambios de las coberturas vegetales.

En cuanto a la delimitación temporal de este TFG, se eligió el año 2019 como el período de análisis, debido a que se contó con acceso a la información vectorial de la capa de pastos 2019 elaborada por el MOCUPP (con datos del 2018), la cual se obtuvo del uso de imágenes captadas por sensor óptico Sentinel-2. Esta fuente de información funcionó como insumo para delimitar y conocer espacialmente (en complemento con otras imágenes de alta

resolución) la distribución espacial y temporal de los pastos en la Región Brunca de Costa Rica para el año 2019.

#### **1.4.1. Justificación para la reducción del área de estudio**

Es importante destacar que el título de este Trabajo Final de Graduación es "Análisis de cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes Sentinel-1". Sin embargo, durante el proceso de la investigación y el procesamiento de los datos, se encontraron limitaciones que requirieron ajustes y reducciones en la extensión geográfica del análisis. A continuación, se detallan estas limitaciones.

##### **1.4.1.1. Limitaciones de recursos**

Debido a restricciones de tiempo, capacidad de procesamiento y almacenamiento de las imágenes seleccionadas para este TFG, se optó por reducir el área de estudio a una sección más pequeña, abarcando un tamaño de 203,336 hectáreas o 2,033.36 kilómetros cuadrados. El criterio utilizado para seleccionar esta área geográfica se basó en la búsqueda de zonas que presentaran diversidad en cuanto a relieve y paisajes, además de representar un porcentaje proporcional (21.34%) del total de la región Brunca que contenía pastos en diversidad de relieves.

Los límites geográficos de esta área son los siguientes: latitud norte  $9^{\circ} 8'19.51''N$ , longitud oeste  $-83^{\circ}32'21.70''O$ , latitud sur  $8^{\circ}47'40.87''N$  y longitud este  $-83^{\circ} 3'15.42''O$  (Figura 3). Estas mismas coordenadas se utilizaron para definir la subregión de análisis en el programa SNAP ESA, como se explica en el capítulo de la metodología. Esta elección se realizó considerando que el proceso de normalización de las imágenes requería entre 12 y 15 horas por cada una de ellas, además de ocupar una gran cantidad de espacio en los equipos de cómputo utilizados. Por lo tanto, reducir el tamaño del área de estudio permitió optimizar los procesos y utilizar de manera más eficiente los recursos disponibles con el propósito de finalizar este TFG que representa un ejercicio académico.

### 1.4.1.2. Enfoque más detallado

Al reducir el área de análisis, fue posible establecer un enfoque más detallado y exhaustivo de los procesos de cambios en la cobertura de pastizales que ocurrieron en la zona seleccionada. Esta decisión permitió concentrarse en un área más pequeña y obtener resultados más precisos y significativos, lo que a su vez contribuyó a un mejor entendimiento de los patrones presentes. También, al tener una delimitación más específica, se pudo realizar un análisis más minucioso y profundo de los fenómenos observados (cuando fue posible), brindando una visión más clara y completa de los procesos involucrados.



**Figura 3. Subregión de análisis para el área de estudio**

Fuente: MIDEPLAN (s.f.) y elaboración propia, 2023.



#### **1.4.1.3. Representatividad y generalización**

Se estima que los resultados no se vieron significativamente afectados por la reducción del área de estudio. Esto se debe a que se considera que la porción del área utilizada es representativa y pretermitió extrapolar los resultados a una escala más amplia. Se incluyeron diversas coberturas y se tuvieron en cuenta las diferencias en la topografía, lo cual son características relevantes para garantizar la validez y la posibilidad de generalizar los hallazgos obtenidos.

#### **1.4.1.4. Eficiencia y viabilidad**

También la reducción del área de estudio resultó en una mayor eficiencia y viabilidad del proyecto en términos de recursos y tiempo para la entrega de este TFG. Al contar con un área más manejable, fue posible llevar a cabo análisis detallados y exhaustivos dentro de los límites de los recursos disponibles. Además, esto facilitó el monitoreo de los cambios en la cobertura de pastos y su relación con las variables seleccionadas para el análisis.

Dado lo anterior, se considera que la importancia de esta propuesta de Trabajo Final de Graduación radicó en implementar técnicas propias de la teledetección como: el procesamiento, el análisis, la interpretación (visual y digital) (CCRS, 2007) de las imágenes de satélite SAR, para delimitar, identificar y analizar los cambios en la cobertura de pastos de la Región Brunca de Costa Rica, mediante el uso y tratamiento de imágenes del sensor Sentinel-1.

Para ello, se definió y detalló una metodología consistente y de bajo costo económico utilizando herramientas de Teledetección y algoritmos en combinación con el uso de Sistemas de Información Geográfica de software libre y de código abierto para el tratamiento y procesamiento de imágenes provenientes del sensor Sentinel-1.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo principal**

Analizar los cambios en la cobertura de pastos de la región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes Sentinel-1 para el año 2019.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

1. Describir los pasos metodológicos para el tratamiento y el procesamiento de las imágenes Sentinel-1 con el programa SNAP con los que se estimarán los cambios en la cobertura de pastos de la Región Brunca de Costa Rica.
2. Analizar la dinámica de los cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca de Costa Rica durante el año 2019, identificando las áreas con cambios y determinando sus causas
3. Evaluar la capacidad de las imágenes GRD IW captadas del Sensor Sentinel-1 para detectar cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca de Costa Rica, mediante la técnica de la combinación de bandas en RGB y la interpretación de los valores estadísticos de la intensidad de la retrodispersión.

## **1.6. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Un informe elaborado para el Gobierno de Costa Rica bajo el Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF) indica que en Costa Rica entre los años 1987 y 2013 el uso principal de las áreas deforestadas fue pastos. Entre seis y ocho de cada 10 hectáreas deforestadas anualmente (en ese mismo período) en Costa Rica se incorporaron a paisajes y sistemas productivos ganaderos (Sierra et al., 2016).

Por otra parte, el Programa Estado de la Nación (PEN, 2021) en el capítulo 4 Armonía con la naturaleza: herramientas para el análisis y el enfoque territorial de las políticas forestales

en Costa Rica, establece que en entre 1986 y 2019, el país enfrentó procesos iniciales de pérdida de cobertura forestal, seguidos de una importante recuperación.

Además, el informe Programa Estado de la Nación (2021) indica que ese tipo de uso se mantuvo como predominante en todo el período. Sin embargo, en ese mismo período, el 52,3% del área que dejó de ser cobertura forestal se utilizó para pastos, aunque también las áreas dedicadas a pastos fueron las que cedieron espacio a la cobertura forestal recuperada (PEN, 2021).

Asimismo, para el 2019, un 24,6% del área de pastos y un 25,7% del área de cultivos provino de terrenos que eran cobertura forestal en el 2014. Esto podría indicar un retorno de las presiones que se habían registrado en otras épocas (PEN, 2021). Por esto, la dinámica de cambios en la cobertura y la sustitución de bosques por pastos fue la causa principal de las emisiones provocadas por la deforestación entre 1986 y 2019 (70,9%) (PEN, 2021).

Los párrafos anteriores presentan escenarios de cambios en el uso de la tierra que el país ha venido experimentado históricamente, pero también sugiere la importancia de conocer con mayor detalle la dinámica de los cambios de cobertura de pastos, además de conocer cómo y dónde están distribuidos espacialmente los pastos en el área de estudio por medio de la cartografía derivada de técnicas de teledetección activa.

Esto permitió proponer el diseño de estrategias de conservación y manejo sustentable de los recursos que puedan incluir prácticas del manejo del suelo con pastoreo racional para minimizar la erosión, además de la protección del recurso hídrico y de la cobertura de árboles con planes de regeneración de bosques y reforestación. Todo lo anterior con el propósito de mejorar la calidad de vida de las poblaciones locales, así como de ayudar a mitigar los efectos por el cambio climático.

Según Ortiz et al. (2020), en Costa Rica, se han generado estudios de cobertura de la tierra con imágenes Landsat, Spot, y RapidEye (sensores ópticos), usando algoritmos de clasificación supervisada por píxeles y de segmentación de imágenes.

Este mismo autor indica que actualmente se estima que un 50,2% de su territorio se encuentra bajo algún tipo de cobertura forestal. Se conoce, además, que el 25% se encuentra en grandes bloques dentro de áreas silvestres protegidas, y el otro 25% se encuentra inmerso dentro de una matriz de usos y cobertura de la tierra muy heterogénea, lo que dificulta su monitoreo por medio de imágenes satelitales de mediana resolución espacial de acceso libre.

Ortiz et al. (2020) explican que los resultados indican que cuando se trabaja con muchas clases de uso de la tierra se tiene exactitudes bajas (70 a 80%), y que cuando se trabaja con menos clases se aumenta la exactitud, pasando de 89% con 10 clases a más de 94% en la exactitud global de la clasificación cuando se trabaja con tres clases de uso de la tierra, tal como bosque, no bosque y nubes-sombras (Ortiz et al., 2020).

Con base en el escenario anterior, surgió la necesidad de emplear una metodología alternativa para el mapeo de los cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca de Costa Rica. Esta metodología se plantea como complementaria a las utilizadas en el país y se basa en el uso de imágenes de Apertura Sintética Radar (SAR) del sensor Sentinel-1. Estas imágenes presentan ventajas significativas, como una mejor resolución espacial y la capacidad de no verse afectadas por las condiciones meteorológicas y la presencia de nubosidad en la atmósfera, lo que garantiza la disponibilidad de información prácticamente durante todo el año.

## **1.7. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo se pueden utilizar los datos de imágenes GRD (Ground Range Detected) IW (Interferometric Wide) captadas por sensor Sentinel-1 para determinar los cambios en las coberturas de pastos de la región Brunca de Costa Rica?

## **CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL**

La teledetección como disciplina y herramienta aplicada a las geociencias cuenta con una trayectoria que se remonta al siglo pasado. Por consiguiente, con base en la búsqueda de fuentes de información se pueden afirmar que existe una importante cantidad de investigaciones, aplicaciones y enfoques teóricos, así como, literatura de referencia a nivel mundial, regional y local.

### **2.1. TELEDETECCIÓN**

Sobrino (2001) indica que la teledetección es una disciplina que surge y se desarrolla en el siglo XX, distinguiéndose en su evolución dos etapas básicas, la teledetección aérea y la teledetección espacial. Los años sesenta con el desarrollo de los satélites artificiales marcan el punto de inflexión hacia la era espacial. De igual manera, García et al. (2012) afirman que a partir de los satélites LANDSAT, el interés de la comunidad científica internacional y la sociedad en general, por la teledetección ha crecido exponencialmente, contándose por miles los estudios realizados con las imágenes que proporcionan los satélites.

De igual manera, González (2020) establece que el paradigma (de la investigación) basado en sensores remotos se desarrolló desde 1970 hasta el año 2000 aproximadamente y se produjo gracias al desarrollo de la tecnología en el campo de la informática y la electrónica, lo que generó una renovación de sensores, computadores y redes, permitiendo que las mediciones se realizaran mediante el uso de sensores de forma automática, la medición y obtención de información de grandes áreas mediante el uso de la teledetección por satélite y el aumento en la capacidad de procesamiento y almacenamiento de grandes cantidades de datos de manera eficiente.

Holzman (2012) propone que la teledetección consiste en la observación y la obtención de información de objetos de la superficie terrestre desde sensores a bordo de satélites, los cuales miden la energía electromagnética proveniente de dichos objetos.

Además, Holzman (2012) propone que la teledetección es una herramienta que se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas, debido a que no es necesario estar en contacto con la superficie a estudiar y a su cobertura global y periódica. Adicionalmente, según Chuvieco (1995), García, et al. (2012), Holzman (2012), Olaya (2014) y Escobar Valdivia (2019), existen cuatro principales elementos de la teledetección, los cuales se explican seguidamente y se visualizan en la Figura 4.

**La fuente de energía (a)** que ilumine o provea de energía al objeto de interés (cubiertas terrestres), que puede ser de un foco externo al sensor (teledetección pasiva), o de un haz energético emitido por el sensor (teledetección activa) (Chuvieco, 1995). Es importante indicar que la principal fuente de energía es la proveniente del Sol.

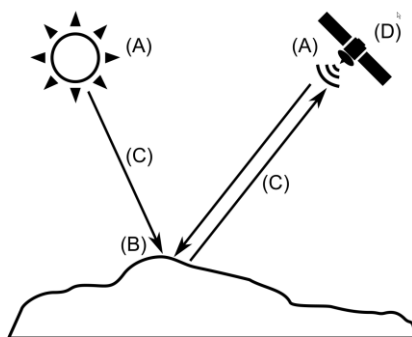
**Las cubiertas terrestres (b)** según Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006), la superficie de nuestro planeta, de modo global, se considera dividida en tres grandes tipos de cubiertas: superficies de agua, superficies con vegetación y suelos. Cada una de esas cubiertas encierra múltiples situaciones individuales distintas. Estas coberturas reciben energía del Sol o de los propios sensores y la reflejan o emiten de acuerdo con sus características físicas (Chuvieco, 1995). Es decir, la radiación reflejada dependerá de las características de esos objetos, permitiendo distinguir a unos de otros (García et al., 2012).

**Una atmósfera (c)** por la que se desplaza la radiación, tanto desde la fuente hasta el objeto como desde el objeto hasta el receptor. La atmósfera también interactúa con la radiación, introduciendo igualmente perturbaciones en ella (Olaya, 2014).

**Sistema de sensores (d)** que son los que recogen y graban la radiación reflejada por la superficie terrestre y la propia atmósfera. La energía captada por el sensor se transmite a una estación de recepción y procesamiento donde los datos se convierten en imágenes digitales (García et al., 2012).

Es importante mencionar que la adquisición de la información por los sensores puede ser (en términos generales) por reflexión, por emisión y por emisión - reflexión (Chuvieco, 1995;

Escobar Valdivia, 2019). La reflexión es el método más importante, puesto que obtiene la información directamente de la luz solar (Chuvieco, 1995).



**Figura 4. Elementos de la teledetección**

Fuente: Olaya, 2014.

## 2.2. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006), los fundamentos de la teledetección se abordan desde el campo de la Física y más concretamente desde los ámbitos de la óptica y la electrónica. Por lo tanto, es de suma importancia establecer los siguientes dos conceptos: **radiación electromagnética y espectro electromagnético**, los cuales son básicos para la comprensión, el análisis y extracción de la información derivada de imágenes proveniente de sensores remotos (pasivos o activos) para el monitoreo de la superficie terrestre.

Olaya (2014) ratifica que la radiación electromagnética es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza y deriva del campo electromagnético, el cual es ejercido por las partículas cargadas eléctricamente. Para explicar ésta, existen dos modelos conocidos como modelo ondulatorio y modelo de partículas. Además, Olaya (2014) agrega que la radiación electromagnética es producto de las alteraciones en los campos eléctrico y

magnético, que generan dos ondas ortogonales entre sí, correspondientes a cada uno de los campos anteriores (Figura 5).

Asimismo, Luque Ordóñez (2012) indica que el flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial.

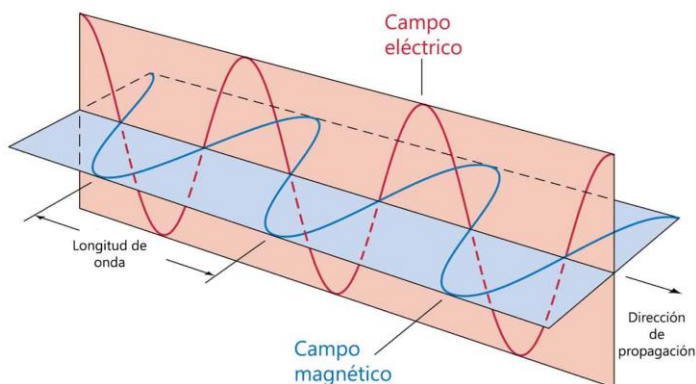
Además, Chvico (1995) y Fontal et al. (2005) establecen que se puede describir cualquier tipo de energía radiante en función de dos parámetros comunes para referirse al espectro electromagnético: **frecuencia y longitud de onda** y que la organización de las bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético.

En la Figura 5 se aprecia un esquema que representa las ondas electromagnéticas y su dirección de propagación, así como la longitud de onda que es la distancia física entre dos puntos, en este caso las crestas consecutivas de las ondas. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda (Onda electromagnética, s.f.). Por lo tanto, cuanto mayor es la frecuencia de una onda, menor será su longitud de onda.

Lo anterior significa que cuanto mayor sea la frecuencia de la onda, más pequeña será la distancia entre dos puntos equivalentes consecutivos de la onda y, en consecuencia, más oscilaciones realizará por unidad de tiempo (Onda electromagnética, s.f.). Generalmente la longitud de onda se representa con la letra griega Lambda  $\lambda$ .

La longitud de onda y la frecuencia están relacionadas. Por su parte, la frecuencia es la medida del número de ciclos o repeticiones de la onda por unidad de tiempo (esero.es, s.f.). La frecuencia generalmente suele representarse por la letra griega nu  $\nu$  y se mide en hercios (Hz) que equivale a un (1) ciclo por segundo (UM.es. s.f.a).





**Figura 5. Ondas correspondientes a los campos electromagnético y eléctrico**

Fuente: Unionedomex.mx (2021)

Por otra parte, Holzman (2012) plantea que la radiación electromagnética que proviene del sol y que entra en contacto con la superficie terrestre o las nubes puede ser reflejada por la superficie, absorbida y emitida o transmitida a otros objetos. Además, Holzman (2012) enfatiza que la radiación reflejada captada por el sensor depende no sólo de la reflectividad del objeto, sino de otros factores variables como el ángulo de iluminación, el relieve y la dispersión por los gases y partículas de la atmósfera como el vapor de agua, el ozono, el polvo y el humo.

Según Holzman (2012), lo indicado en el párrafo superior se puede corregir por medio de normalizaciones y tratamientos en las imágenes, ya que es necesario tener en cuenta dichos efectos y corregirlos previamente a la obtención de la información para lograr magnitudes físicas comparables entre las imágenes, tales como reflectividad o temperatura.

### 2.3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Luque Ordóñez (2012) menciona que el espectro electromagnético (Figura 6) es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética. Por otra parte, Fontal et al. (2005) ratifican que el espectro electromagnético se ha dividido en diferentes regiones, pero no tienen fronteras rígidas entre regiones adyacentes. De igual manera, Chuvieco (1995), agrega que el espectro

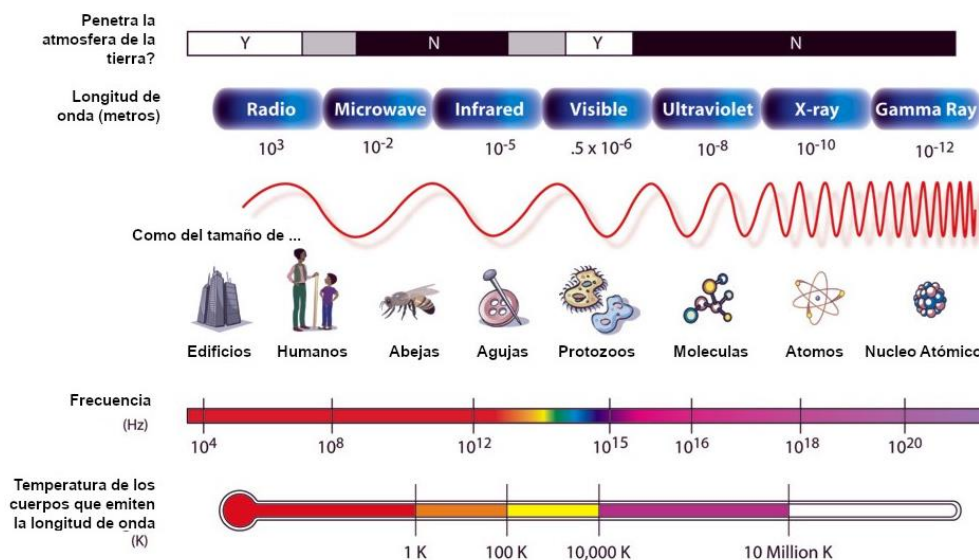
electromagnético comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta kilométricas (telecomunicaciones).

Podest (2018), explica que la mayoría de la radiación presente en el espectro electromagnético no es visible a los ojos del ser humano y que la luz visible es solamente una porción de la radiación total que nos rodea (Figura 6).

Por otra parte, la longitud de onda del rango óptico dentro del espectro electromagnético abarca aproximadamente desde los 400 nanómetros hasta los 700 nanómetros. Mientras tanto, el rango de las microondas inicia desde los 0.4 cm llegando hasta los 40 cm (Figura 6), es decir, el rango de las microondas es mucho más bajo que las ondas ópticas o incluso que las infrarrojas.

Según Podest (2018), es precisamente esta diferencia entre las longitudes de onda, una de las razones por la cual la superficie de la Tierra se aprecia de manera diferente en las imágenes captadas con los sensores ópticos y los sensores de radar.

Además, dentro de las ventajas de observar la superficie terrestre por medio de imágenes captadas en el espectro de las microondas es que las imágenes no son afectadas por la mayoría de las condiciones meteorológicas y se puede monitorear la superficie de la tierra durante el día y la noche (Podest, 2018). También, dependiendo de la disponibilidad de onda que emita el sensor, se puede penetrar la vegetación, los suelos y puede utilizarse para monitorear pastizales y cultivos agrícolas (Wiseman et al., 2014; Barrett et al., 2014).



**Figura 6. Espectro electromagnético y sus regiones**

Fuente: Marte (2020)

## 2.4. PLATAFORMAS, SENSORES Y RESOLUCIÓN

### 2.4.1. Plataformas

De acuerdo con Olaya (2014) en un sistema de teledetección, dos son los elementos tecnológicos principales que lo definen: el sensor y la plataforma. Este autor indica que el sensor es el elemento que incorpora la capacidad de «leer» la radiación electromagnética y registrar su intensidad dentro de la una zona concreta del espectro. Por su parte, la UM (s.f.) explica que un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda.

Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006) explican que el proceso de la obtención de la información por medio de los sensores inicia con la captura de la imagen por medio del satélite (plataforma), mediante una serie de detectores fotoeléctricos (sensor) que transforman los niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos que se denominan niveles digitales.

Como plantea la UM.es (s.f.b) se entiende por plataforma los satélites (SENTINEL, LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT entre otros más) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (sensores). Sin embargo, en esta sección del documento solamente se describirán aquellos sensores transportados en plataformas satelitales dejando de lado (por la naturaleza de este TFG) aviones u otros aparatos (VANT) con diferentes características, formas y tamaños.

Los satélites, se pueden clasificar por medio del tipo órbita. La UM (s.f.) establece que existen dos tipos fundamentales de satélites **geosincrónicos** o **geoestacionarios** y los **heliosincrónicos**. Los primeros se sitúan sobre el Ecuador en una órbita a 36 000 Km de la Tierra. Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación.

Asimismo, la UM (s.f.b) menciona que los satélites heliosíncronos se desplazan en órbitas generalmente **circulares** y **polares** (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que, aprovechando el movimiento de rotación terrestre, puede captar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de la órbita. Estas órbitas sólo son posibles entre 300 y 1 500 Km de altura. La órbita se diseña de forma que el satélite pasa siempre sobre el mismo punto a la misma hora local (Figura 7).

Olaya (2014) afirma que los satélites artificiales presentan unas características distintas como plataformas de teledetección, siendo muy útiles para la teledetección sobre la superficie terrestre. Este autor señala que un satélite no puede dirigirse a voluntad (no puede pilotarse), y su movimiento es una característica inherente que viene definida por una serie de parámetros. Estos parámetros se conocen como parámetros orbitales pues definen la órbita descrita por el satélite en torno a la Tierra (Olaya, 2014).

De esta manera, se establece una clasificación con tres tipos de satélites en función de su eje de rotación: **Ecuatoriales**: si se sitúan en el mismo plano en el ecuador terrestre. **Polares**: si se sitúan en un plano que contiene al eje de rotación terrestre y **Semipolares**: si la órbita es oblicua al eje de rotación (Olaya, 2014).



**Figura 7. Patrones orbitales de los satélites**

Fuente: Brayan (2020)

#### 2.4.2. Sensores pasivos y sensores activos

En la teledetección, se existen dos categorías de observaciones: pasivas y activas. Los sensores pasivos miden la energía emitida o reflejada por la Tierra o la atmósfera. Según Podest (2018), algunos ejemplos de este tipo de sensores son los ópticos y los térmicos, así como los de microondas que se les conoce como radiómetros. Estos miden la energía emitida de un medio en el rango de las microondas del espectro electromagnético (Podest, 2018).

Con relación a lo anterior, la NASA (s.f.) también indica que los **sensores pasivos** miden energía radiante reflejada o emitida por el sistema Tierra - atmósfera, la energía radiante se convierte en cantidades biogeofísicas tales como temperatura, precipitación, humedad del suelo, clorofila. Algunos ejemplos de sensores pasivos SENTINEL 2, LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT.

Los **sensores activos** emiten su propia luz o iluminación por medio de rayos de radiación sobre el sistema Tierra – atmósfera y miden la radiación retrodispersada (Podest, 2018). Se

pueden mencionar como ejemplo de sensores activos LIDAR (Light Detection and Ranging, en español, Detección y Teledetección por Luz), radares y el sensor SENTINEL 1, entre otros.

### **2.4.3. Resolución**

Según Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006), en los sistemas de teledetección se puede hablar de cinco resoluciones distintas (espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular), gracias a ellas, se pueden evaluar rangos de precisión referentes a distintos conceptos de suma importancia para el análisis de imágenes.

Sin embargo, autores como Chuvieco (1995), Olaya (2014) y Congedo (2016) mencionan solo cuatro tipos de resoluciones: resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica y resolución temporal.

También Chuvieco (1995) explica que estos cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados. Además, este autor argumenta que, a mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal y es previsible que se reduzca la también la espectral. Por lo tanto, basados en los cinco autores citados en los párrafos anteriores se hará una breve descripción de los diferentes tipos de resoluciones.

**Resolución espacial.** Para Olaya (2014), es la dimensión del objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen y está relacionado al tamaño del píxel. Además, la resolución espacial está en función de la capacidad resolutoria del sensor y las características de la plataforma tales como la altura a la que se sitúa.

De igual manera, Congedo (2016) y NASA (2013) afirman que la resolución espacial “es el poder de resolución que necesita un instrumento para la discriminación de entidades y está basada en el tamaño del detector, longitud focal, y la altitud del sensor”. Por último, Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006) asocian la resolución espacial a la capacidad del sistema para distinguir objetos en función del tamaño del píxel.

**Resolución espectral.** Olaya (2014) explica que todo sensor cubre una región particular del espectro y almacena esta mediante un número dado de bandas. La región del espectro abarcada y el número de bandas son los elementos que definen la resolución espectral. Esta se elevará si el número de bandas es alto, ya que cada banda cubrirá un rango de frecuencias de menor amplitud. Por su parte, Congedo (2016) y la NASA (2013) explican que la resolución espectral está vinculada al número y localización en el espectro electromagnético (definido por dos longitudes de onda) de la banda espectral.

Asimismo, Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006) explican que la resolución espectral indica el número y anchura de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor. Es decir, coincidiendo con los autores anteriores, la resolución espectral más grande cuanto mayor sea el número de bandas (Pérez Gutiérrez, & Muñoz Nieto, 2006).

**Resolución radiométrica.** Congedo (2016) hace referencia a que la resolución radiométrica normalmente medida en bits (dígitos binarios) es el rango de valores de brillo disponibles, los cuales en la imagen corresponden al máximo rango de DN's; por ejemplo, una imagen con 8 bit de resolución tiene 256 niveles de brillo. Por su parte, Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006), explica que es la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. A mayor número de bits, reservados para almacenar el valor de la reflectividad de un píxel, mayor la resolución radiométrica.

**Resolución temporal.** En términos generales Olaya (2014) establece que la resolución temporal se asocia al tiempo que tarda el sensor en volver a tomar una imagen de una misma zona. Tiene sentido en el caso de sensores orbitales, que funcionan por ciclos, y tras concluir este ciclo, vuelven a comenzar la toma de imágenes en el mismo punto.

**Resolución angular.** Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006) indican que la resolución angular está en referencia a la capacidad que tiene el sensor para tomar imágenes oblicuas. Según estos autores, esta propiedad permite no solamente acortar los ciclos temporales de recubrimiento, sino que posibilita la generación de imágenes estereoscópicas y por tanto la reconstrucción del relieve.

## **2.5. TELEDETECCIÓN ÓPTICA**

Las imágenes de teledetección óptica son sensibles a las propiedades biofísicas del tipo de cobertura terrestre y la vegetación. Los sistemas de teledetección óptica satelital reciben su información de la radiación electromagnética reflejada por la luz solar. Al trabajar con diferentes longitudes de onda, los sensores ópticos serán sensibles a la vegetación fotosintética (usando el espectro infrarrojo cercano) y al contenido de agua (Reef Resilience Network, RRN, s.f.).

Según Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006), Caira y Castañeda (2021), los sistemas ópticos de observación terrestre ha sido el principal método de captura para el estudio de las cubiertas vegetales. Son aquellos que tienen un ancho de banda comprendido entre el visible (azul, verde y rojo) y el infrarrojo (cercano o NIR; medio o SWIR), incluyendo a veces el térmico (TIR). Mediante una serie de detectores fotoeléctricos transforman los niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos que se denominan niveles digitales (Pérez Gutiérrez, & Muñoz Nieto, 2006).

Además, Chuvieco (1995) y Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto (2006) indican que la señal enviada por el equipo óptico a los detectores se muestrea a intervalos regulares, de tal forma que únicamente se graba un valor numérico cada cierta distancia que se denomina píxel. La señal recibida se descompone en varias longitudes de onda, cada una se envía a un tipo especial de detectores, sensibles a ese tipo de energía, es allí cuando se habla de multi – espectral pues detectan la misma superficie de terreno en distintas bandas del espectro (Chuvieco, 1995).

## **2.6. RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)**

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es un dispositivo de microondas activo que permite generar imágenes de alta resolución (Buemi, 2012). Este dispositivo o sensor de microondas de iluminación lateral se ubica sobre una plataforma móvil (Vázquez, 2019) y emite señales o pulsos de microondas a intervalos regulares sobre una región de interés, recibe la parte de



esta energía que es retrodispersada desde esta región y detecta la intensidad y la distancia, es decir el retardo en el tiempo de las señales de retorno (Buemi, 2012).

Caita y Castañeda (2021) explican que los pulsos emitidos por el SAR se propagan por la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre, donde se producen varias reflexiones debidas a la interacción con los diferentes objetos. Los ecos que vuelven en la dirección de la antena son adquiridos por la misma antena, que actúa como emisor y receptor (Caita y Castañeda, 2021).

Vázquez (2019) también indica que la técnica avanzada SAR permite simular una antena mediante la sucesión de señales recibidas por una antena real situada en una aeronave. Esta antena es denominada apertura sintética y su principio se basa en el efecto Doppler el cual afecta la observación cuando existe un movimiento relativo entre un elemento y el sensor (Vázquez, 2019).

La RRN (s.f.) explica que la interpretación de las imágenes de los sensores de radar es menos intuitiva que la de las imágenes ópticas porque estos sensores no perciben el color, sino que responden a la geometría de la superficie, la textura, la estructura tridimensional y el contenido de agua (RRN, s.f.).

Para ampliar lo anterior, Podest (2018) ratifica que existen ventajas y desventajas de la teledetección de radar en comparación a los sensores de teledetección óptica. Entre las ventajas de utilizar teledetección de radar se pueden mencionar que funciona bajo casi cualquier condición meteorológica durante el día y la noche. Por su parte, el uso de imágenes ópticas se ve limitado por las condiciones meteorológicas y la presencia de nubes, polvo, humo, gases o cuando es de noche (Podest, 2018).

Podest (2018) también indica que otra ventaja del uso del radar que (dependiendo de las bandas que se utilice) puede penetrar las diferentes coberturas como la vegetación, el suelo o la cobertura de nieve. En cambio, las imágenes ópticas solo contienen información referente a la sección superior de las diferentes coberturas en la superficie.

Además, para el uso de imágenes de radar no es necesario realizar correcciones atmosféricas o eventualmente si se realizan son correcciones mínimas. En cambio, con las imágenes ópticas las correcciones atmosféricas son críticas para realizar una interpretación adecuada de la información (Podest, 2018) y así poder comparar las imágenes entre sí, por ejemplo, en una serie temporal.

Se ha mencionado que el radar es sensitivo a las propiedades dieléctricas de la superficie y a la estructura de los elementos o coberturas presentes en la superficie (Podest, 2018). Según Ruíz Fernández (2015), la constante dieléctrica es una medida de las propiedades eléctricas de los objetos, indicando la reflectividad y conductividad de los materiales. A menor constante dieléctrica, menor es también la reflectancia de un objeto (Ruíz Fernández, 2015).

Por otra parte, dentro de las desventajas del uso de radar se pueden mencionar las siguientes: la información de las imágenes de radar es diferente a la información que se presenta en las imágenes ópticas, esta situación en algunas ocasiones puede dificultar una adecuada interpretación de la información (Podest, 2018).

También, otra desventaja es que las imágenes de radar se caracterizan por la presencia del “moteado”, ruido o “speckle” (Podest, 2018) el cual es un efecto granular similar a un efecto “sal y pimienta” en las imágenes que dificulta la interpretación de estas. Según Ruíz Fernández (2015), este ruido tiene su origen en el carácter aleatorio de la reflectividad observada, causada por la interferencia de numerosos objetos reflectores (scatterers) dentro de una misma celda de resolución. De igual manera, la presencia de topografía introduce distorsiones en las imágenes de radar que deben corregirse (Podest, 2018).

## **2.7. GEOMETRÍA DEL RADAR (SAR)**

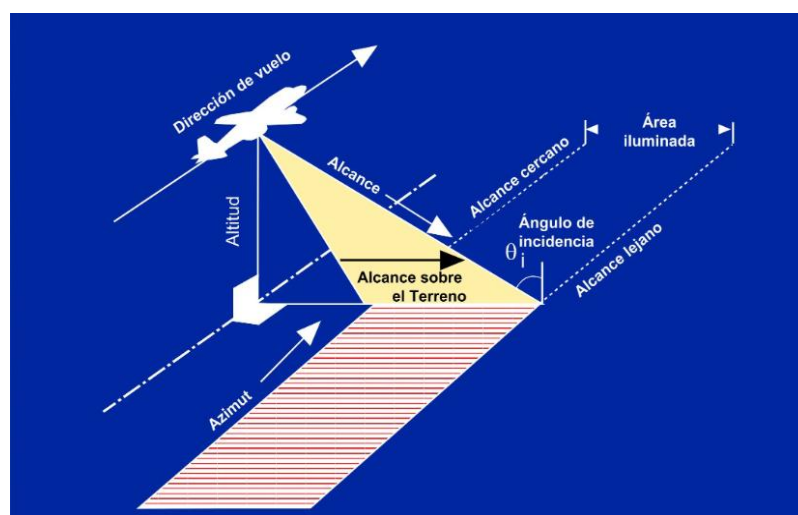
Un radar consiste fundamentalmente en un transmisor, un receptor, una antena y un sistema electrónico para grabar y procesar los datos recolectados (Podest, 2018). El CCRS (2005) establece que los sistemas de radar (SAR) son sistemas de medición de distancias de

observación lateral, por lo tanto, el ángulo de incidencia, el ángulo de incidencia local y la dirección de iluminación son parámetros geométricos de gran importancia.

Según CCRS (2005) y Pascual (2018), la geometría de adquisiciones SAR, está compuesta por el ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) que es el ángulo del radar y la vertical local con respecto al geoide, es decir la distancia entre la antena y el objeto (McNairn, & Jiao, 2018). La Figura 8 contiene los elementos que describen, de forma esquemática, la composición de la geometría del Radar de Apertura Sintética (SAR).

El ángulo de incidencia es el parámetro más importante para describir la geometría relativa entre el radar y la escena observada (CCRS, 2005). Según McNairn y Jiao (2018), un aspecto importante de tomar en cuenta respecto al ángulo de incidencia es que la retrodispersión disminuye con un mayor ángulo de incidencia.

Para el CCRS (2005) un aspecto importante que hay que indicar es que la altitud del sistema altera el ángulo de incidencia y, por lo tanto, la geometría de la observación. El azimut (Figura 8) en cambio, es la distancia o la dirección a lo largo de la trayectoria en la dirección de vuelo (Pascual, 2018).



**Figura 8. Geometría de adquisición SAR**

Fuente: CCRS (2001).

McNairn y Jiao (2018) afirman que en un sistema radar la resolución tiene dos dimensiones, una la dirección del azimut y otra en la dirección del alcance, que es la dirección transversal a la trayectoria (McNairn, & Jiao, 2018). El alcance, es la distancia medida a lo largo de una línea entre la antena y el terreno, Por último, el alcance sobre el terreno (Figura 8) es la distancia entre la proyección de la trayectoria del satélite en el terreno y el objeto iluminado (CCRS, 2005).

Además, McNairn y Jiao (2018) explican en la geometría de las imágenes SAR, que la resolución del alcance depende de la longitud del pulso. Es decir, pulsos más breves resultan en resoluciones más altas; asimismo, si los pulsos son más breves, la amplitud transmitida incrementa para mantener la misma potencia total en el pulso (McNairn, & Jiao, 2018).

En cuanto a la resolución en el azimut (SAR), McNairn y Jiao (2018) indican que este es determinado por la anchura del haz de la antena y la distancia hasta el objeto. Asimismo, la anchura del haz depende directamente de la longitud de onda e inversamente del tamaño de la antena o apertura (McNairn, & Jiao, 2018).

## **2.8. IMÁGENES RADAR (SAR)**

Una imagen SAR proporciona información sobre la reflectividad del área que ilumina el sensor. La intensidad de la señal reflejada permite discriminar entre los diferentes objetos del terreno (INTA, s.f.a). De esta manera aquellos objetos que devuelven más señal al radar se identificarán como puntos brillantes en la imagen y las superficies más lisas o planas, son aquellas que devuelven menos señal y se identifican como zonas oscuras (INTA, s.f.a).

Belmonte y Caamaño (2009) afirman que cuando un sensor activo, como el radar, emite un haz de microondas a la superficie terrestre, la mayor parte de ese haz es dispersado al contacto con ella. El haz principalmente se dispersa hacia la atmósfera (en el caso del suelo), dentro del mismo objeto (en el caso de la vegetación) o se refleja especularmente (en el caso del agua). En función de estos tres comportamientos el radar registrará una señal de retorno muy diferente (Chievo, 2000 y Belmonte y Caamaño, 2009).

Buemi (2012) explica que se requieren dos procesos para producir una imagen SAR: el sensor debe desplazarse a cierta altitud sobre la zona y registrar una sucesión de señales de cada objeto y, además, debe procesarse la sucesión de señales para formar una imagen reconocible. Del mismo modo, Buemi (2012) indica que, debido a la manera en que son generadas las imágenes SAR, se producen problemas para la visualización y el análisis de los datos adquiridos por este sistema.

Por lo tanto, la autora indica que por tratarse de un haz emitido artificialmente, no pueden controlarse las condiciones de adquisición, ángulo, distancia, orientación, polarización entre otros (Buemi, 2012) elementos que se indicaron la geometría del radar.

Asimismo, Buemi (2012) menciona que la ecuación del radar es la relación entre las características del radar, el blanco y la señal recibida que se expresa de la siguiente manera:

$$p_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Fuente: Buemi (2012)

Donde  $p_r$  es la potencia retrodispersada,  $P_t$  es la potencia emitida por el radar,  $G^2$  es la ganancias de la antena,  $\lambda^2$  es la longitud de onda,  $R^4$  es la distancia entre sensor y el terreno y  $\sigma$  es la sección eficaz de retrodispersión Buemi (2012).

De acuerdo con Buemi (2012) un factor muy importante de esta ecuación es el coeficiente de retrodispersión  $\sigma$ , ya que depende de la rugosidad del material y sus condiciones dieléctricas, las cuales inciden en la intensidad de la señal de retorno (mayor rugosidad implica mayor intensidad de retorno) (Buemi, 2012). Además, otro factor importante para considerar es la polarización, es decir la orientación del campo eléctrico de la radiación transmitida y recibida (Buemi, 2012).

Por otra parte, Herrera et al. (2009) enfatizan que las imágenes SAR están formadas por píxeles que presentan un número complejo con un valor de amplitud y otro de fase que, a continuación, se detallan.

### **2.8.1. Amplitud**

La amplitud está relacionada con el coeficiente de respuesta de la superficie del terreno a la señal y que conocido como dispersión (Herrera et al., 2009). Asimismo, Alpala Aguilar y Erazo Montenegro (2021) indican que la amplitud corresponde a la interacción de la tierra con el sensor y depende de la rugosidad de las superficies y de la absorción, es decir la cantidad de energía reflejada o retrodispersada por el área escaneada de una superficie del suelo hacia el satélite.

### **2.8.2. Fase**

Por su parte, la imagen de fase depende del grado de reflectividad del objeto capturado y la distancia de la línea de visión del sensor con el objeto reflejado (Alpala Aguilar, & Erazo Montenegro, 2021) y se mide en radianes (Podest, et al., 2020). Además, la fase de radar es una medida del rango y de la complejidad de la superficie. La fase de la señal se podría definir como el número de ciclos de oscilación que la onda ejecuta entre el radar, la superficie y el regreso. Según la NASA (s.f.), la fase total es el rango bidireccional medido en ciclos de onda más el componente aleatorio de la superficie.

### **2.8.3. Intensidad de la señal**

La intensidad o magnitud es una medida de la fuerza reflectante de un objetivo de radar en general (ESA, s.f.). Estos términos están estrechamente relacionados con el concepto de retrodispersión, que se basa en la interacción entre la energía transmitida por el radar y la superficie del objetivo (Villegas, 2019). La retrodispersión depende de varios parámetros que están asociados tanto al radar como a las características de la superficie (Villegas, 2019), los cuales se explicarán en secciones posteriores. En el apartado 2.10.2 se proporcionará una explicación detallada sobre el concepto de retrodispersión.

## 2.9. PARÁMETROS DEL RADAR

Según Podest et al. (2020), existen parámetros que influyen directamente en las características de transmisión de la señal. Estos son los parámetros de **radar** y **superficie**, los cuales son importantes en el contexto del mapeo de la cobertura terrestre (Podest et al., 2020). En esta sección del documento se explican los parámetros vinculados al radar que son los siguientes: **la longitud de onda**, **la polarización** y en **ángulo de incidencia**.

### 2.9.1. Longitud de onda

Podest (2018), Mata Muñoz (2019) Podest et al. (2020) y Jiménez Abarca y Guerrero Madrigal (2023) explican que la longitud de onda es la distancia entre el pico o cresta de una onda hasta el pico de la siguiente onda electromagnética (Figura 9). Según Podest et al. (2020), la longitud de onda define la interacción de la señal del radar con las superficies o el medio. Mientras más larga la longitud de onda mayor penetración en el medio (IGN, s.f.a). También Podest et al. (2020) ratifica que la longitud de onda esta inversamente relaciona con la frecuencia y cuanto mayor es la frecuencia menor es la longitud de onda y viceversa (Podest et al., 2020).



**Figura 9. Longitudes de onda y frecuencias**

Fuente: [NetCom, \(2019\)](#)

En el cuadro 1 se presentan las bandas más utilizadas en SAR, así como la longitud, la frecuencia en GHz, la aplicación y su capacidad de penetración. Según RRN (s.f.), las diferentes longitudes de onda del radar a menudo se denominan bandas, con designaciones de letras como X, C, L y P que al igual que en el espectro óptico, se pueden distinguir (Buemi, 2012).

**Cuadro 1. Bandas utilizadas en SAR**

<b>Designación</b>	<b>Longitud de onda (cm)</b>	<b>Frecuencia (GHz)</b>	<b>Aplicación</b>
<b>X</b>	2,4 -3,8	12,5 – 8	Meteorología, agricultura y uso militar
<b>C</b>	3,8 – 7,5	8 – 4	Estudio del océano, agricultura, cambios en la superficie terrestre
<b>L</b>	15 – 30	2 – 1	Agricultura, silvicultura y humedad en el suelo

Fuente: Podest (2018) y Jiménez Abarca, & Guerrero Madrigal (2023).

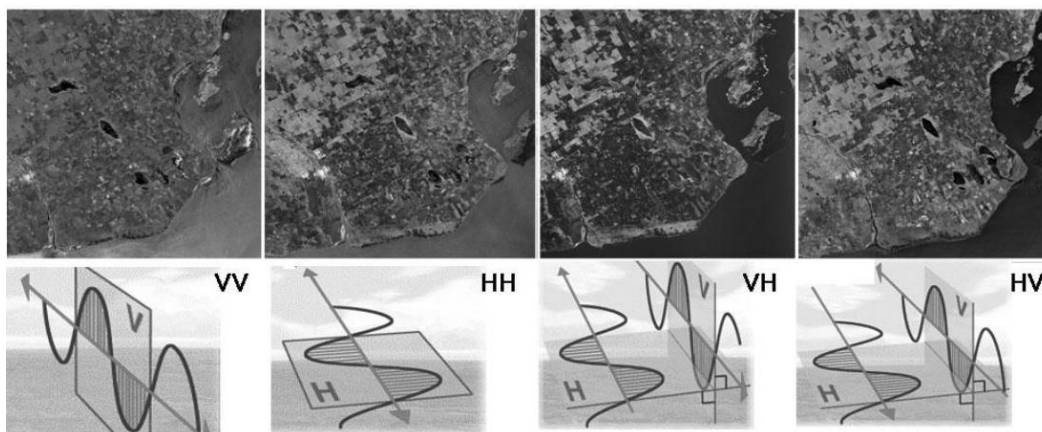
### **2.9.2. Polarización**

La polarización se refiere a la orientación del rayo de energía relativa a la superficie de la Tierra (Fernández Ordoñez, & Soria Ruíz, 2015). La mayoría de los radares se han diseñado para emitir y recibir señales polarizadas horizontal (H) o verticalmente (V) (IGN, s.f.a).



Según Marchionni y Cavayas (2014), los sistemas de radar ofrecen distintas combinaciones de polarizaciones<sup>4</sup> para una misma imagen que seguidamente se detallan:

- Single Pol formada por una escena HH o VV.
- Dual Pol formada por dos escenas HH+HV o VV+VH.
- Quad Pol (polarimétrica) formada por cuatro escenas, una para cada una de las polarizaciones posibles: HH+HV+VH+VV (Figura 10).



**Figura 10. Tipos de polarizaciones**

Fuente: Marchionni y Cavayas (2014).

También el CCRS (2005) destaca que en la polarización se toma en cuenta la orientación, la fase relativa y la periodicidad de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas. Las antenas de los sistemas de radar se pueden configurar para transmitir y recibir radiación electromagnética polarizada ya sea horizontal (H) o verticalmente (V).

Asimismo, el CCRR (2005) afirma que cuando la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida, al sistema se le conoce como polarización similar. HH indica

<sup>4</sup> HH: Modo en que la onda es transmitida horizontalmente y recibida horizontalmente por el RADAR para generar una imagen SAR. HV: Modo en que la onda es transmitida horizontalmente y recibida verticalmente por el RADAR para generar una imagen SAR. VH: Modo en que la onda es transmitida verticalmente y recibida horizontalmente por el RADAR. VV: Modo en que la onda es transmitida transmitida verticalmente y recibida verticalmente por el RADAR.

que la energía se transmite y se recibe horizontalmente polarizada; VV que la energía se transmite y se recibe verticalmente polarizada (CCRR, 2005).

De igual manera, si la energía transmitida se polariza en una dirección ortogonal a la recibida, al sistema se le conoce como de polarización cruzada; HV indica que la transmisión es horizontalmente polarizada mientras que la recepción es verticalmente polarizada; VH indica transmisión verticalmente polarizada y recepción horizontalmente polarizada (CCRS,2005).

Además, la reflexión de una onda de radar al chocar en una superficie puede modificar la polarización, dependiendo de las propiedades de la superficie. Por esta modificación, una cierta superficie puede representarse como escenas diferentes mediante las imágenes de un radar polarimétrico. En muchas ocasiones el tipo de superficie se puede inferir a partir de estas imágenes (CCRS, 2005).

### **2.9.3. Ángulo de incidencia**

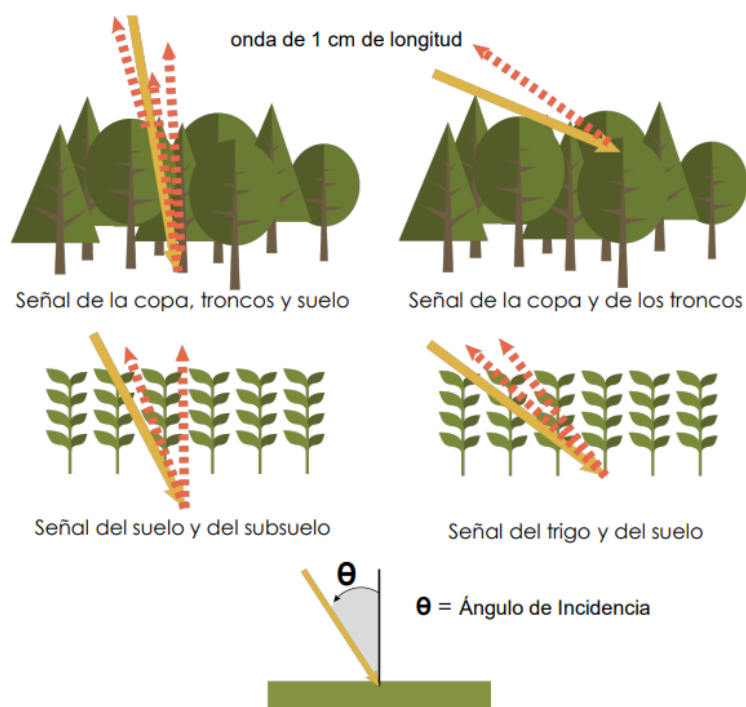
Se mencionó en párrafos anteriores que la geometría de adquisiciones SAR, está compuesta por el ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) que es el ángulo del radar y la vertical local con respecto al geoide, es decir la distancia entre la antena y el objeto (CCRS, 2005; Pascual, 2018; McNairn, & Jiao, 2018).

Según Podest et al. (2020), el ángulo de incidencia es el ángulo entre la dirección de la onda incidente o dirección de iluminación del radar y la vertical de la superficie del terreno (Ver Figura 8).

Estos autores explican que en el proceso de captura de una imagen SAR, los ángulos de incidencia mayores son más sensibles a la rugosidad de la superficie y penetran menos en el medio en comparación con ángulos de incidencia menores, los cuales penetran más las coberturas y presentan mayor retrodispersión (Podest, et al., 2020).

Además, otros aspectos importantes de tomar de en cuenta sobre el ángulo de incidencia en las imágenes SAR son que éste cambia dependiendo de la altura en que se encuentre el sensor

y por lo tanto la geometría de la imagen cambia o varía de punto a punto en la dirección del rango. En la Figura 11 se muestran cuatro ejemplos de variaciones en ángulos de incidencia y sus respectivos alcances de penetración en diferentes coberturas.



**Figura 11. Ángulo de incidencia y penetración en las superficies**

Fuente: Podest, et al. (2020).

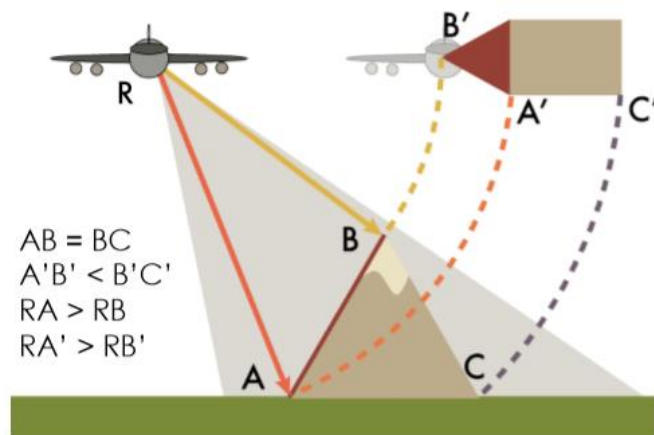
Por otra parte, en los sensores de teledetección óptica la visión del eje óptico de la cámara es perpendicular a la superficie del suelo, en los sensores de radares es lateral y, por esto, los píxeles de las imágenes tienen una resolución diferente en la dirección del azimut y en la dirección del alcance. Además, la configuración de la observación lateral provoca distorsiones geométricas que tienen que corregirse (IGN, s.f.a).

Como se detalló en párrafos anteriores en la geometría de adquisición de la imágenes tiene una gran influencia el sentido del satélite que captura la imagen en su órbita ascendente o descendente, además de la configuración del relieve, debido a que se producen distorsiones geométricas que desfiguran las formas, como consecuencia de los ecos que llegan a la antena

de forma inversa a su posición con respecto a su trayectoria, por lo que es conveniente corregir las imágenes a partir de un modelo digital del terreno (IGN, s.f.a).

Para Pascual (2018), las principales distorsiones que hallamos en las imágenes SAR son las siguientes: Layover, Foreshortening y Shadows; a continuación, se explican brevemente.

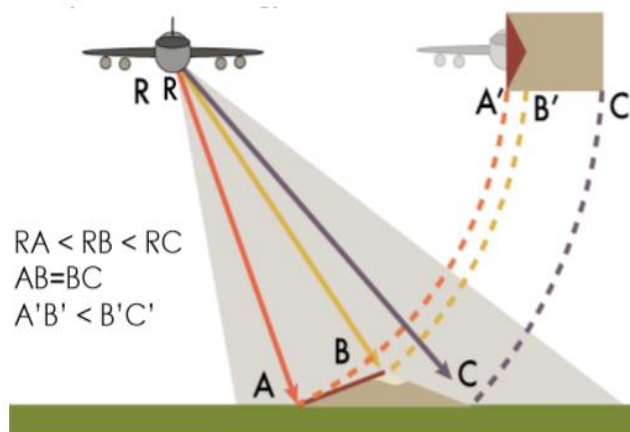
- a) **El layover** o inversión por relieve ocurre cuando la energía reflejada de la porción superior de un objeto se recibe antes que la que proviene de la porción inferior, de tal manera que la parte superior del objeto se verá desplazada de su base (CCRS, 2005, Pascual, 2018) (Figura 12).



**Figura 12. Distorsiones geométricas inversión del relieve**

Fuete: Villegas (2020).

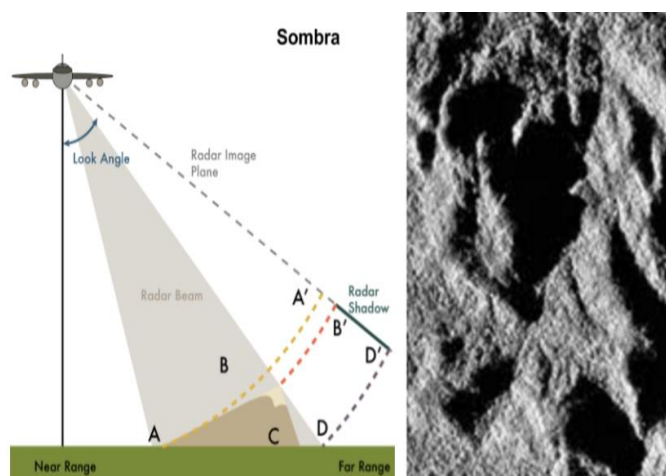
- b) **Foreshortening** o acortamiento frontal es un caso en que los puntos elevados del terreno aparecen desplazados hacia el sensor, debido a que las distancias en la dirección del pulso son menores que las de los puntos bajos del terreno (Ruiz Fernández, 2015; Pascual, 2018) (Figura 13).



**Figura 13. Distorsiones geométricas por desplazamiento de estructuras**

Fuente: Villegas (2020).

- c) **Shadows** o sombreado, que se refiere por la propia definición a las zonas de la imagen de la que no hay retorno de la señal, por lo que hay pérdida completa de información (Pascual, 2018) (Figura 14).



**Figura 14. Distorsiones geométricas por sombras**

Fuente: Villegas (2020).

El CCRS (2005) y Pacual (2018) indican que otro tipo de distorsión clásica en las imágenes SAR, que afecta a la radiometría de la imagen, es el “Speckle” o Moteado (efecto sal y

pimienta), que se refiere a la interferencia coherente de las ondas reflejadas difusamente por los elementos del terreno (CCRS, 2005).

Estos autores también explican que las ondas generadas por un sistema de observación SAR son de naturaleza coherente (diferencia de fase constante), por lo que el fenómeno del Speckle puede definirse como un ruido de naturaleza aleatoria de los elementos de imagen (CCRS, 2005 y Pacual, 2018).

## **2.10. PARÁMETROS DE LA SUPERFICIE**

En el apartado anterior se explicaron los parámetros que influyen directamente en las características de transmisión de la señal vinculados al radar. Por lo tanto, en este apartado se hace referencia a los parámetros vinculados con la superficie, los cuales son la estructura y las propiedades dieléctricas de los objetos; a continuación, estas se describen.

Según Podest et al. (2020), la longitud de onda determinará la manera en cómo interactúa con los objetos en la superficie. En otras palabras, la onda interactuará con aquellos elementos en la superficie que tienen aproximadamente el mismo tamaño del largo de la onda. Por lo tanto, el tamaño de los componentes en la superficie determinará su rugosidad. Además, Podest et al. (2020) explican que la rugosidad de las superficies se refiere a las variaciones promedio en altura de la superficie con relación a una superficie relativamente plana. Según estos autores, estas variaciones, generalmente, están centímetros.

Además, para que una superficie aparente ser lisa o áspera al radar depende de la interacción de la longitud de onda y del ángulo de incidencia, por lo que una superficie se considerará lisa si las variaciones en altura son mucho más pequeñas la longitud de onda del radar. Por consiguiente, una superficie se mostrará áspera a medida que la longitud de onda disminuya (Podest et al., 2020).

A continuación, se explican los mecanismos de estructura, la retrodispersión y su interacción con las diferentes superficies, así como las propiedades dieléctricas de los elementos en la superficie.

### 2.10.1. Estructura

Según Podest et al. (2020), existen tres parámetros relacionados con la estructura, los cuales son: el tamaño del objeto relativo a longitud de onda, tamaño y orientación y densidad. Una vez más y como se ha venido indicando a lo largo de este capítulo, la longitud de onda determinará la manera de interactuar con los objetos en la superficie.

Por lo tanto, **el tamaño relativo** a la longitud de onda definirá la rugosidad de la superficie (Podest et al., 2020), como se mencionó anteriormente, la presencia de los píxeles oscuros se relaciona con superficies lisas con respecto a la longitud de onda; sin embargo, a medida que aumenta la rugosidad en la superficie aumentará la intensidad de la retro dispersión y el brillo en los píxeles (Podest et al., 2020).

Por su parte, **el tamaño y la orientación de los elementos** en la superficie también influyen en la interacción de las ondas que están polarizadas horizontalmente (H) o verticalmente (V) (Podest et al., 2020).

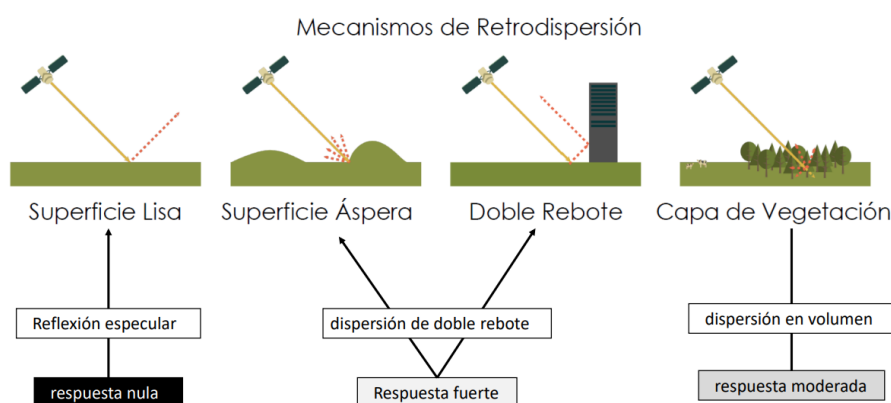
Por último, la densidad de los dispersores y la biomasa influirán en la fuerza de la señal retrodispersada, así como en la profundidad de penetración de la señal, por lo que la señal será más fuerte si los dispersores están más juntos (Podest et al., 2020). Además, cuanto mayor sea la biomasa menor será la penetración de la onda a través de la vegetación. También cuanto mayor sea la densidad de los dispersores menor será la penetración de la onda (Podest et al., 2020).

### 2.10.2. Retrodispersión

Según Agencia Espacial Europea (ESA, s.f.), la retrodispersión es la porción de la señal de radar saliente que el objetivo redirige directamente hacia la antena del radar (Figura 15). La sección transversal de dispersión en la dirección hacia el radar se denomina sección transversal de retrodispersión; la notación habitual es el símbolo sigma ( $\sigma$ ). Es una medida de la fuerza reflectante de un objetivo de radar. Podest, et al. (2020) indican que la intensidad

se puede medir en decibelios (dB). Los decibelios se utilizan para describir los niveles de sonido o número de ciclos de una onda.

La medida normalizada del retorno del radar de un objetivo distribuido se llama coeficiente de retrodispersión, o sigma cero, y se define como por unidad de área en el suelo. Si la señal formada por la retrodispersión no es deseada, se denomina eco parásito. Otras partes de la energía del radar incidente pueden reflejarse y dispersarse fuera del radar o absorberse Agencia Espacial Europea (ESA, s.f.).



**Figura 15. Interacción de la señal del radar Mecanismos de retrodispersión**

Fuente: Corgne (2019).

En la Figura 15 se observan los principales mecanismos de retro dispersión: especular, por doble rebote, de volumen y la difusa. Por regla general, Villegas (2019) indica que entre más alta la retrodispersión más áspera es la superficie observada. A continuación, se explican brevemente la influencia que tienen los tipos de superficies en los mecanismos de retro dispersión, así como cada uno de los mecanismos de retrodispersión.

Las **superficies lisas** (Figura 16) son conocidas como superficies espejos o de **dispersión especular**. La mayor parte de la energía incidente es reflejada en la dirección opuesta al radar y por estas áreas aparecen oscuras en las imágenes. Por ejemplo, aguas o coberturas sin vegetación (Villegas, 2019).

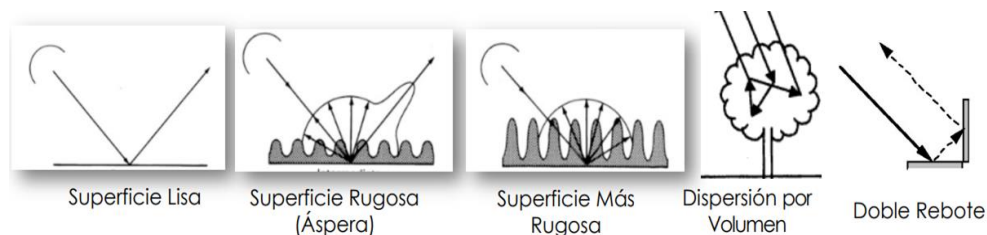


Por otra parte, las **superficies ásperas** (Figura 16) son aquellas que presentan variaciones en altura. Estas variaciones pueden estar vinculadas con las áreas de cambio de cobertura por deforestación o siega en campos de pastos para el pastoreo o cultivos. Este tipo de superficie dispersa la energía aproximadamente en forma igual en todas las direcciones y parte de esta energía llegará al radar (Villegas, 2019).

La retrodispersión **por volumen** (Figura 16) se presenta cuando la señal de radar refleja una entidad 3D varias veces, lo que cambia aleatoriamente la polarización durante los reflejos. La dispersión de volumen puede tener lugar en cubiertas de vegetación corta o escasa, por ejemplo, arbustos, matorrales o cultivos agrícolas o pastos (ArcGIS Pro, s.f.).

Por su parte la retrodispersión por **doble rebote** (Figura 16) se manifiesta cuando la señal del radar se refleja una primera vez en un objeto vertical y una segunda vez en una superficie lisa antes de regresar al sensor (ArcGIS Pro, s.f.). Según el sitio de ArcGIS Pro de ESRI, para esta ruta de dispersión, la polarización no se altera y genera una alta retrodispersión en la banda copolarizada y una baja retrodispersión en la banda con polarización cruzada (ArcGIS Pro, s.f.).

En cuanto a la **dispersión difusa** (Figura 16) la señal de radar se refleja en una superficie rugosa y se dispersa en varias direcciones. Cuanto más rugosa es la superficie, mayor es la dispersión copolarizada (ArcGIS Pro, s.f.). En la dispersión especular también conocida como dispersión hacia delante, la señal de radar se refleja en una superficie lisa en dirección perpendicular a la señal original (ArcGIS Pro, s.f.).



**Figura 16. Interacción de la señal del radar con las superficies**

Fuente: Podest et al. (2020).

Además, el IGN (s.f.b) explica que las propiedades anteriormente descritas, así como las propiedades dieléctricas de las superficies y su rugosidad definirán los valores del coeficiente de retrodispersión ( $\sigma$ ). En el siguiente Cuadro 2 se incluyen los valores típicos del coeficiente de retrodispersión en diferentes superficies.

**Cuadro 2. Valores del coeficiente de retro dispersión**

<b>Valores de retrodispersión</b>	<b>Superficie típica</b>
Muy alto (> de -5 dB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objetos antropogénicos (ambientes urbanos)</li> </ul>
Alto (de -10 dB a 0 dB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendientes con orientación hacia el sensor</li> </ul>
Moderado (de -20 dB a -10 dB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficies rugosas</li> <li>• Vegetación densa (bosques)</li> </ul>
Bajo (< menos de -20 dB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveles medios de vegetación</li> <li>• Cultivos</li> <li>• Superficies moderadamente rugosas</li> <li>• Superficies lisas</li> <li>• Superficies en calma</li> <li>• Carreteras</li> <li>• Suelos muy secos</li> </ul>

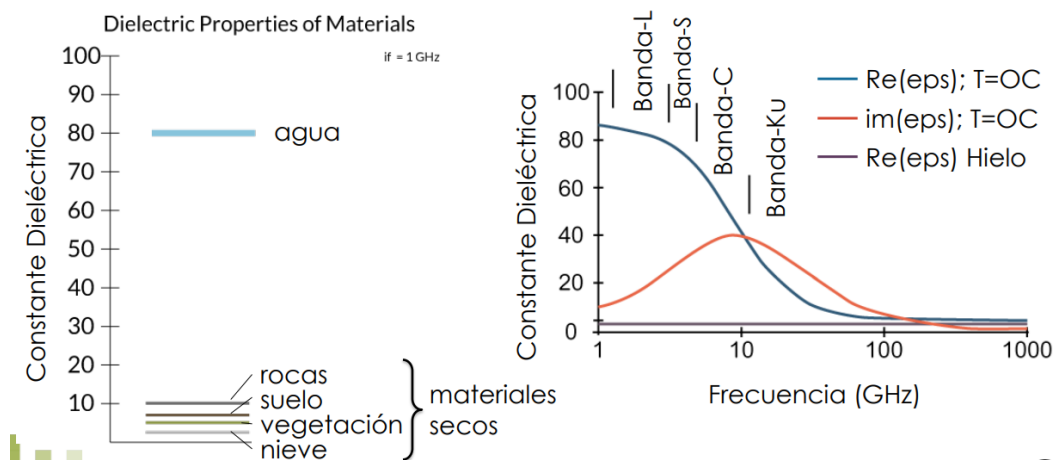
Fuente: IGN (s.f.b).

### 2.10.3. Constante dieléctrica

Según Ruíz Fernández (2015), la constante dieléctrica es una medida de las propiedades eléctricas de los objetos, indicando la reflectividad y conductividad de los materiales. A menor constante dieléctrica, menor es también la reflectancia de un objeto. Además, este autor indica que esta constante influye de forma notoria en la interacción de la radiación electromagnética con la superficie del terreno (Ruíz Fernández, 2015).

Ruíz Fernández (2015) y Podest et al. (2020) indican que la constante dieléctrica de la mayoría de los materiales presentes de forma natural oscila con valores entre 3 y 8 cuando estos se encuentran secos (Figura 17). Por el contrario, el agua posee una constante dieléctrica

de aproximadamente 80 (Figura 17). Por ello, el retorno de la señal de radar depende de gran medida de la cantidad de humedad presente en el suelo y en la vegetación (Ruíz Fernández, 2015).



**Figura 17. Parámetros de la superficie: Constante dieléctrica**

Fuente: Podest et al. (2020).

También estos autores indican que cuanto menor sea la constante dieléctrica, la energía puede penetrar más en profundidad a través del medio en cuestión, por lo que también se ve reducida su reflectancia en la superficie. Por el contrario, cuando un medio posee una elevada constante eléctrica, la interacción de la energía queda limitada a la superficie, siendo menor la penetración y mayor la respuesta global recogida por la antena (Ruíz Fernández, 2015; Podest et al., 2020).

Además, Ruíz Fernández (2015) ratifica que la penetración de la señal es inversamente proporcional al contenido de humedad en el suelo (Ruíz Fernández, 2015). Basados en lo anterior, la ESA (s.f.b) explica que la humedad en suelos o en cubiertas vegetales puede producir un aumento significativo de reflectividad de la señal radar (25-30). Por lo tanto, este tipo de teledetección puede usarse para obtener el contenido en humedad de los suelos.

## 2.11. COBERTURAS DE LA TIERRA Y USO DE LA TIERRA

A nivel mundial, para Di Gregorio y Jansen (1998), la definición de cobertura terrestres es fundamental porque en muchas clasificaciones y leyendas se confunde con el uso del suelo. Por lo tanto, dichos autores la definen como: “La cobertura que se observa sobre la superficie de la tierra”, y que en término amplio no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino también describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (IDEAM, s.f.).

De igual manera, Di Gregorio (2016) indica que la cobertura de la tierra (Land Cover en inglés) puede considerarse una característica geográficamente explícita que se puede utilizar en diferentes disciplinas (geografía, ecología, geología, silvicultura, política y planificación de la tierra) como referencia.

Para García Girón (2020) las actividades humanas reflejadas en la superficie son uno de los principales retos de monitorear a largo plazo, principalmente por problemáticas como la que afronta la seguridad alimentaria en países en desarrollo. Por su parte, Fonseca et al., (2010) indican que las alteraciones del suelo son uno de los componentes más importantes del cambio global y que afectan a los ecosistemas terrestres y causan impactos en el clima, en el ciclo del agua y de los nutrientes y en la biodiversidad.

En Costa Rica, desde el año 2015 se ha venido diseñando y mejorando (aún está en proceso y a la espera de un decreto) el Sistema Nacional de Monitoreo de Cobertura y Uso de la Tierra y los Ecosistemas conocido como SIMOCUTE y que se nutre de la participación de más de 40 instituciones que realizan esfuerzos para la conservación y recuperación de la biodiversidad (Rodríguez, 2020).

Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA, 2020) indica que el SIMOCUTE tiene como objetivo general el conocer el estado actual y los cambios de la cobertura y uso de la tierra y ecosistemas de Costa Rica para proporcionar información periódica con el fin de evaluar el estado de los recursos naturales y la toma de decisiones. Por lo tanto, debido al

nivel de análisis y detalle se tomaron los términos: clasificación de coberturas, cobertura de la tierra y uso de la tierra que el SIMOCUTE define como conceptos claves para el país (CENIGA, 2020) y que en esta propuesta de investigación se utilizarán a lo largo del documento.

- **Clasificación:** es la agrupación de elementos similares en grupos o clases basada en características comunes para la cobertura de la tierra, uso de la tierra y ecosistemas con las definiciones clave asociadas (CENIGA, 2020).
- **Cobertura de la tierra:** cubierta de elementos bióticos y abióticos presente en un sitio (árboles, arbustos, agua, pavimento, techos) (CENIGA, 2020).
- **Uso de la tierra:** corresponde al uso funcional de un sitio (elementos biofísicos y culturales), que requieren del análisis de contexto o inferencia del entorno desde una perspectiva humana y la interpretación de las actividades realizadas sobre la cobertura de la tierra en un sitio determinado; está asociada a un área mínima (forestal, agropecuario, infraestructura) (CENIGA, 2020).

### 2.11.1. Pastos

Las gramíneas se conocen comúnmente como pastos o pastizales y se adaptan con facilidad a diferentes climas y tipos de suelos (Los pastos o gramíneas, s.f., párr. 1). Estas pertenecen a la familia de las monocotiledóneas y presentan características morfológicas como: raíces poco profundas, tallos cilíndricos con nudos, sus hojas son alternadas con paralelas nervaduras, la base de sus hojas se envuelven al tallo y terminan en punta por lo general, sus flores en la mayoría de los casos son espiguillas (Los pastos o gramíneas, Morfología de las gramíneas, s.f., párr. 1).

Además, los pastizales pueden ser ecosistemas con comunidades vegetales donde predominan los pastos con pocos árboles y arbustos, que pueden ser de origen natural o ser producto del desmonte de terrenos boscosos (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México, 2022).

Existen diferencias entre los pastos y los forrajes. En general, se refiere a pasto a las plantas gramíneas y leguminosas que se desarrollan en el potrero y son utilizadas para la alimentación del ganado (Jiménez, 2021). Es decir, cualquier planta natural o cultivada, reproducida sobre la superficie del suelo y que el ganado aproveche para alimentarse mientras circula sobre ellas (Jiménez, 2021).

Por su parte, los forrajes son aquellas hierbas, pastos verdes o secos, también algunas especies vegetales de consumo humano como maíz, caña de azúcar, entre otros que se emplean para alimentar los animales domésticos especialmente el ganado; es decir es todo aquello que sea cosechado para suministrarse como alimento a los animales bien sea verde, seco o procesado (Jiménez, 2021).

Por otra parte, las gramíneas presentan una serie de características únicas, pero en algunos casos se observan modificaciones en sus estructuras que les permiten a cada especie en particular adaptarse a diferentes condiciones del terreno en el que se establezcan. Su apariencia es distinta y varía según su tipo de crecimiento por ejemplo cepa o macolla (erecto) (Los pastos o gramíneas, Morfología de las gramíneas, s.f., párr. 2). Ejemplo de estas gramíneas son maíz forrajero (*Zea mays*), Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) (Los pastos o gramíneas, Crecimiento erecto, s.f., párr. 1).

Una clasificación general de las gramíneas es que pueden servir para el pastoreo. Según Pezo Quevedo (2018), el pastoreo es la forma más frecuente de uso de los pastos, sean estos naturales, naturalizados o mejorados. Con frecuencia es la opción cuando la mano de obra es escasa (Pezo Quevedo, 2018). Sin embargo, estas se pueden clasificar según su tipo de crecimiento. A continuación, se detallan.

- Gramíneas de crecimiento erecto, que son aquellas que crecen perpendicular al suelo. Estas poseen poca protección y cobertura del terreno especialmente en pendientes (Los pastos o gramíneas, Crecimiento erecto, s.f., párr. 1).
- Gramíneas de crecimiento semierecto: Son aquellas en las que sus tallos no son totalmente erectos ni rastreros. Estas gramíneas son de buena calidad para el pastoreo,

ya que resisten el pisoteo del ganado al cubrir bien la superficie del terreno. Algunos ejemplos de este tipo de gramíneas son el pasto Guinea Mombasa (*Panicum maximum* cv. *Mombasa*), el pasto alemán (*Echinochloa polystachya*) y el pasto Marandú (*Brachiaria brizantha* cv. *Marandú*) (Los pastos o gramíneas, Crecimiento semierecto, s.f., párr. 1).

- Gramíneas de crecimiento rastrero: son aquellos pastos en los que sus tallos crecen paralelos al suelo, a diferencia de los pastos de crecimiento erecto y semierecto. Estos pastos proporcionan una mayor cobertura del terreno, formando un “colchón” que protege el suelo de la compactación, y son más resistentes al pastoreo. Algunos ejemplos de este tipo de pastos son el pasto Estrella Africana (*Cynodon plectostachyus*), el pasto Angleton (*Dichanthium aristatum*) y el pasto Climacuna (*Dichanthium annulatum*) (Los pastos o gramíneas, Crecimiento rastrero, s.f., párr. 1).

En relación con el tema de las coberturas de pastos y el uso de sensores remotos, Komisarenko et al. (2022) destacan el uso de técnicas de teledetección, especialmente en Europa y Australia, para la identificación de pastizales para pastoreo y vegetación agrícola. Estas técnicas suelen clasificarse en las siguientes categorías: a. Identificación de pastizales en relación con otros tipos de tierras. B. Clasificación de diferentes tipos de pastizales. C. Monitoreo de eventos o cambios en los pastizales (forrajeros). Es por esta razón que la teledetección desempeña un papel esencial en entornos agrícolas complejos, como la agricultura, y para el monitoreo de estas coberturas vegetales.

## 2.12. ÍNDICES

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este TFG es estimar los cambios en la cobertura de pastos utilizando imágenes de radar del Sensor Sentinel 1<sup>a</sup>. Sin embargo, en el capítulo de metodología, se detalla el intento de correlacionar los valores de intensidad de retrodispersión de los pastos con el índice de vegetación normalizada obtenido de imágenes ópticas, como las capturadas por el sensor Sentinel 2<sup>a</sup>. Por tanto, en este apartado

se abordaron de manera general los conceptos vinculados a los diferentes índices espectrales, prestando especial atención al NDVI, el cual es descrito en los párrafos siguientes.

Autores como Chuvieco (1996) y Escobar Valdivia (2019) establecen que los índices o coeficientes espectrales, como su nombre indica es un cociente o ratio que implica efectuar una división, de píxel a píxel, entre los Niveles Digitales (ND) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Además, estos mismos autores explican que los índices se utilizan ampliamente en dos situaciones.

La primera situación es para mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto en esas dos bandas y la segunda situación es reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas (Chuvieco, 1996; Escobar Valdivia, 2019). Para Muñoz Aguayo (2013), los índices se refieren a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena.

Por otra parte, Díaz Santana (2016) establece que los índices de vegetación son medidas cuantitativas basadas en los valores digitales que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel.

Además, Muñoz Aguayo (2013) y Díaz Santana (2016) también explican que estos índices nos permiten estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, con base en la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable. Los valores bajos de los índices de vegetación, usualmente, indican vegetación poco vigorosa, mientras que los valores altos, indican vegetación muy vigorosa.



Según Gonzaga Aguilar (2014), los índices de vegetación se aplican en análisis cualitativos o cuantitativos. Empleados cualitativamente, permiten determinar rápidamente el estado relativo de la vegetación en una zona. Como una gran variedad de factores afecta directamente la producción de biomasa, los índices pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona o momento.

Por otra parte, existen dos grandes grupos de índices basados en: la pendiente y en la distancia.

### 2.12.1. Índices basados en la pendiente

Según Muñoz Aguayo (2013), los índices basados en la pendiente usan el cociente de la reflectancia de una banda con otra, (usualmente rojo e IR cercano, debido al alto contraste o diferencia en la reflectancia, que presenta la clorofila en ambas bandas). El término 'basado en la pendiente' se refiere a que, al analizar los valores resultantes del índice de vegetación, se comparan esencialmente las pendientes de las líneas que pasan a través del origen y de los píxeles representados en un gráfico, con la reflectancia de una banda en el eje de las X y la reflectancia de la otra en el eje Y (Figura 18).



**Figura 18. Relación entre la reflectancia de la Banda infrarroja y la reflectancia de la Banda Roja**

Fuente: Muñoz Aguayo (2013).

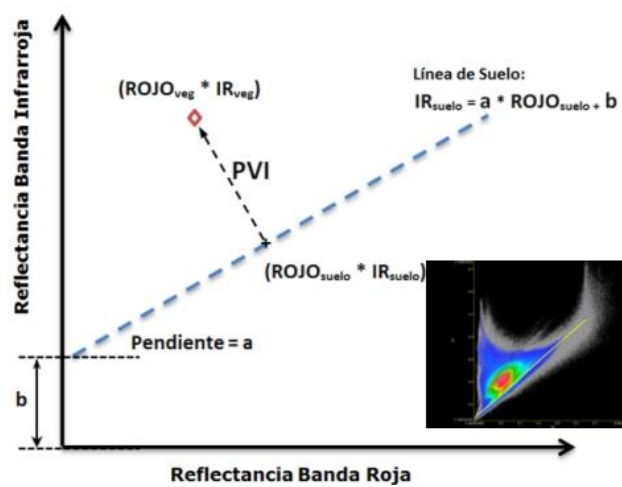
Para Muñoz Aguayo (2013) y Abaurrea Pereda (2013) los índices basados en la pendiente son los siguientes:

- **NDVI**: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado.
- **NRVI**: Índice de Vegetación de Proporción Normalizada
- **TVI**: Índice de Vegetación Transformada.
- **CTVI**: Índice de Vegetación Transformada Corregido.
- **TTVI**: Índice de vegetación Transformada de Thiam.

### **2.12.2. Índices basados en la distancia**

Para Muñoz Aguayo (2013) los índices basados en la distancia están relacionados con los valores de reflectancia registrados por el sensor, para cada píxel, constituyen una reflectancia promedio de todos los tipos de coberturas que están dentro de ese píxel. Cuando en zonas áridas y semiáridas la vegetación es dispersa, la reflectancia recibida pertenece tanto a vegetación como suelo. Estos índices, que tratan de separar la información entre la vegetación y el suelo, se basan en el uso de una línea del suelo y las distancias desde ella (Figura 19).

Por otra parte, Abaurrea Pereda (2013) explica que el procedimiento para estimar los índices basados en la distancia se argumenta en el concepto de la línea del suelo como se mencionó en el párrafo anterior. Este autor indica que la línea del suelo representa una descripción de las firmas típicas de suelos en un esquema biespectral rojo/infrarrojo cercano. Este se obtiene a través de una regresión lineal de la banda infrarroja cercana en contra de la banda roja para una muestra de píxeles de suelo desnudo. Los píxeles que se hallan cerca de la línea del suelo son interpretados como suelos mientras que aquellos lejos de ésta se interpretan como vegetación (Abaurrea, 2013)



**Figura 19. Relación entre la reflectancia de la Banda infrarroja y la reflectancia de la Banda Roja valores de pendiente para índices basados en la distancia**

Fuente: Muñoz Aguayo (2013).

Para Muñoz Aguayo (2013) y Abaurrea Pereda (2013), los índices basados en la distancia son los siguientes:

- **PVI1:** Índice de Vegetación Perpendicular
- **DVI:** Índice de Vegetación de Diferencia.
- **SAVI:** Índice de Vegetación Ajustado al Suelo.
- **TSAVI:** Índice de Vegetación Ajustado de Suelo Transformado.
- **MSAVI:** Índice Modificado de Vegetación Ajustado de Suelo Transformado.
- **WDVI:** Índice de Vegetación de Amplio rango Dinámico de Diferencia Ponderada.
- **NDWI:** Índice de Agua de Diferencia Normalizada.

### 2.12.3. Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. La vegetación sana tiene una curva de reflectancia espectral muy característica de la que podemos sacar partido calculando la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano.

El *NDVI* es esa diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1 (EOS Data Analytics, s.f.a.).

El *NDVI* se calcula a partir de imágenes de satélite y de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

*NIR* – luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano.

*RED* – luz reflejada en el rango rojo del espectro.

De acuerdo con la fórmula del *NDVI*, la densidad de la vegetación (*NDVI*) en un punto determinado de la imagen es igual a la diferencia de las intensidades de luz reflejada en el rango rojo e infrarrojo dividida por la suma de estas intensidades (EOS Data Analytics, s.f.a.).

### **2.13. PRUEBAS ESTADÍSTICAS PARAMÉTRICA**

Hurtado y Berlenga (2011) afirman que las pruebas paramétricas son utilizadas para evaluar la asociación o independencia entre una variable cuantitativa y una variable categórica en análisis estadísticos. En el marco de este Trabajo de Fin de Graduación (TFG), se realizó una prueba estadística paramétrica de coeficiente de correlación de Pearson.

Huacani Calsin (2019) detalla que el coeficiente de correlación de Pearson se calcula a partir de las puntuaciones obtenidas en una muestra de dos variables. Se relacionan las puntuaciones recolectadas de una variable con las puntuaciones obtenidas de la otra, con los mismos participantes o casos.

Según Camacho Martínez (s.f.), el coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil cálculo e interpretación. Este coeficiente permite analizar la relación entre dos variables dos variables  $x$  e  $y$  como  $r_{xy}$  y sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1:  $0 \leq r_{xy} \leq 1$ .

Hernández Sampieri et al. (2006) y Huacani Calsin (2019) explican que el coeficiente de correlación puede variar entre -1 y 1. De igual manera en el sitio web Consultoría Estratégica de Investigación de Mercados (CIMEC, s.f.), explican que un valor menor que 0 indica una correlación negativa, lo que significa que las dos variables están asociadas en sentido inverso. Cuanto más cercano a -1 sea el valor, más fuerte será esa relación invertida. Un valor igual a -1 representa una correlación negativa perfecta (CIMEC, s.f.).

Además, un valor mayor que 0 indica una correlación positiva, lo que implica que las variables están asociadas en sentido directo. A medida que el valor se acerca a +1, la asociación es más fuerte. Un valor exacto de +1 indica una relación lineal positiva perfecta. Finalmente, una correlación de 0, o cercana a 0, indica la ausencia de una relación lineal entre las dos variables.

Para Sánchez (2023), las pruebas de normalidad se utilizan para determinar si una distribución de datos sigue una distribución normal o no. Este autor detalla que estas pruebas son importantes porque muchos procedimientos estadísticos asumen que los datos siguen una distribución normal, y utilizar estos procedimientos con datos que no siguen una distribución normal puede llevar a resultados sesgados o poco precisos (Sánchez, 2023).

La distribución normal es una distribución de probabilidad continuamente curvada y simétrica que se describe mediante una curva en forma de campana (Sánchez, 2023). Este autor afirma que esta distribución es importante en la investigación científica y en la toma de decisiones, debido a sus propiedades matemáticas y a que muchos fenómenos naturales siguen aproximadamente esta distribución (Sánchez, 2023).

Por otro lado, la prueba Shapiro-Wilks es una prueba para la comprobación la normalidad de datos con el objetivo de comprobar si una variable tiene una distribución normal o no. Según Sánchez (2023), la distribución normal es una de las distribuciones más utilizadas en la investigación científica y en la toma de decisiones en general, por lo que es importante determinar si los datos que se tienen disponibles se ajustan a esta distribución para poder utilizarlos los procedimientos estadísticos adecuados.

Flores Tapia y Flores Cevallos (2021) aseguran que el no cumplimiento del supuesto de la normalidad de los datos afecta a los test de hipótesis paramétricos y a los modelos de regresión, siendo su principal consecuencia, por un lado, la ineficiencia del estimador mínimo-cuadrático o estimador de la curva de mínima de varianza y, por otro, los intervalos de confianza de los parámetros del modelo y los controles de significancia son solamente aproximados y no exactos (Flores Tapia, & Flores Cevallos, 2021).

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La metodología de este Trabajo de Final de Graduación (TFG) se basa en un enfoque empírico-analítico descrito por Radrikan (2005) y García Girón (2020). Este enfoque combina el análisis estadístico cuantitativo, la experimentación y la observación de fenómenos. Según García Girón (2020), es aplicable en este caso, debido al uso de imágenes capturadas por sensores remotos.

Además, el enfoque utilizado se complementó con el análisis de fotointerpretación visual de las imágenes en composición RGB del Sentinel 1<sup>a</sup>, comparándolas con imágenes ópticas históricas disponibles en la plataforma Google Earth Pro. El objetivo fue interpretar, identificar y analizar los posibles cambios registrados en la cobertura de pastos en el área de estudio para el año 2019.

### **3.2. INSTRUMENTOS**

Durante el desarrollo de este Trabajo Final de Graduación, se utilizó información obtenida de sensores remotos, específicamente del radar Sentinel 1<sup>a</sup> y sus imágenes procesadas en modo GRD (Ground Range Detected) IW (Interferometric Wide).

Estos datos se procesaron utilizando el software SNAP ESA 9.0. Además, se utilizó el programa Google Earth Engine para el procesamiento de imágenes ópticas capturadas por el sensor Sentinel 2<sup>a</sup>. Se desarrolló un código en JavaScript que se incluye en el Anexo 1. Se seleccionaron las imágenes ópticas disponibles durante el período de estudio, asegurándose de que el porcentaje de cobertura nubosa fuera inferior al 20%, con el objetivo de calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para los meses analizados

Para llevar a cabo los análisis estadísticos, se empleó el programa Rstudio (versión 2022.07.2). Asimismo, se utilizó el programa QGIS Desktop 3.22.5 para generar la cartografía. Por otro lado, se recurrió al programa Google Earth Pro para llevar a cabo la interpretación y análisis visual de los cambios en la cobertura de pastos para el año 2019.

En cuanto al Google Earth Pro, Torre Pillpa y Rivas Aquino (2019) explican que el Google Earth Pro, es un programa informático que muestra de un globo virtual, en donde se permite visualizar múltiples cartografías, basada en las fotografías satelitales; el mapa de Google Earth está conformada por una superposición de imágenes obtenidas por imágenes satelitales, fotografías aéreas, informaciones geográficas originarios de modelos de datos SIG: Este programa se utilizó como plataforma para visualizar temporalmente la serie de imágenes históricas disponibles para el año 2019 en el área de análisis.

En síntesis, en este Trabajo Final de Graduación se realizó mediante el uso de diversas herramientas y programas de uso libre, como el Radar Sentinel 1<sup>a</sup> y sus imágenes procesadas en modo GRD IW, SNAP, Google Earth Engine, Rstudio, QGIS Desktop 3.22.5 y Google Earth Pro, con el objetivo de obtener, procesar, analizar y representar los datos y resultados obtenidos.

### **3.3. SENTINEL-1<sup>a</sup>**

#### **3.3.1. Características de la misión Sentinel-1<sup>a</sup>**

De acuerdo con la ESA (s.f.a) la misión Sentinel-1 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar, que operan día y noche y generan imágenes de radar de apertura sintética de banda C, lo que les permite adquirir imágenes independientemente del clima. Además, la misión está diseñada para proporcionar una mayor frecuencia de revisión, cobertura, oportunidad y confiabilidad para servicios operativos y aplicaciones que requieren series de tiempo largas (ESA, s.f.a).

Asimismo, la ESA (s.f.a) y Jara Santillán (2022) explican que el sensor Sentinel-1 proporciona datos para aplicaciones como monitoreo marítimo, monitoreo terrestre y gestión de emergencias, incluyendo seguimiento de la extensión y volumen del hielo marino principalmente en el Ártico, vigilancia del medio marino, vigilancia de derrames de hidrocarburos, detección de buques para la seguridad marítima, monitoreo de la superficie terrestre para detectar riesgos de terremotos o deslizamientos, monitoreo de bosques,



inundaciones, áreas y tipos de cultivos, monitoreo para apoyar la ayuda humanitaria y situaciones de crisis (ESA (s.f.a; Jara Santillán, 2022).

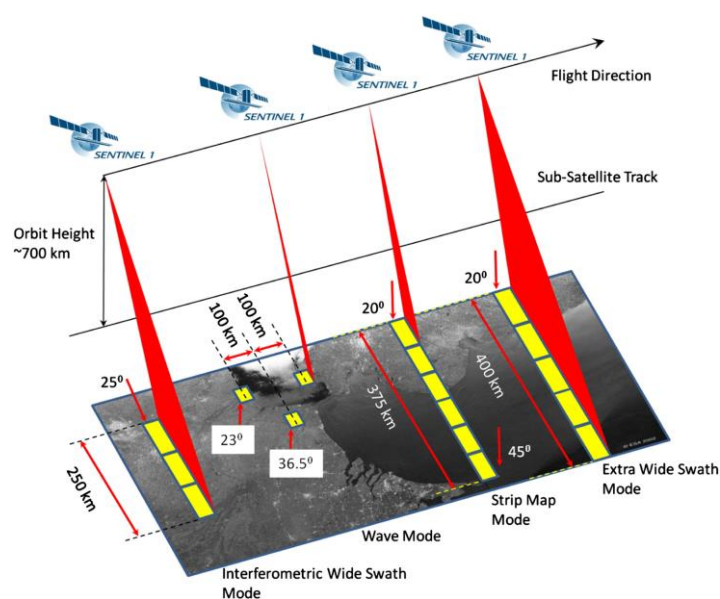
### 3.3.2. Modos de adquisición

La ESA (s.f. a) y Jara Santillán (2022) indican que el sensor Sentinel-1 opera en cuatro modos de adquisición exclusivos con diferente cobertura y resolución: Stripmap (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra-Wide Swath (EW) y Wave Mode (WV); a continuación, estas se detallan.

- Franja de mapa “**stripMap**” (SM): Proporciona datos con una resolución espacial de 5m x 5m y una escena de vista del sensor sobre la superficie terrestre de 80 km. Solo se usa para islas pequeñas y bajo petición, para eventos extraordinarios como la gestión de emergencias (ESA, s.f. a).
- Amplia banda interferométrica “**Interpherometric Wide Swath**” (IW): Este modo combina un ancho de escena de 250 km con una resolución moderada de 5m x 20m. Modo de adquisición predeterminado y principal de Sentinel-1 sobre tierra con resoluciones geométrica y radiométrica adecuadas para la mayoría de las aplicaciones (ESA, s.f. a).
- Franja externa ancha “**Extra-Wide Swath**” (EW): Este modo se emplea sobre zonas marítimas europeas y áreas del Ártico y del océano Austral, donde se necesita una gran cobertura y tiempos de revisita cortos. El ancho de escena en este modo es de 400 km con una resolución de 20m x 40m. Se usa en aplicaciones relacionadas con el tráfico marítimo, posibles derrames de petróleo y para la supervisión del hielo marino (ESA, s.f. a).
- Modo de ondas “**Wave**” (WV): Este modo pretende ayudar en la determinación de la dirección y altura de olas en el océano. Se compone de imágenes con una resolución de 20 km x 20km que se adquieren alternativamente con dos ángulos de incidencia cada 100 km, es decir, dos imágenes con el mismo ángulo de incidencia están

separadas 200 km (ESA, s.f. a). En la Figura 20 se incluyen los modos de adquisiciones de datos de los sensores Sentinel-1.

Para este trabajo, se ha elegido el modo de adquisición “**Interferometric Wide Swath**” (IW), que se caracteriza por su amplia cobertura y resolución.



**Figura 20. Modos de adquisiciones del sensor Sentinel-1**

Fuente: ESA (s.f.a).

### 3.3.3. Tipos de producto y niveles de procesamiento

Además, según la Guía de usuario los productos Sentinel-1 (ESA, s.f.b.), se pueden adquirir en las siguientes resoluciones dependiendo del modo de adquisición y el nivel de procesamiento:

- **Nivel – 0:** Los productos de nivel 0 de SAR consisten en datos sin procesar de SAR comprimidos y desenfocados. Los productos de nivel 0 son la base a partir de la cual se fabrican todos los demás productos de alto nivel (ESA, s.f.b). Además, los datos de nivel 0 incluyen ruido, calibración interna y paquetes de fuente de eco, así como información de órbita y actitud. Es importante mencionar que los productos de nivel

0 están disponibles para los usuarios de datos solo para los modos SM, IW y EW (ESA, s.f.b).

- **Nivel – 1:** Los datos enfocados de nivel 1 son los productos destinados a la mayoría de los usuarios de datos. El producto de nivel 0 (datos sin procesar) se transforma en un producto de nivel 1 mediante la instalación de procesamiento de instrumentos (IPF) mediante la aplicación de varios algoritmos, como se indica a continuación. Estos productos de Nivel 1 forman un producto de referencia del que se derivan los productos de Nivel 2 (ESA, s.f.b).
- La ESA (s.f.b) explica que los pasos de procesamiento involucrados para producir los productos de datos de Nivel 1 incluyen el preprocesamiento, la estimación del centroide Doppler, el enfoque complejo de una sola mirada y el procesamiento posterior y de imágenes para la generación de los productos SLC y GRD, así como el procesamiento específico del modo para ensamblar múltiples sub -productos de hilera (ESA, s.f.b).

Por otra parte, según la ESA (s.f.b), los datos de nivel 1 se pueden procesar en productos Single Look Complex (SLC) y Ground Range Detected (GRD). Los productos SLC conservan la información de fase y se procesan con el espaciado natural de píxeles, mientras que los productos GRD contienen la amplitud detectada y tienen múltiples aspectos para reducir el impacto del moteado (s.f.b).

**Nivel de procesamiento Single Look Complex:** la ESA (s.f.b) explica que el Nivel Single Look Complex (SLC) consisten en datos SAR enfocados, georreferenciados utilizando datos de órbita del satélite, y proporcionados en geometría de rango inclinado.

**Nivel de procesamiento Ground Range Detected (GRD) de nivel 1.** Según la ESA (s.f.b), estos consisten en datos SAR enfocados que se han detectado, analizado y proyectado al rango terrestre utilizando el modelo de elipsoide terrestre WGS84. La proyección elipsoide de los productos GRD se corrige utilizando la altura del terreno especificada en la anotación

general del producto. La altura del terreno usada varía en azimut, pero es constante en rango (pero puede ser diferente para cada subfranja **IW/EW**).

### **3.3.4. Resolución**

En cuanto a la resolución de los productos nivel 1 de procesamiento GRD, la ESA (s.f. a) y Jara Santillán (2022) explica que éstos están disponibles en una de tres resoluciones espaciales: 1) Full Resolution (FR) para el modo SM, 2) High Resolution (HR) para los modos **SM, IW** y **EW** y 3) Medium Resolution (**MR**) para los modos **SM, IW, EW** y **WV**. Además, como se ha mencionado en párrafos anteriores, cada imagen está en polarización **VV** y **VH** para los productos **GRD** de nivel 1 en **HR** en modo **IW** que tiene una resolución espacial de 10 m x 10 m.

Aunque en este apartado se han descrito los diferentes tipos de productos y niveles de procesamiento disponibles para las imágenes capturadas por el sensor Sentinel-1, es importante aclarar que, debido a la naturaleza de este TFG, se ha seleccionado el nivel de procesamiento Ground Range Detected (GRD) de nivel 1. Esto se debe a que el parámetro utilizado para identificar los cambios en la cobertura de pastos se basa en la intensidad de la retrodispersión en dos polarizaciones.

### **3.4. SENTINEL-2<sup>a</sup>**

En este Trabajo Final de Graduación, se ha enfocado en el análisis de imágenes capturadas por el radar Sentinel-1<sup>a</sup> en su modo GRD IW (imágenes de radar). No obstante, para obtener información sobre el estado de vigor de la vegetación durante el período de estudio en 2019, fue necesario recurrir a imágenes ópticas derivadas del sensor Sentinel-2<sup>a</sup>. A continuación, se proporcionará una breve descripción de este producto.

La misión Copernicus Sentinel-2, según la información proporcionada por la Agencia Espacial Europea (ESA), consta de una constelación de dos satélites en órbita polar que comparten la misma órbita sincrónica con el sol, con una separación de fase de 180° entre ellos. Su principal objetivo es monitorear las variaciones en las condiciones de la superficie

terrestre. Gracias a su amplio ancho de barrido de 290 km y un tiempo de revisión elevado de 10 días en el ecuador utilizando un solo satélite, o 5 días con ambos satélites en condiciones libres de nubes, se puede obtener una cobertura de 2-3 días en latitudes medias. Esto permite un seguimiento efectivo de los cambios que ocurren en la superficie terrestre.

De acuerdo con Samudio (2019), el satélite Sentinel-2 está equipado con 13 bandas espectrales que abarcan desde el rango visible (VNIR) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Estas son las siguientes: Cuatro bandas de 10 metros: las tres bandas RGB clásicas (azul ~497 nm, verde ~560 nm y roja ~665 nm) y una banda de infrarrojo cercano (835 nm).

Seis bandas de 20 metros: cuatro bandas estrechas en el rango espectral del borde rojo de la vegetación VNIR (~704 nm, ~740 nm, ~783 nm y ~865 nm) y dos bandas SWIR más amplias (1610 nm y 2190 nm), útiles para aplicaciones como la detección de nieve, hielo, nubes y la evaluación del estrés hídrico en la vegetación. Tres bandas de 60 metros diseñadas principalmente para la detección de nubes y la corrección atmosférica (~443 nm para aerosoles, 945 nm para vapor de agua) y la detección de cirros (~1374 nm).

### **3.5. DESCARGA Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SENTINEL 1<sup>a</sup> GRD IW**

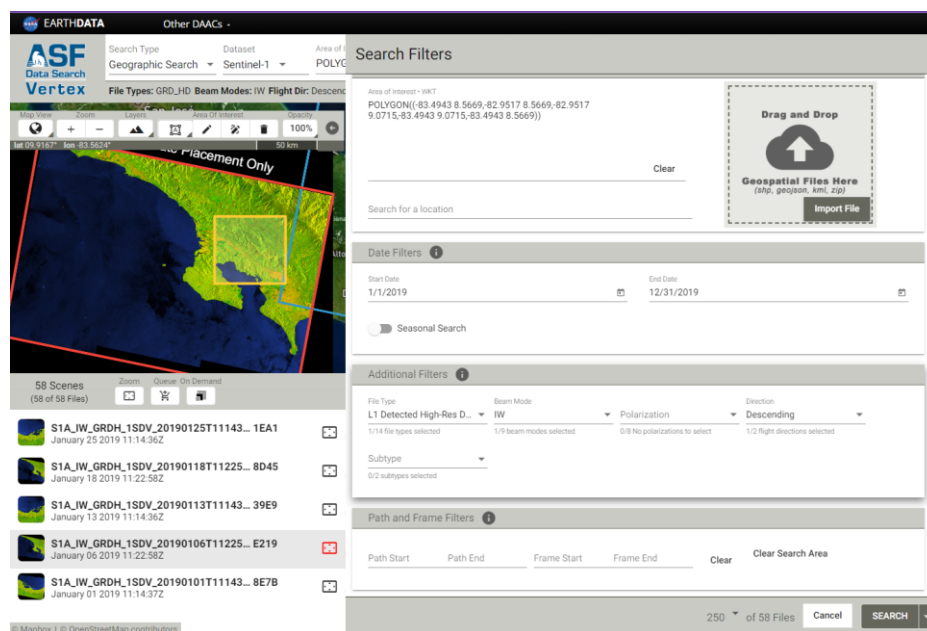
#### **3.5.1. Descarga de las imágenes Sentinel-1<sup>a</sup>**

Para llevar a cabo el análisis de los cambios en la cobertura de pastos en la Región Brunca de Costa Rica, se procedió a descargar todas las imágenes disponibles del Sentinel-1<sup>a</sup> en el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2019. En total, se obtuvieron 29 imágenes, teniendo en cuenta como criterio el recuadro de la Subregión o subset presentado en la Figura 3 del Capítulo 1 de este TFG. Además, se consideró la resolución temporal de doce días del sensor Sentinel-1<sup>a</sup> (Tabla 1)

La descarga de las imágenes se realizó utilizando la plataforma Alaska Satellite Facility Data Search Vertex.1 (2019), también conocida como ASF Data Search (Figura 21). Se optó por esta plataforma en lugar del sitio de Copernicus de la Agencia Espacial Europea, debido a la

facilidad que ofrece su interfaz para seleccionar los criterios y filtros de búsqueda de los productos. Es importante mencionar que la descarga de productos en esta plataforma es gratuita y de acceso libre. Sin embargo, es necesario registrarse para crear un usuario y una contraseña.

Los criterios y filtros utilizados para la selección de las imágenes Sentinel-1<sup>a</sup> fueron los siguientes: se descargó el nivel 1 Ground Range Detected High Resolution Dual Pol (GRD-HD), en el modo de operación Interferometric Wide Swath (IW) con polarizaciones en VH – VV. Se priorizó la geometría de observación con órbita descendente. Es importante destacar que el paso del sensor sobre el área de estudio se registró entre las 11:22 y 11:23 UTC-6, lo que equivale a las 5:22 y 5:23 de la mañana cada doce días (Tabla 1).



**Figura 21. Filtros para la selección de las imágenes Sentinel-1**

Fuente: ASF Data Search Vertex (2023).

**Tabla 1. Lista de imágenes Sentinel-1 utilizadas para el análisis de cambios en la cobertura de pasto**

Fecha	Satélite	Detalle	Polarización	Órbita
06-01-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190106T112258_20190106T112323_025356_02CE8D_E219	VV+HH	Descendente
18-01-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190118T112258_20190118T112323_025531_02D4DD_8D45	VV+HH	Descendente
30-01-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190130T112258_20190130T112323_025706_02DB43_4797	VV+HH	Descendente
11-02-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190211T112257_20190211T112322_025881_02E185_703E	VV+HH	Descendente
23-02-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190223T112257_20190223T112322_026056_02E7C0_000A	VV+HH	Descendente
07-03-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190307T112257_20190307T112322_026231_02EE00_0894	VV+HH	Descendente
19-03-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190319T112257_20190319T112322_026406_02F47E_A9BF	VV+HH	Descendente
31-03-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190331T112258_20190331T112323_026581_02FAEC_DCC1	VV+HH	Descendente
12-04-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190412T112258_20190412T112323_026756_030155_E402	VV+HH	Descendente
24-04-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190424T112258_20190424T112324_026931_0307AB_6A17	VV+HH	Descendente
06-05-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190506T112259_20190506T112324_027106_030E0E_D5CD	VV+HH	Descendente
18-05-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190518T112259_20190518T112324_027281_031389_27E5	VV+HH	Descendente
30-05-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190530T112300_20190530T112325_027456_0318FE_BCA1	VV+HH	Descendente
11-06-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190611T112300_20190611T112325_027631_031E59_34CD	VV+HH	Descendente
05-07-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190705T112302_20190705T112327_027981_0328D8_3ABD	VV+HH	Descendente
17-07-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190717T112303_20190717T112328_028156_032E26_2C50	VV+HH	Descendente
29-07-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190729T112304_20190729T112329_028331_03337E_BF22	VV+HH	Descendente
10-08-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190810T112304_20190810T112330_028506_0338F7_A37C	VV+HH	Descendente
22-08-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190822T112305_20190822T112330_028681_033F04_C933	VV+HH	Descendente
03-09-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190903T112306_20190903T112331_028856_03451F_5621	VV+HH	Descendente
15-09-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190915T112306_20190915T112331_029031_034B36_CB8E	VV+HH	Descendente
27-09-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190927T112307_20190927T112332_029206_03512B_0847	VV+HH	Descendente
09-10-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191009T112307_20191009T112332_029381_035733_8658	VV+HH	Descendente
21-10-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191021T112307_20191021T112332_029556_035D41_05AD	VV+HH	Descendente
02-11-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191102T112307_20191102T112332_029731_036353_FD33	VV+HH	Descendente
14-11-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191114T112307_20191114T112332_029906_036977_9C27	VV+HH	Descendente
26-11-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191126T112306_20191126T112332_030081_036F89_0ED7	VV+HH	Descendente
08-12-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191208T112306_20191208T112331_030256_03758A_EDED	VV+HH	Descendente
20-12-2019	S1A	S1A_IW_GRDH_1SDV_20191220T112305_20191220T112331_030431_037B9E_E5AB	VV+HH	Descendente

Fuente: Elaboración propia (2023).

Hervés Blanco (2019) explica que al momento de la descarga de las imágenes Sentinel-1<sup>a</sup>, éstas se encuentran en unidades de amplitud codificada en niveles digitales de 16 bits, tanto para la polarización en VV como VH. Por lo tanto, Hervés Blanco (2019) indica que es necesario transformar estos datos en coeficientes de retrodispersión en unidades de decibelios y darles una referencia geográfica.

### 3.5.2. Procesamiento de las imágenes Sentinel-1<sup>a</sup>

El procesamiento de las imágenes Sentinel-1<sup>a</sup> GRD IW utilizadas en este TFG se llevó a cabo utilizando el software libre ESA SNAP 9.0. Este programa ofreció una amplia gama de herramientas para realizar correcciones orbitales, radiométricas, geométricas y topográficas, así como filtros, conversiones de valores y la compilación de las imágenes.

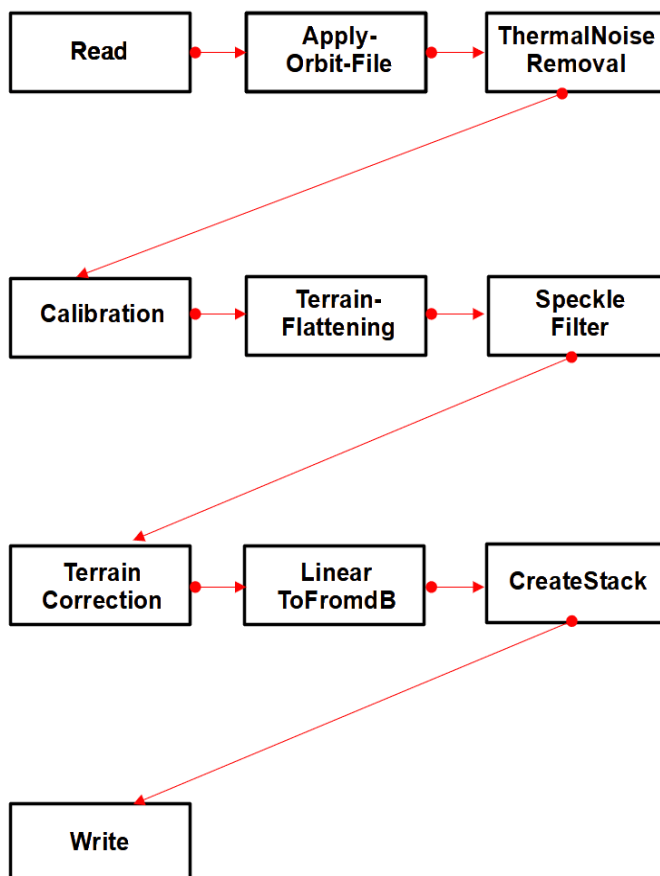
En el sitio eoportal (2022), se explica que el programa ESA SNAP 9.0 es una plataforma de análisis de observación de la Tierra de acceso abierto que cuenta con herramientas de teledetección de código abierto. Esta herramienta permite obtener información ambiental de diversas misiones de teledetección, incluyendo Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3 del Programa Copernicus de la Unión Europea (eoportal, 2022).

Además, según Foumelis (2015), el programa SNAP ofrece una serie de aspectos destacados para el procesamiento de imágenes de satélite, que incluyen:

- Visualización rápida y navegación de imágenes, incluso de imágenes de giga-píxeles.
- Marco de procesamiento gráfico (GPF) para cadenas de procesamiento definidas por el usuario.
- Gestión avanzada de capas para imágenes externas y superposición de datos vectoriales.
- Definiciones ricas de regiones de interés para estadísticas y diversos gráficos.
- Aritmética de banda flexible utilizando expresiones matemáticas arbitrarias.
- Reproyección y ortorrectificación precisas a proyecciones de mapas comunes.
- Geo-codificación y rectificación utilizando puntos de control terrestre.
- Descarga y división automática de modelos digitales de elevación SRTM y órbitas de precisión SAR.
- Biblioteca de productos para escanear y catalogar grandes archivos.
- Soporte de multiprocesamiento y procesadores multinúcleo.
- Visualización integrada de WorldWind (Foumelis, 2015).

Por otra parte, el proceso de tratamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando la herramienta “GraphBuilder” del programa ESA SNAP 9.0. Esta herramienta facilitó un flujo de trabajo coherente y ordenado (Figura 22) que se detallará a continuación.





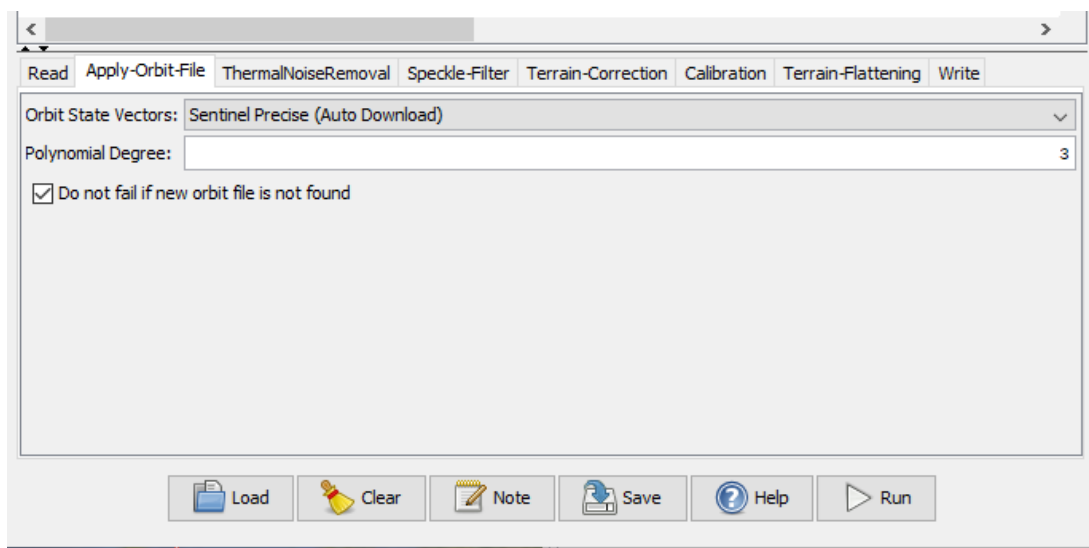
**Figura 22. Flujo de trabajo para el procesamiento de las imágenes Sentinel-1**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.5.3. Corrección de la órbita (Apply – Orbit-File)

Cruz (2020) ratifica que antes de llevar a cabo cualquier tipo de preprocesamiento en las imágenes Sentinel-1, es conveniente realizar un primer paso en SNAP denominado “**apply orbit file**” o corrección de la órbita. Según este autor, normalmente la órbita del satélite es detectada por multitud de sensores y GPS, la cual conlleva un alto tiempo de cálculo para que esa órbita sea precisa, por lo que la precisión de los datos de algunos satélites SAR no es muy elevada.

Este paso ayudará a conseguir datos de la órbita del satélite más precisos, lo que mejorará la geocodificación y otros resultados de futuros procesados de los SAR (Cuz, 2020). Para aplicar este proceso desde el programa SNAP ESA se ingresó a Radar->Apply Orbit File, y se utilizaron los valores por defecto que la herramienta indica (Figura 23).



**Figura 23. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Apply – Orbit-File”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

#### **3.5.4. Reducción del ruido térmico (ThermalNoiseRemoval)**

En términos generales, el ruido término corresponde a una energía aditiva de fondo que provoca ruido de fondo en la imagen SAR (Park, et al., 2018; Wang et al., 2022). Filipponi (2019), Jiménez Abarca y Guerrero Madrigal (2023) explican que la intensidad de la imagen de Sentinel-1 se ve perturbada por dos fuentes de ruido térmico. La primera está relacionada con el patrón de la antena y varía en dirección del alcance. El segundo se conoce como ruido festonado, el cual varía a lo largo de la dirección del azimut (Filipponi, 2019).

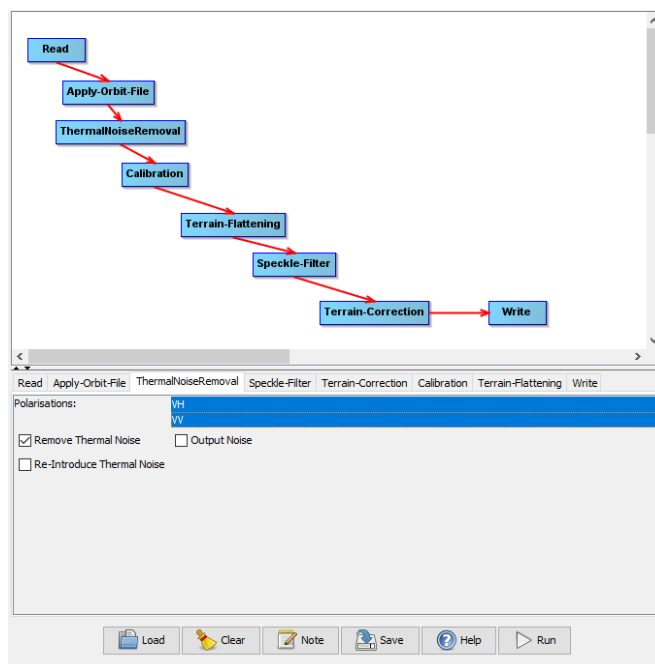
Estos autores ratifican que la eliminación de ruido térmico reduce los efectos de ruido en la textura entre sub-franjas, normalizando la señal de retrodispersión dentro de toda la imagen y dando como resultado discontinuidades reducidas entre sub-franjas para escenas en modos

de adquisición de múltiples franjas (Filipponi, 2019; Jiménez Abarca, & Guerrero Madrigal, 2023).

Por otro lado, en el sitio de ArcGIS Pro de ESRI (ArcGIS Pro, s.f.) se indica que la corrección o eliminación del ruido térmico para normalizar la señal de retrodispersión dentro de toda la imagen de SAR, esencial para el uso cualitativo y cuantitativo de los datos de SAR.

Además, el ruido térmico es más obvio en las imágenes de SAR de polarización cruzada, como VH o HV, e imágenes de SAR con baja retro dispersión (ArcGIS Pro, s.f.). En el caso de Sentinel-1, el ruido térmico puede aparecer como discontinuidades entre franjas y resulta más obvio en las escenas que abarcan el océano (ArcGIS Pro, s.f.).

Para este paso, en la calibración de las imágenes se implementó la herramienta disponible en: Radar-> Radiometric-> S1 Thermal Noise Removal. En este paso se dejaron los parámetros establecidos por defecto en el programa (Figura 24).



**Figura 24. Parámetros para la aplicación de la herramienta “ThermalNoiseRemoval”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.5.5. Calibración (Calibration)

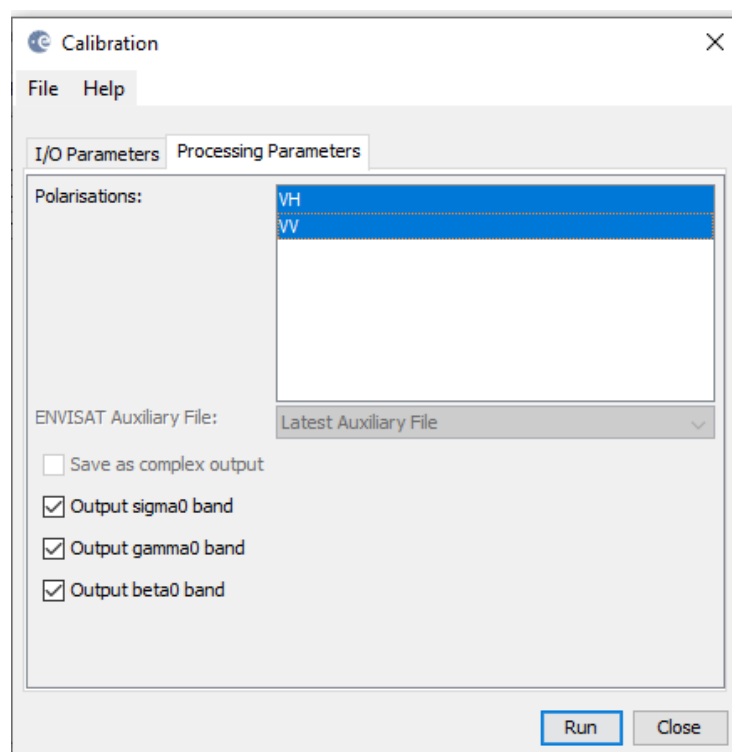
Para Podest (2018a) la calibración radiométrica consiste en generar una imagen en la que cada píxel esté relacionado con la retrodispersión de la escena, lo cual será fundamental en el análisis cuantitativo de los resultados.

Según el IGN (s.f.a), la calibración tiene como objetivo convertir los valores digitales de la imagen en valores radiométricamente calibrados de retrodispersión. La información necesaria para aplicar este proceso desde el programa SNAP 9.0 se encuentra en los metadatos de cada una de las imágenes utilizadas en este TFG. La herramienta toma dichos metadatos y realiza la calibración de la imagen.

Además, IGN (s.f.a) explica que el valor de la retrodispersión está relacionado con las propiedades del radar, es decir con el ángulo de incidencia, la longitud de onda, la polarización; además de las características de la superficie y las propiedades reflectivas de las cubiertas las cuales son: a) el tamaño del objeto relativo a longitud de onda, b) tamaño y orientación de los elementos y c) densidad (en el Capítulo 2 se explicaron con detalle).

Para Bioresita (2019), Podest (2018<sup>a</sup>), Jiménez Abarca y Guerrero Madrigal (2023), el ángulo de incidencia, la pérdida de señal al propagarse y el patrón no uniforme de radiación de la antena pueden afectar el valor de retrodispersión, por lo que se realiza la calibración radiométrica para disminuir esta influencia.

Este paso se realizó con la herramienta que está disponible en Radar->Radiometric->Calibrate. Esta corrección toma como información para la calibración el ángulo de incidencia local. Además, en la segunda pestaña se seleccionaron las dos polarizaciones (VH VV), así como las bandas virtuales beta  $\beta$  y sigma  $\sigma$  virtuales (Figura 25).



**Figura 25. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Calibration”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

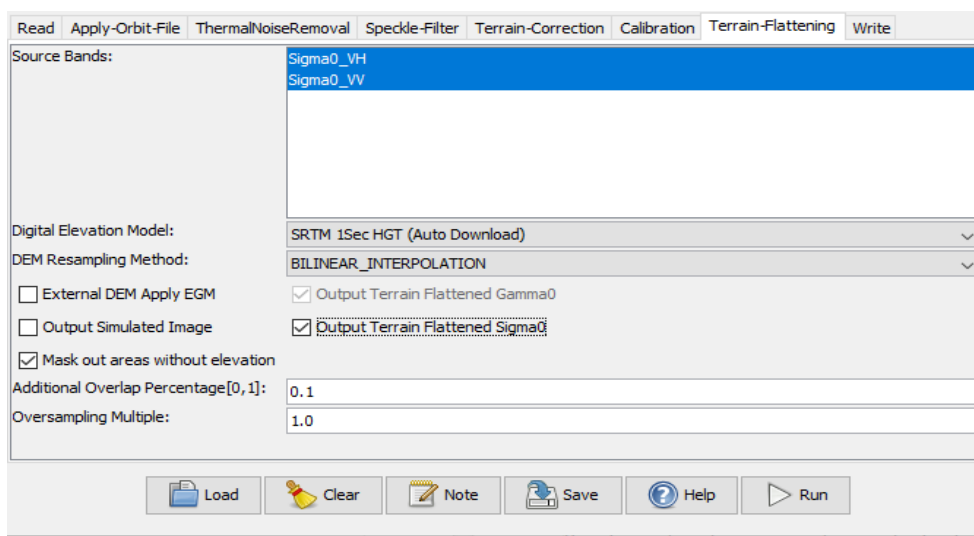
### **3.5.6. Aplanamiento radiométrico de terreno (Terrain-Flattening)**

En el sitio de ArcGIS Pro de ESRI (s.f.) se indica que debido a la naturaleza lateral de los sensores SAR, las características que miran hacia el sensor parecen artificialmente más brillantes y las que miran hacia el otro lado del sensor parecen artificialmente más oscuras. El aplanamiento radiométrico del terreno normaliza los valores de retrodispersión para que las variaciones de los valores se deban a las propiedades de dispersión de la superficie. Es decir, este proceso corrige los datos de entrada del radar de apertura sintética (SAR) por distorsiones radiométricas debidas a la topografía (ArcGIS Pro, s.f.).

Además, el aplanamiento radiométrico del terreno es necesario para obtener una retrodispersión significativa que pueda relacionarse directamente con las propiedades de

dispersión superficial de las características en una imagen SAR sobre cualquier terreno (ArcGIS Pro, s.f.).

Este proceso se aplicó desde la siguiente ruta: Terrain Flattening: Radar-> Radiometric-> Radiometric Terrain Flattening (Figura 26).



**Figura 26. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Terrain-Flattening”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.5.7. Corrección del moteado (Speckle Filter)

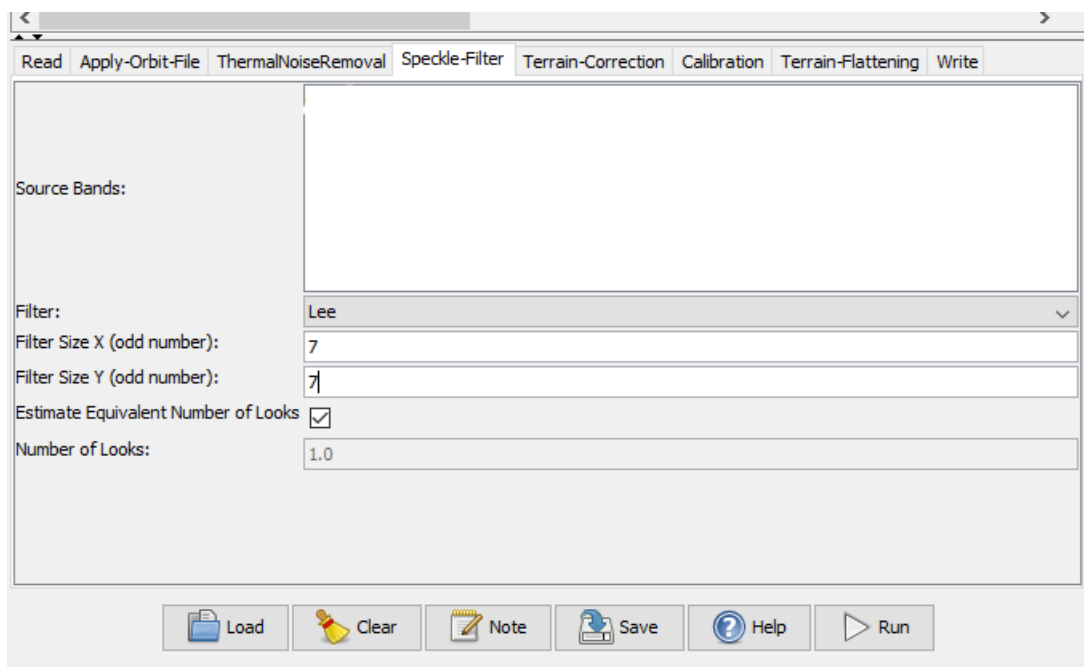
Para Gagnon y Jouan (1997) el ruido por moteado es un fenómeno común en todos los sistemas de imágenes coherentes, como imágenes láser, acústicas y SAR<sup>24</sup>. La fuente de este ruido se atribuye a la interferencia aleatoria entre los retornos coherentes emitido por los numerosos dispersores presentes en una superficie, en la escala de una longitud de onda de la onda de radar incidente (es decir, una celda de resolución). El ruido es a menudo un efecto indeseable, especialmente para los sistemas ATR. Por lo tanto, el filtrado moteado resulta ser un paso de preprocesamiento para la optimización de la detección / clasificación.

Para estos autores, básicamente, las técnicas de reducción de manchas de SAR se clasifican en dos categorías: Técnicas multi-vista o multilooking y la utilización de filtros. El Multilooking consiste, en dividir el ancho de banda del espectro de azimut de la imagen del radar en segmentos o miradas formando imágenes independientes a partir de estos espectros y realizando promedios. Esto reduce el espectro de azimut. Ancho de banda y, por lo tanto, moteado ruido, pero a costa de aumentar la carga computacional y degradar la imagen (Gagnon, & Jouan, 1997).

Además, Gagno y Jouan (1997) establecen que para mejorar de forma mínima la calidad de la imagen, será necesario que el píxel residual se deba procesarse utilizando filtros de formación posteriores a la imagen. Por lo tanto, será necesario explorar y utilizar filtros.

Gagnon y Jouan (1997) mencionan que entre los filtros más utilizados se encuentran los filtros Mediano, Lee, Kuan, Frost y Gamma. Por su parte, Kupidura (2016) y Samudio (2019) indican que los filtros como Lee, Frost o Gamma-MAP su principio de funcionamiento se basa en las propiedades geométricas de la imagen (tamaño y forma de los objetos), no en las estadísticas de valores de píxel y producen muy buenos resultados para la eliminación del moteado.

Basados en lo anterior y con el propósito de eliminar el moteado en las imágenes, se utilizó la herramienta: Radar->Speckle Filtered-> Single Product Speckle Filter y un filtro Lee con ventana de 7x7 (Figura 27). Según Mata Muñoz (2019), Jiménez Abarca y Guerrero Madrigal (2023), la definición del tamaño de ventana de pixeles requiere de especial atención, pues con ventanas más grandes, mayor será la reducción del ruido, pero también será mayor la pérdida de definición en la imagen.



**Figura 27. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Speckle Filter”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.5.8. Corrección del terreno (Terrain Correction)

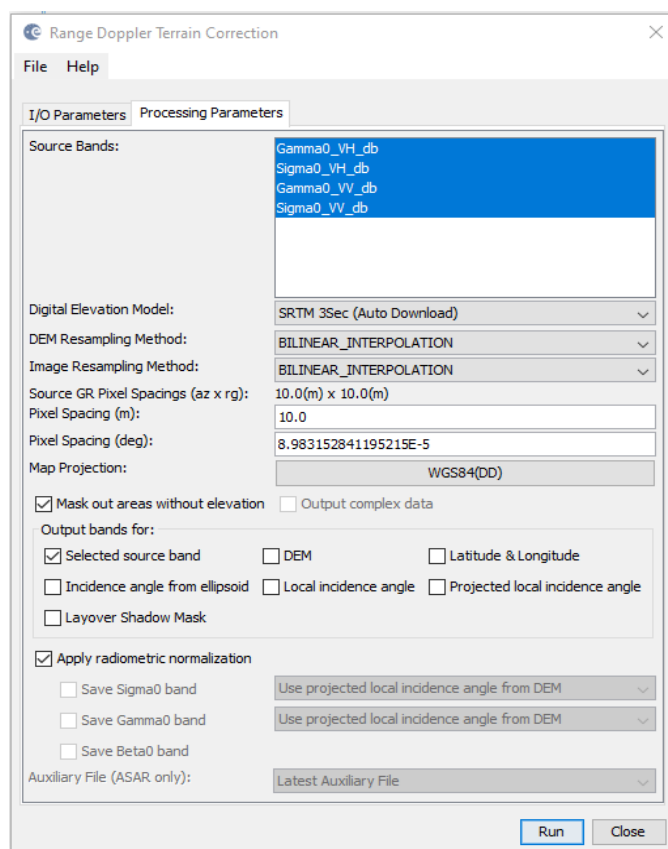
Cabrera et al. (2014) establecen que este proceso corrige los desplazamientos y distorsiones geométricas presentes en una imagen, causados por la inclinación del sensor (posición del sensor en el momento de la toma), la influencia del relieve y los errores sistemáticos asociados con la imagen.

La distorsión geométrica, según Samudio (2019), ocurre principalmente en áreas montañosas o con relieve pronunciado. La autora explica que en las imágenes de radar se pueden presentar efectos como acortamiento, inversión o sombra (en el Capítulo 2 se detallaron), los cuales pueden hacer que las pendientes se vean más pequeñas o grandes de lo que realmente son. Además, el efecto de sombra se produce cuando el relieve es muy pronunciado y algunas laderas quedan en la dirección opuesta a la iluminación del radar, esto genera una falta de ecos reflejados de esa zona en sombra (Solorza, 2013).



Para corregir este efecto, es necesario utilizar un modelo de elevación digital (DEM) a una resolución de 30 metros, el cual está disponible en el software SNAP (Samudio, 2019). No se eligió otro DEM porque este se descarga automáticamente desde la herramienta SNAP y, además, no se contó con un DEM de mayor resolución espacial de acceso libre.

Esta sección se realizó con la siguiente ruta Radar->Geometric->Terrain Correction->Range Doppler Terrain Correction. Observándose una reducción más marcada del relieve Los parámetros utilizados para las correcciones en cada una de las imágenes de este TFG se presentan en la Figura 28.



**Figura 28. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Terrain Correction”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### **3.5.9. LinearToFromdB**

Se mencionó en el Capítulo 2 que la amplitud se mide en decibelios (dB). Por lo tanto, se llevó a cabo la conversión de las bandas, que se encontraban en una escala lineal, a valores de retrodispersión en una escala no lineal logarítmica en decibelios (dB), utilizando la función “Converts bands to/from dB” dentro de la herramienta Radar. Los parámetros de la herramienta se mantuvieron en su configuración predeterminada.

### **3.5.10. CreateStack**

Se mencionó al inicio de este Trabajo Final de Graduación (TFG) que la resolución temporal del sensor Sentinel 1<sup>a</sup> es de doce días. Durante el año 2019, en la Región Brunca de Costa Rica, se capturaron un total de veintinueve imágenes con este sensor (Tabla 1).

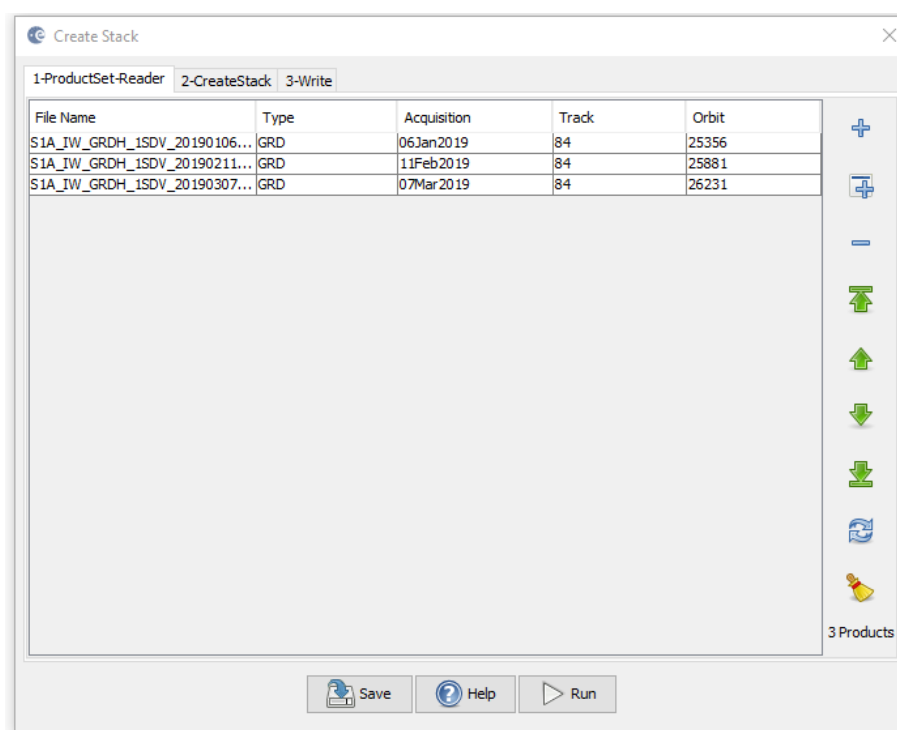
Esta situación condujo a una distribución desigual de las imágenes a lo largo de los meses. En enero, marzo, mayo, julio, setiembre y noviembre se registraron tres imágenes cada uno, mientras que en febrero, abril, agosto, octubre y diciembre se capturaron dos imágenes. Sin embargo, se observó que el sensor solo registró una imagen en el mes de junio, sin que se conozcan las razones detrás de esto (ver Tabla 1). Debido a esta distribución irregular, se decidió no realizar un análisis de los cambios de manera mensual y, en su lugar, se optó por analizarlos por trimestres.

Dado lo anterior se optó por agrupar las imágenes con la herramienta “Stack”. Con respecto a la generación de las imágenes compuestas, se seleccionaron seis imágenes que representan los trimestres para el análisis (Cuadro 3). Cada imagen está compuesta por tres meses, donde cada mes se asigna a una banda respectiva (Rojo-Verde-Azul) en la combinación RGB.

La combinación se llevó a cabo de la siguiente manera: se seleccionó una banda por mes en polarización cruzada VH con intensidad de retrodispersión calibrada  $\sigma_0$  en valores de dB y con proyección WGS84 con correcciones del terreno por lo que se asume que no existen desplazamientos entre las imágenes.

En el Cuadro 3, se muestran las seis imágenes compiladas utilizadas para el análisis multitemporal de los cambios en la cobertura de pastos. Además, se indican las fechas de captura de cada imagen y se especifica la banda correspondiente a cada una. Es relevante destacar que, para realizar el análisis trimestral de la imagen número seis (Cuadro 3), que incluye el mes de diciembre de 2019, se reutilizaron las imágenes de octubre y noviembre.

Para generar el conjunto de imágenes multi-temporales por trimestres (Cuadro 3), se utilizó la herramienta “Radar->Coregistration->Stack Tools->Create Stack” (Figura 29). Para cargar cada una de las imágenes, se hizo clic en el ícono de suma (+) y se seleccionaron y ordenaron de la siguiente manera: primero, la imagen con la fecha de adquisición más antigua; luego, la segunda imagen con la fecha de adquisición intermedia; y finalmente, la tercera imagen con la fecha más reciente de adquisición.



**Figura 29. Parámetros para la aplicación de la herramienta “Create Stack”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.5.11. Combinación RGB

Luego del proceso anterior en el cual se obtuvo el apilamiento de las imágenes por trimestres, se realizó una combinación en RGB: la imagen adquirida en la primera fecha (el mes más antiguo o imagen más antigua) se asignó al canal o la banda del rojo (R), la imagen de la fecha o mes más reciente se asignó al canal azul (B) y la fecha intermedia se asignó al canal verde (G). Esta técnica permitió visualizar la evolución temporal de la cobertura de pastos de manera más clara y significativa. La herramienta composición RGB está en el menú “Window→Open RGB Image Window (Figura 30).

Según Braun (2021), la composición en RGB de las imágenes permite observar la manera en cómo la firma temporal de las coberturas cambia a lo largo del tiempo, debido a la intensidad variable de la retrodispersión que puede ser causada por el desarrollo de los tallos, las hojas y los granos de los cultivos. Esta firma temporal es un indicador significativo del tipo de cultivo respectivo, ya que cada uno sigue un progreso distinto (Braun, 2021).

Sin embargo, es importante destacar que, debido a la naturaleza de este TFG, enfocado en el análisis de cambios en la cobertura de pastos, esta herramienta ha sido un recurso valioso para estudiar y distinguir la variabilidad en la intensidad de los valores de retrodispersión en áreas de pastos, los cuales pueden estar relacionados con variables ambientales específicas de la zona de estudio, como suelos, texturas, precipitaciones, condiciones de sequedad y humedad y relieve. Estos aspectos se explicarán en detalle en el siguiente capítulo.

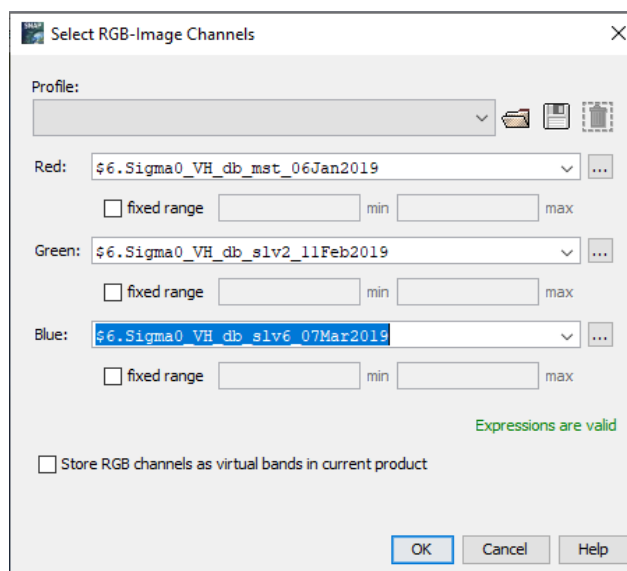
**Cuadro 3. Distribución de imágenes para el análisis multitemporal de los cambios en la cobertura de pastos**

Imagen compilada “Stack”	Número imagen compuesta	Fecha	Mes	Bandas RGB	Frecuencia polarización Valores
Primer trimestre Imagen 1	Imagen 1	06/01/2019	Enero	<b>ROJA (R)</b>	$\sigma - VH - dB$
		11/02/2019	Febrero	<b>VERDE (G)</b>	$\sigma - VH - dB$
		07/03/2019	Marzo	<b>AZUL (B)</b>	$\sigma - VH - dB$
Segundo	Imagen 2	07/03/2019	Marzo	<b>ROJA (R)</b>	$\sigma - VH - dB$

trimestre Imagen 2		12/04/2019	Abril	VERDE (G)	$\sigma$ – VH – dB
		06/05/2019	Mayo	AZUL (B)	$\sigma$ – VH – dB
Tercer trimestre Imagen 3	Imagen 3	06/05/2019	Mayo	ROJA (R)	$\sigma$ – VH – dB
		11/06/2019	Junio	VERDE (G)	$\sigma$ – VH – dB
		05/07/2019	Julio	AZUL (B)	$\sigma$ – VH – dB
Cuarto trimestre Imagen 4	Imagen 4	05/07/2019	Julio	ROJA (R)	$\sigma$ – VH – dB
		10/08/2019	Agosto	VERDE (G)	$\sigma$ – VH – dB
		15/09/2019	Septiembre	AZUL (B)	$\sigma$ – VH – dB
Quinto trimestre Imagen 5	Imagen 5	15/09/2019	Septiembre	ROJA (R)	$\sigma$ – VH – dB
		09/10/2019	Octubre	VERDE (G)	$\sigma$ – VH – dB
		09/10/2019	Noviembre	AZUL (B)	$\sigma$ – VH – dB
Sexto trimestre Imagen 6	Imagen 6	09/10/2019	Octubre	ROJA (R)	$\sigma$ – VH – dB
		02/11/2019	Noviembre	VERDE (G)	$\sigma$ – VH – dB
		08/12/2019	Diciembre	AZUL (B)	$\sigma$ – VH – dB

Simbología:  $\sigma$  = Sigma, Polarización Vertical – Horizontal, valores en decibelios.

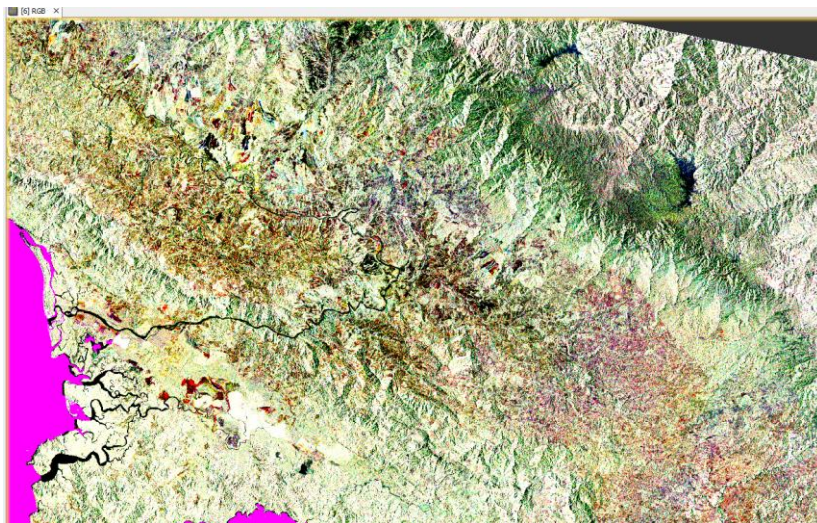
Fuente: Elaboración propia (2023).



**Figura 30. Herramienta composición “RGB”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

El procedimiento descrito anteriormente se repitió para generar las seis imágenes compuestas (Cuadro 3) utilizadas en el análisis realizado en el Capítulo 4 de este Trabajo Final de Graduación. En la Figura 31 se muestra como ejemplo el resultado de la composición en RGB para el área de estudio durante 10 meses de enero (R), febrero (G) y marzo (B) de 2019.

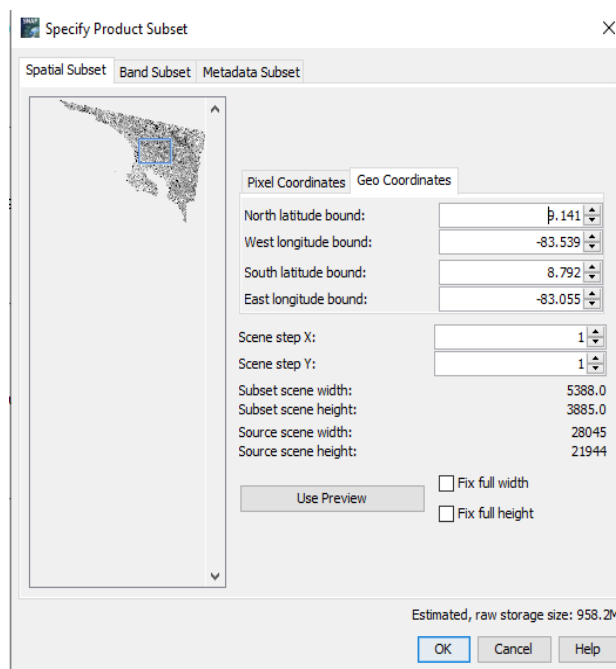


**Figura 31. Herramienta composición “RGB”**

Fuente: Elaboración propia (2023).

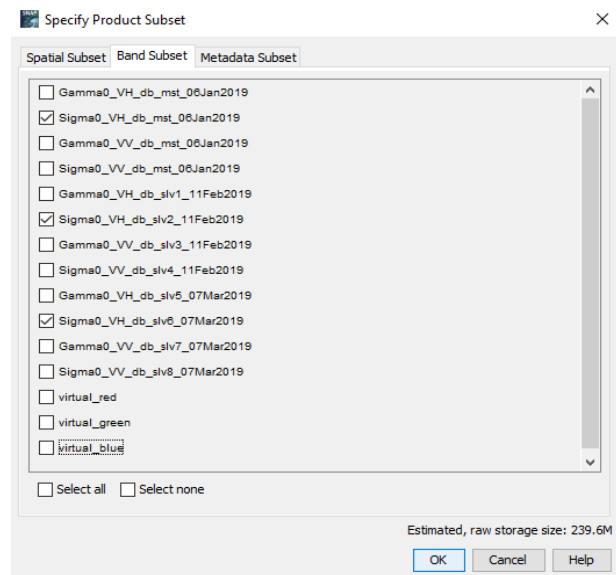
### **3.5.12. Generación de Subset**

Es importante mencionar que por razones de limitaciones de recursos que en el Capítulo 1 se indicaron, se seleccionó un área de menor tamaño dentro de la región Brunca de Costa Rica. Según Alaska Satellite Facility (s.f.a), procesar una imagen grande requiere más tiempo y potencia informática de lo necesario. Crear un subconjunto es una manera fácil de mejorar la eficiencia en el flujo de trabajo (Alaska Satellite Facility, s.f.a). Por lo tanto, desde el programa SNAP ESA, se utilizó la herramienta “Subset” o generar un subconjunto, los pasos se explican a continuación: en el menú "Raster→Subset". Los parámetros para delimitar el área se muestran en la Figura 32, en tanto que los parámetros para definir las bandas que se utilizaron por cada imagen (VH,  $\sigma$  0 valores en dB) se presentan en la Figura 33.



**Figura 32. Herramienta subset para delimitación geográfica**

Fuente: Elaboración propia (2023).



**Figura 33. Herramienta subset para seleccionar las bandas**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.5.13. Exportación de los Subsets

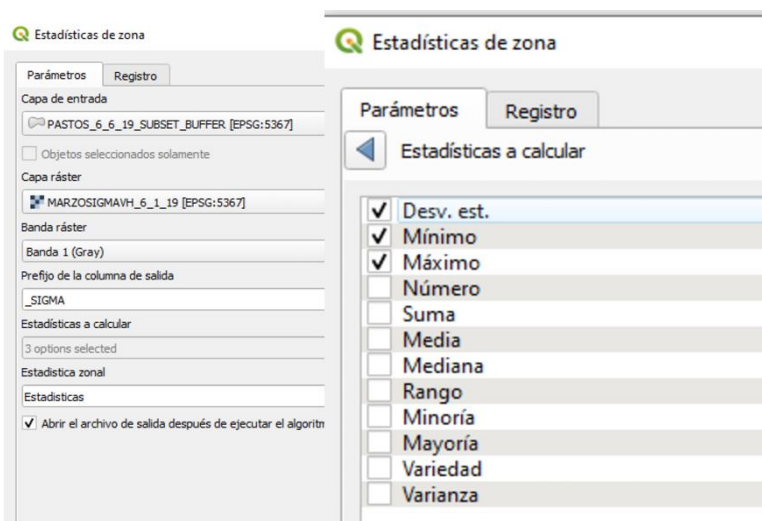
En el siguiente paso de esta metodología, se procedió a exportar las bandas en  $\sigma/VH/dB$  de las imágenes compuestas "Stack" mencionadas en el Cuadro 3, así como las seis imágenes compiladas en una composición RGB, en formato GeoTIFF desde el programa SNAP ESA. Estas exportaciones se realizaron con el propósito de poder procesar y reproyectar los archivos desde su proyección original en WGS84 al sistema de coordenadas oficial del país, CRTM05 en el programa QGIS Desktop 3.22.5 y continuar con el resto del análisis que conllevó este TFG.

Después de reproyectar todos los archivos, se utilizó el complemento "Estadística de zona", desde el programa QGIS. Según el Manual de Usuario de QGIS (QGIS, 2016), este complemento es capaz de analizar los resultados de una clasificación temática y calcular varios valores de los píxeles de una capa ráster utilizando una capa vectorial poligonal. Al seleccionar una banda de color, el complemento genera columnas de salida en la capa vectorial con un prefijo definido por el usuario y calcula estadísticas sobre los píxeles que se encuentran dentro de cada polígono (QGIS, 2016).

Las estadísticas utilizadas que se extrajeron de las bandas de las imágenes del Radar Sentinel 1A GRD IW para la zona de estudio incluyeron (Figura 34): la desviación estándar (**StDev**) para obtener la variabilidad de los valores de píxeles, el mínimo (**Min**) para obtener el valor más bajo de los píxeles, y el máximo (**Max**) para obtener el valor más alto de los píxeles (QGIS, 2016) (Figura 34).

El archivo vectorial con el que se extrajeron las estadísticas zonales de cada una de las bandas se obtuvo de la capa de pastos correspondiente al año 2019 desde la plataforma del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) del Registro Nacional. Esta capa se encuentra en formato **Web Feature Service (WFS)** y fue elaborada por el MOCCUP utilizando imágenes ópticas y datos del año 2018. Esta capa se descargó y exportó como archivo con extensión “.shp”.





**Figura 34. Herramienta Estadísticas de Zona**

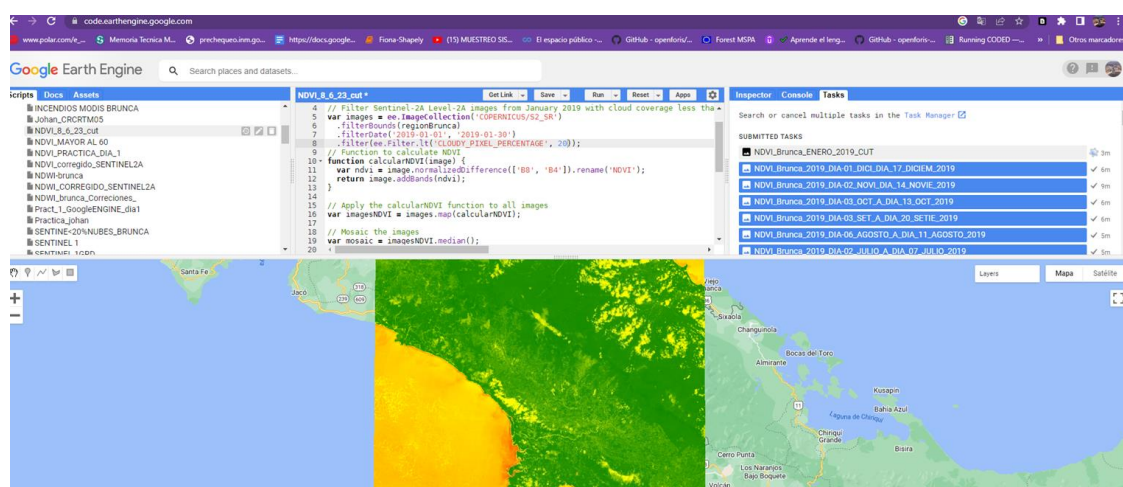
Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.6. GOOGLE EARTH ENGINE NDVI SENTINEL 2A

Para May et al. (2020), los datos de teledetección requieren de altos recursos informáticos, los cuales se traducen en altos costos y limitan la investigación en este campo. Google Earth Engine (GEE) ofrece una solución a esta limitante. Según Liss et al. (2017), Xiong et al. (2017) y May et al. (2020), la plataforma GEE está basada en la nube que permite acceder y utilizar recursos informáticos de alto rendimiento dedicados al análisis de enormes colecciones de datos geoespaciales y que posee un robusto conjunto de datos que incluyen imágenes satelitales de las colecciones Landsat, Sentinel, además de datos climáticos y de coberturas terrestres.

Basados en lo anterior, se decidió utilizar esta plataforma para buscar y adaptar un código que permitiera obtener de manera rápida y eficiente los índices de vegetación normalizados (NDVI) de las imágenes al sensor Sentinel 2A SR, sin necesidad de descargar cada imagen y procesarla. Esta elección se basó en las consideraciones expuestas en el Capítulo 1 de este TFG, donde se detallaron los recursos consumidos en tiempo, espacio de almacenamiento y procesamiento.

Además, es importante destacar que las fechas de las imágenes capturadas por los sensores Sentinel 1A y 2A no coinciden. Por lo tanto, se decidió adaptar el código que se incluye en el Anexo 1, bajo dos condiciones específicas. La primera consistió en realizar una búsqueda de imágenes por mes para estimar un valor promedio del píxel con el NDVI. La segunda condición fue establecer un umbral de porcentaje de nubosidad para cada imagen, el cual variaba según las condiciones ambientales de cada mes, debido a la influencia de la época de lluvias (Figura 35).



**Figura 35. Interfase de la herramienta Google Earth Engine**

Fuente: Elaboración propia (2023).

Es importante tener en cuenta que, debido a que la zona de estudio es una de las más lluviosas del país, no fue posible obtener imágenes ópticas totalmente libres de nubes. Incluso durante la época seca, es poco probable obtener imágenes sin nubes. Por lo tanto, se adaptó el código cada mes para poder obtener las imágenes disponibles, aun cuando hubiera presencia de nubes.

De esta manera, se obtuvieron las imágenes con los valores de NDVI para los meses de enero, febrero y marzo, considerando únicamente imágenes con una cobertura de nubes inferior al 20%. El código se adaptó para el mes de abril, con una cobertura inferior al 30%, para mayo, con una cobertura inferior al 75%, y para junio, con una cobertura inferior al 80%. Luego, el

código se ajustó nuevamente para el mes de julio, con una cobertura de nubes menor al 20%, y para agosto y setiembre, con una cobertura del 50%. Los últimos meses del año 2019 se procesaron con coberturas de nubes menores al 30%, debido a las condiciones ambientales favorables que permitieron obtener imágenes con esos porcentajes de nubosidad.

Todos los archivos en formato .TIF con los valores de NDVI se descargaron y almacenaron como rasters con una resolución espacial de 10 m. Utilizando el programa QGIS Desktop 3.22.5, se reproyectaron desde su proyección original en WGS84 al sistema de coordenadas oficial del país, CRTM05. Además, se calcularon las estadísticas zonales utilizando la capa vectorial de pastos del año 2019, tal como se mencionó y detalló en párrafos anteriores.

### **3.7. COEFICIENTE CORRELACIÓN DE PEARSON**

Para esta investigación, se realizó un análisis exploratorio para determinar si existe una correlación entre los valores de las imágenes Sentinel-1A utilizadas y la calidad y el vigor de la vegetación. Para esto, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson utilizando las estadísticas zonales de dos variables: la intensidad de la retrodispersión mensual en decibelios y los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los detalles sobre cómo se realizaron estos cálculos de las estadísticas zonales se encuentran en los apartados 3.5.13 y 3.6 de este capítulo.

Es importante destacar que las imágenes obtenidas del Sensor Sentinel 2A SR a través del GEE, utilizadas para estimar el NDVI, presentaron en algunos casos porcentajes significativos de nubosidad superiores al 50%. Específicamente, durante los meses de agosto y septiembre, la nubosidad alcanzó hasta un 75%, mientras que en mayo y junio llegó al 80%.

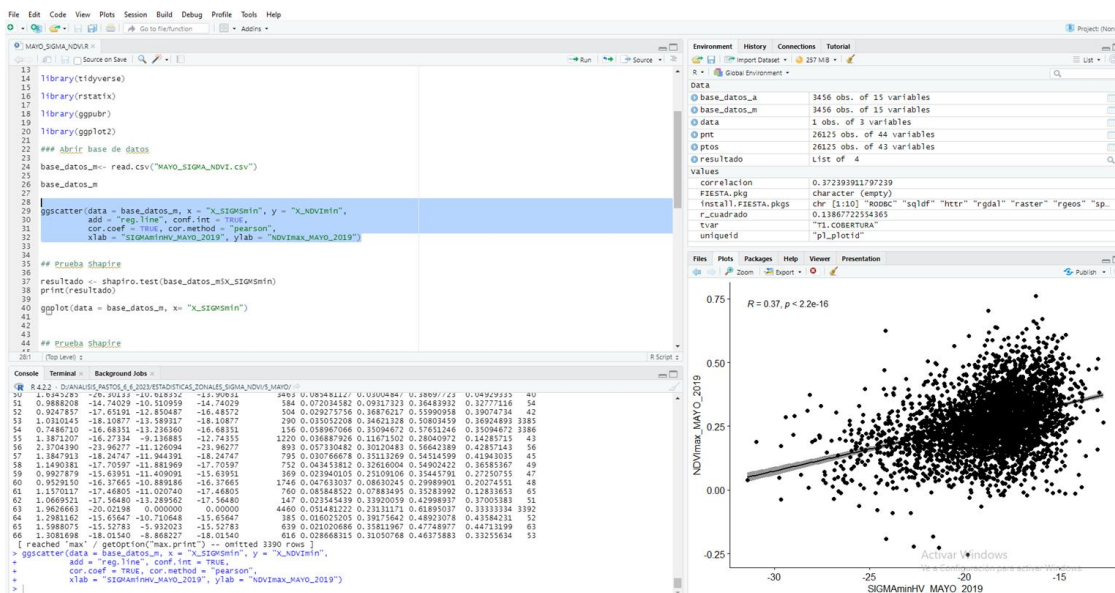
Con el objetivo de realizar un análisis de correlación confiable, se seleccionaron únicamente los meses con un porcentaje de nubosidad inferior al 30%. Estos meses incluyen enero, febrero, marzo, abril, julio, octubre, noviembre y diciembre.

Cabe destacar que estos meses corresponden al inicio de la época seca (enero, febrero y marzo) y a la transición hacia la época de lluvias (abril). Según el Instituto Meteorológico

Nacional (IMN), octubre y noviembre son históricamente los meses más lluviosos en esta región del país, con precipitaciones que oscilan entre 4,000 y 6,000 mm. Según el IMN (s.f.a), los principales núcleos de lluvia se encuentran en la península de Osa, al norte de Golfito y en Ciudad Neily, debido a la geografía de la zona (la cordillera más alta), la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical y los vientos predominantes. Por su parte, diciembre marca la transición hacia la época seca.

El proceso para obtener el coeficiente de correlación de Pearson consistió en tomar los archivos vectoriales en formato .shp que contenían las estadísticas zonales de las imágenes Sentinel 1A por mes y el NDVI mensual (de los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre), y se exportaron las tablas de atributos correspondientes a cada variable en archivos .csv (Comma-Separated Values).

Por otra parte, debido a la cantidad de estadísticas seleccionadas en cada archivo (StDev, Min, Max), fue complicado procesarlos en una hoja de cálculo convencional. Por esta razón, se utilizó el programa RStudio, donde se implementaron líneas de código y funciones para realizar de manera eficiente los cálculos mensuales, ahorrando tiempo en el proceso. Además, se generaron gráficos de dispersión por mes y se realizaron pruebas de hipótesis, como la prueba Shapiro, para obtener resultados adicionales que ayudaron a interpretar los cambios registrados en el periodo de análisis de este TFG (Figura 36). El código utilizado se encuentra disponible en el Anexo 2.



**Figura 36. Pruebas de correlación r Pearson entre NDVI e Intensidad de la Retrodispersión en dB**

Fuente: Elaboración propia (2023).

### 3.8. INTERPRETACIÓN VISUAL DE LAS COMPOSICIONES RGB

El proceso de análisis e interpretación visual se llevó a cabo utilizando los siguientes insumos: las composiciones trimestrales de las imágenes RGB del Sentinel-1A en escala de decibelios ( $\sigma_0$  dB VH) exportadas desde el programa SNAP, las capas vectoriales de las estadísticas zonales del NDVI y  $\sigma_0$  dB VH, y las áreas en formato raster correspondientes a las imágenes del Sentinel-1A por mes.

Como se ha mencionado anteriormente, para delimitar las áreas de interés, se utilizó el software QGIS y se aplicó el recorte utilizando la capa vectorial de pastos del año 2019 proporcionada por el MOCUPP como máscara. Esto permitió focalizar el análisis únicamente en la cobertura de pasto y evitar posibles confusiones con otras coberturas similares.

Durante el análisis, se examinaron los cambios en los colores de la combinación RGB (Rojo-Verde-Azul) utilizando QGIS. Además, se aprovechó la herramienta "Create "ML" del complemento "Clasificación Semiautomática", para vincular el análisis con el programa

Google Earth Pro. Esto facilitó la visualización de las zonas de interés junto con imágenes históricas disponibles, lo que permitió realizar un análisis e interpretación más completo de los posibles cambios observados entre los diferentes meses de análisis.

En los apartados 3.5.10 y 3.5.11, se explicó que la combinación en RGB facilita la interpretación de los cambios temporales en la cobertura de pastos. En esta técnica, se asignó la imagen adquirida en la primera fecha (el mes o imagen de más antigüedad) al canal rojo (R), la imagen de la fecha o mes más reciente se asignó al canal azul (B), y la fecha intermedia se asignó al canal verde (G).

La asignación de colores en la combinación RGB, junto con el uso del programa Google Earth Pro, permitió una visualización más clara y significativa de la evolución temporal de la cobertura de pastos. En las áreas donde se observaron colores rojo, verde y azul, se señalaron cambios en los valores de intensidad de la retrodispersión correspondientes a cada mes. Esta representación visual facilitó la identificación de las zonas donde ocurrieron modificaciones en la cobertura de pastos a lo largo del tiempo, lo cual condujo a una interpretación más precisa de la dinámica de los pastizales.

En este capítulo, se han detallado los pasos metodológicos para el tratamiento y la normalización de las imágenes del Sentinel 1A utilizadas en el área de estudio mediante el uso del programa SNAP. Se proporcionaron descripciones de los parámetros utilizados en cada herramienta del flujo de trabajo presentado en la Figura 20. Asimismo, se explicó el proceso de obtención de estadísticas zonales para cada imagen, con el objetivo de establecer posibles correlaciones entre las variables seleccionadas.

Además, se detalló la metodología utilizada para construir las imágenes compuestas RGB y se explicó cómo se exportaron para su uso en el programa de Sistemas de Información Geográfica (QGIS). Estas imágenes compuestas se combinaron con plataformas como Google Earth Pro y Google Earth Engine, con el fin de interpretar los cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca de Costa Rica durante el año 2019.

En resumen, al seguir estos pasos metodológicos, se logró cumplir con el primer objetivo específico planteado en el Capítulo 1 de este Trabajo Final de Graduación. En el Capítulo 4 se presentan los resultados y análisis de la investigación, con los cuales se abarcan los dos últimos objetivos específicos.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

### **4.1. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA DE PASTOS**

En este capítulo, se analizaron los cambios en las coberturas de pastos en una sección de la región Brunca de Costa Rica para el año 2019. Para ello, se retomaron los conceptos expuestos en el Marco Conceptual de este Trabajo Final de Graduación (TFG). El objetivo fue argumentar, analizar y explicar la respuesta en la interacción del sensor Sentinel 1A GRD IW de banda C en el registro de estos cambios en la cobertura de los pastos en esta área específica para el año 2019.

#### **4.1.1. Análisis estadístico exploratorio de los datos $\sigma$ dB VH Sentinel 1A**

El análisis exploratorio se realizó mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Para determinar esta correlación se utilizaron las estadísticas zonales de los ocho "stacks" de imágenes en los cuales se seleccionaron los valores bajos negativos de la intensidad de la retrodispersión de las imágenes Sentinel-1A en  $\sigma$ dB y los valores bajos del NDVI estimados por medio de la plataforma Google Earth Engine.

Se decidió utilizar los valores mínimos, debido a que la respuesta de los pastos en términos de retrodispersión tiende a ser baja, generalmente en el rango de -20 a -10 dB. Los valores altos en dB en este tipo de cobertura suelen estar asociados con superficies moderadamente rugosas, como se describe en el Cuadro 1 del Capítulo 2 pero no superan los -10 dB. El procedimiento para el cálculo de las estadísticas zonales está descrito en los apartados 3.5.13 y 3.6 de este capítulo.

Por otra parte, con el objetivo de realizar un análisis de correlación confiable, se seleccionaron únicamente los meses con un porcentaje de nubosidad inferior al 30%. Estos meses incluyen enero, febrero, marzo, abril, julio, octubre, noviembre y diciembre. El proceso para obtener el coeficiente de correlación de Pearson se detalló en el Capítulo 3.

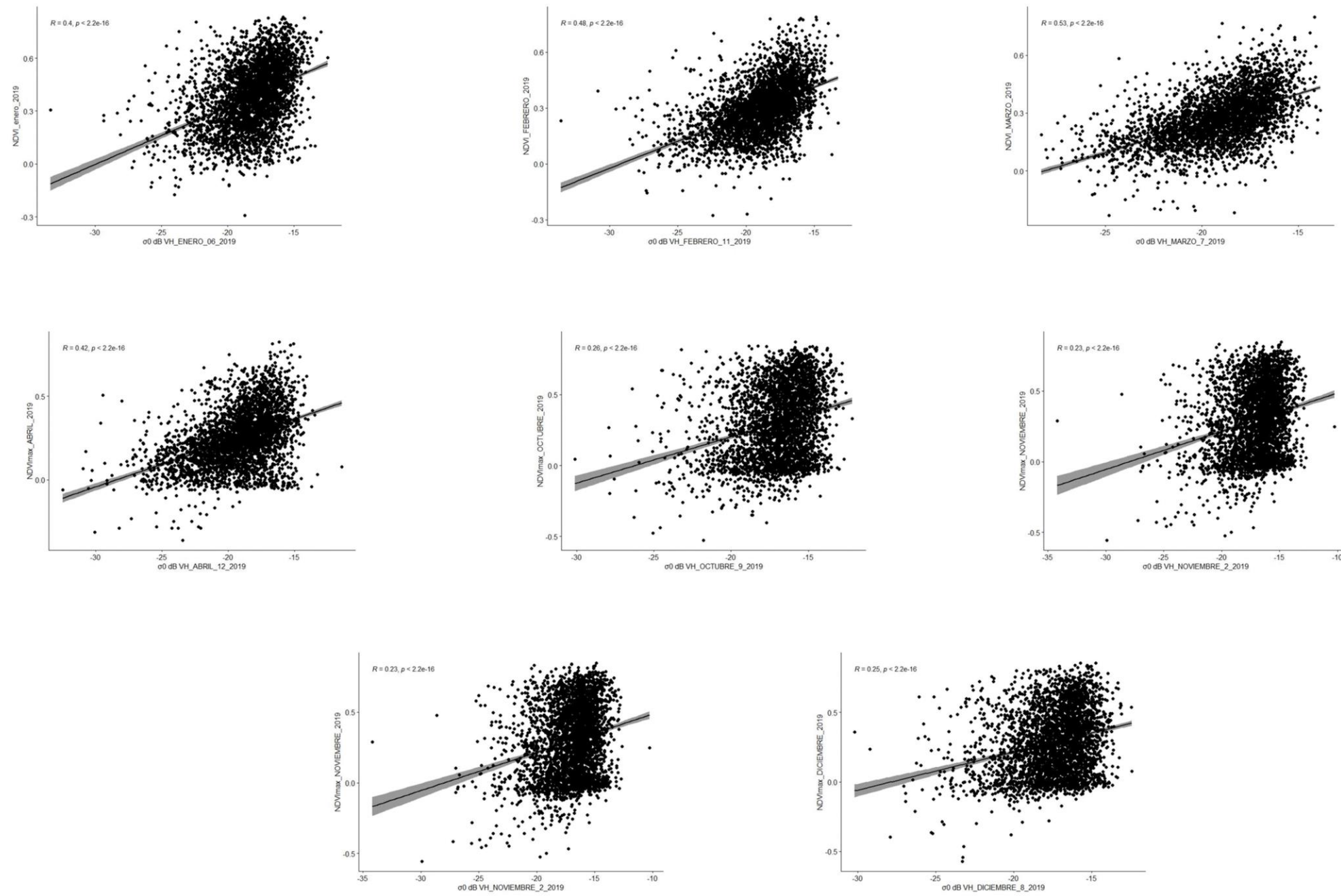


En el Capítulo 2 se abordó el uso de la prueba Shapiro-Wilks para evaluar la normalidad de los datos y determinar si una variable sigue una distribución normal. En este contexto, se ha mencionado que se realizó el análisis de ocho series de datos correspondientes a los valores mínimos de retrodispersión. Los resultados evidenciaron que los valores de la estadística, en estas series de datos variaron entre 0.96431 y 0.93871, con un valor  $p$  excepcionalmente pequeño (inferior a  $2.2e-16$ ). Estos hallazgos respaldan la conclusión de que las variables en estudio no siguen una distribución normal.

Además, se puede apreciar que en las 8 figuras (Figura 37) se muestra una relación positiva entre las variables medidas. La correlación de Pearson (coeficiente de correlación) varía entre 0,53 en enero hasta 0,25 en diciembre. Sin embargo, el valor  $p < 2,2e-16$  de la prueba hipótesis son extremadamente pequeños, lo que indica una evidencia muy fuerte en contra de la hipótesis nula. Es decir, los resultados son altamente significativos y sugieren que la correlación observada no es producto del azar.

Por otro lado, la distribución de los puntos en los ocho gráficos de dispersión demuestra una variación no constante de la dispersión de los datos. Esto se conoce como heterocedasticidad al final de todas las pendientes e indica que las estimaciones pueden estar sesgadas y puede interferir en la interpretación de los datos. Con base a lo expuesto, se puede apreciar que, aunque las correlaciones sugieren cierta evidencia de una relación positiva, las variables no permiten elaborar análisis e interpretaciones más concluyentes.

En este apartado, se intentó demostrar si los cambios en la cobertura de pastos en una sección de la región Brunca podrían explicarse mediante pruebas estadísticas, con el fin de respaldar las interpretaciones. Sin embargo, debido a la variabilidad de los datos y la interacción de las variables ambientales en el entorno, las cuales influyen en el comportamiento y la respuesta de las intensidades de las coberturas de pastos captadas por el sensor Sentinel 1A, se procederá a interpretar los cambios utilizando los conceptos expuestos en el capítulo 2.



**Figura 37. Gráficos de dispersión para los meses de enero, febrero, marzo, abril, julio, octubre y noviembre, 2019.**

Fuente: Elaboración propia (2023)

#### **4.4.2. Análisis interpretativo de las imágenes en RGB**

Para McNairn y Jiao (2018), una de las características clave de un radar es la longitud de onda o frecuencia, así como la polarización de la onda utilizada. En el caso del Sensor Sentinel-1A, este opera en la banda de frecuencia de microondas, específicamente en la banda C, con una longitud de onda aproximada de 5.6 centímetros. Además, el sensor utiliza dos polarizaciones principales: HH (horizontal-horizontal) y VH (vertical-horizontal). Estas características son de gran importancia, ya que determinan la forma en que la señal del radar interactúa con los objetos en la superficie (McNairn, & Jiao, 2018).

Los radares responden a dos características fundamentales de una superficie: la estructura y la humedad (McNairn, & Jiao, 2018). La estructura está relacionada con la aspereza de la superficie, y está condicionada, según Podest et al. (2020), por tres parámetros: a) el tamaño del objeto en relación con la longitud de onda, b) el tamaño y orientación de los objetos en la superficie, y c) la densidad de los objetos en la superficie. Estos parámetros se mencionan en el desarrollo de este capítulo con el propósito de respaldar las interpretaciones de las diferentes imágenes SAR compuestas en RGB (Cuadro 3) correspondientes a los meses seleccionados para este Trabajo Final de Graduación (TFG). En cuanto a la humedad se detalla en párrafos posteriores de este apartado.

##### **4.4.2.1. Aspereza de las superficies**

Según McNairn y Jiao (2018) y Podest et al. (2020), la aspereza en términos de radar se define como la variación estadística del componente aleatorio de la altura de la superficie relativo a una altura de referencia (en cm). Esta aspereza puede ser causada por la labranza en campos agrícolas, o efectos modificadores de degradación de las laderas y procesos de erosión hídrica (McNairn, & Jiao, 2018; Podest et al., 2020).

Por otra parte, el efecto de la aspereza de las superficies en la intensidad de respuesta de la señal y la retrodispersión se produce de la siguiente manera, McNairn y Jiao (2018) y Podest et al. (2020) explican que la retrodispersión aumenta con la aspereza de las superficies. Por

lo tanto, las superficies con mayor aspereza se presentan más brillantes en las imágenes SAR. Por otro lado, las superficies con pocas irregularidades o poca aspereza se presentan en colores oscuros o negros en las imágenes de radar. Lo anterior será de importancia para la interpretación de las imágenes en composición en RGB del área de análisis.

Además, Podest et al. (2020) explican que la escala de interacción entre la señal de radar y las diferentes coberturas es diferente a la escala de interacción de las longitudes de ondas ópticas o infrarrojas. Para estos autores, la dispersión con longitudes de onda más largas (Cuadro 1) depende de las diferentes escalas de los componentes en la superficie. Lo anterior implica que los valores en la retrodispersión dependen de las estructuras de la cobertura, el tamaño relativo de esta, la forma y orientación de las hojas o los tallos, además del contenido de agua sobre las superficies (sobre este tema se detalla en párrafos posteriores).

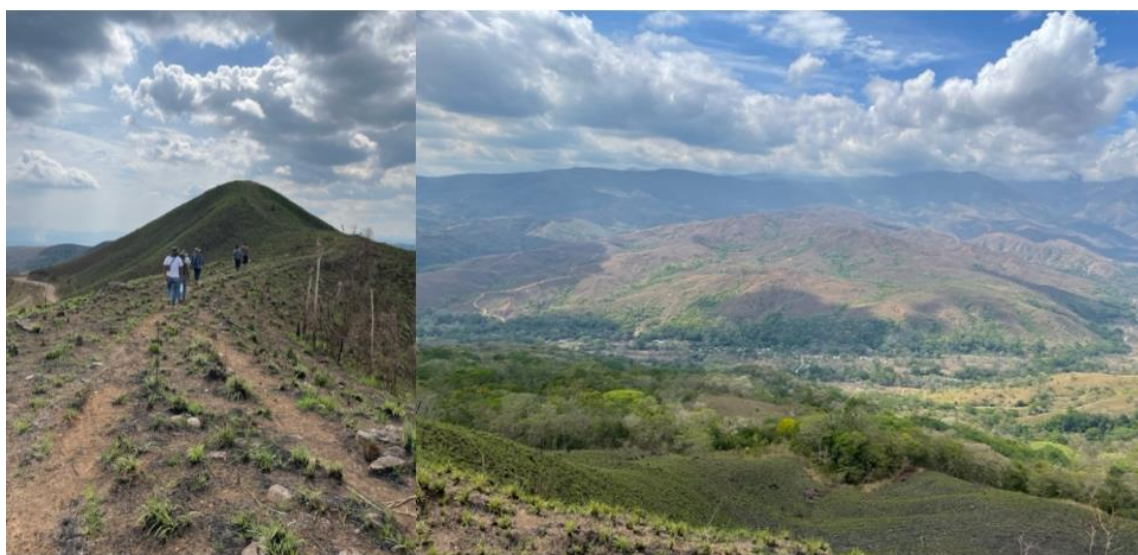
Se mencionó que los pastos en áreas de potreros se caracterizan por tener raíces poco profundas, tallos cilíndricos con nudos, hojas alternas y, en algunos casos, un crecimiento rastrero que forma un "colchón" en la superficie (Figura 38). Además, en estado natural sus alturas y estados fenológicos pueden variar, como consecuencia de condiciones ambientales locales y específicas para cada área (Figura 39).

Debido a estas características, las áreas cubiertas por pastos tienden a comportarse como superficies lisas o poco rugosas cuando interactúan con el radar. Estas coberturas se conocen como superficies de dispersión especular o espejos. En estas áreas, la mayor parte de la energía incidente del radar es reflejada en dirección opuesta al radar, lo que resulta en una apariencia oscura en las imágenes, como se podrá observar en las composiciones en RGB incluidas en este capítulo. Un ejemplo común de estas superficies oscuras son las áreas de agua sin vegetación, suelos desnudos y los pastos (Villegas, 2019).



**Figura 38. Cobertura de pastos en el cantón de Buenos Aires, región Brunca**

Fuente: Rojas, Roy (2023).



**Figura 39. Cobertura de pastos en el cantón de Buenos Aires, región Brunca**

Fuente: Elaboración propia (2023).

#### **4.4.2.2. Humedad**

La señal del SAR es sensible a la humedad. Según Blaes et al. (2006), factores como la biomasa total sobre el suelo, el contenido de agua en la vegetación y la geometría de las plantas influyen en la evolución de la señal SAR. Estos autores también postulan que la

humedad del suelo en la capa superficial tiene un impacto significativo en el comportamiento de la retrodispersión en la banda C, especialmente en las etapas iniciales del desarrollo de los cultivos y las plantas. Sin embargo, a medida que la vegetación se desarrolla, la atenuación reduce gradualmente la contribución de la humedad del suelo, y las variaciones a corto plazo se relacionan más con la variabilidad de la humedad del suelo (Blaes et al., 2006).

También es importante tener en cuenta que la señal del radar es sensible a las propiedades dieléctricas de los objetos en la superficie, las cuales a su vez responden a los cambios en el contenido de humedad (Cloude, 2002; Hinostroza Farfán, 2022). La constante dieléctrica es una medida de las propiedades eléctricas de los objetos y está relacionada con su reflectividad y conductividad. Un objeto con una menor constante dieléctrica tendrá una menor reflectancia. Además, se destaca que esta constante tiene un impacto significativo en la interacción de la radiación electromagnética con la superficie del terreno (Ruíz Fernández, 2015).

Se indicó previamente, en este Trabajo Final de Graduación (TFG) que la región del Pacífico Sur presenta una precipitación promedio cercana a los 3 700 mm anuales, con una temperatura máxima de 27.9°C y una mínima de 20.5°C (IMN, s.f.a). Esto la convierte en una de las zonas más lluviosas del país y con temperaturas importantes. Además, se observa un aumento en la magnitud de la precipitación anual hacia el sur de la región, precisamente cercano al área de análisis.

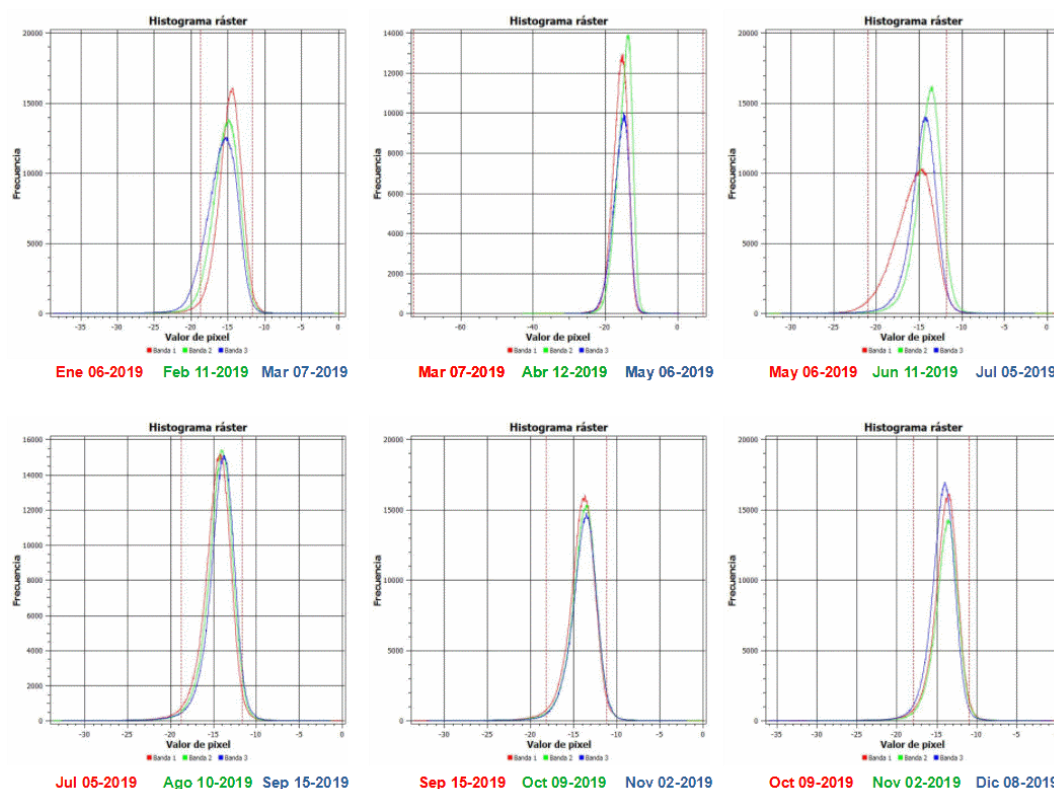
Con el objetivo de analizar el patrón de las precipitaciones en la Región Brunca de Costa Rica, se solicitó al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) datos de precipitación correspondientes al año 2019. Estos datos se recopilaron de veinte estaciones ubicadas en diferentes puntos de esta región (Figura 40). En la figura se presenta un esquema con la ubicación de las estaciones del IMN dentro de la región Brunca.



**Figura 40. Croquis de la ubicación y distribución de las estaciones meteorológicas del IMN dentro de la Región Brunca de Costa Rica**

Fuente: Elaboración propia, (2023).

En la Figura 41 se presentan seis histogramas de frecuencias que representan la distribución de los valores de retrodispersión. Estos histogramas muestran picos o conglomerados con la mayor cantidad de píxeles, variando entre 16,000 y 15,000 píxeles. Además, la dispersión de valores abarca desde -10 dB como valor máximo hasta -20 dB como valor mínimo, lo que indica una predominancia de valores bajos (Cuadro 1). Sin embargo, para un análisis más detallado, es conveniente examinar estos histogramas por separado. A continuación, se hacen una serie de descripciones e interpretaciones.



**Figura 41. Resúmenes en los histogramas de frecuencias de las composiciones en RGB de las imágenes Sentinel 1A GRD IW**

Fuente: Elaboración propia, (2023).

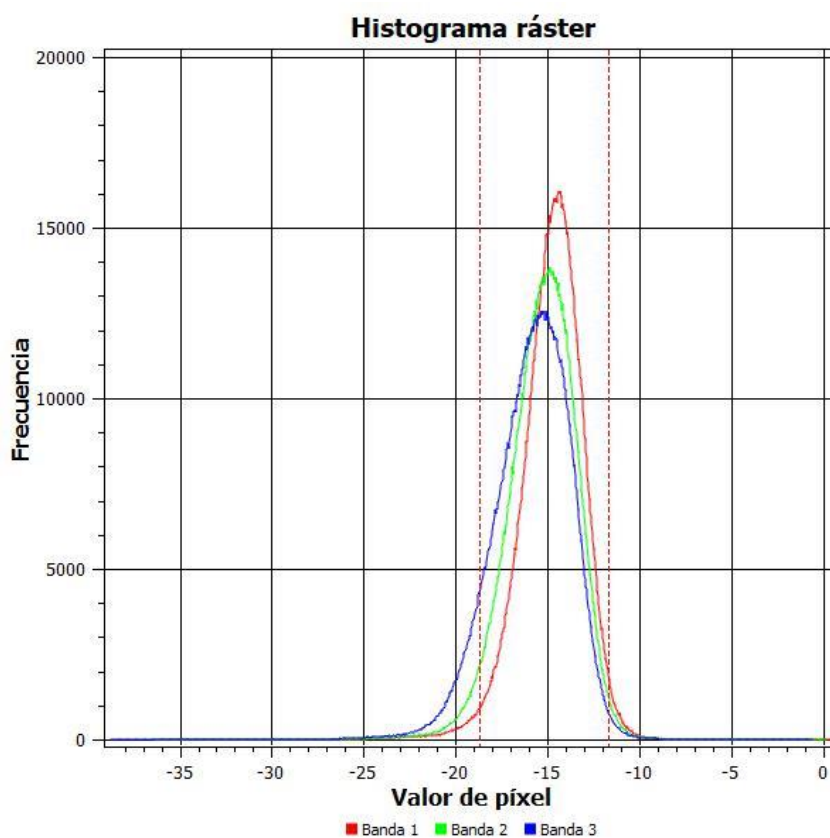
En la primera composición RGB (En-Feb-Mar), se observa que el pico de datos para el mes de enero se encuentra en -14 dB, mientras que en las otras dos bandas el pico se sitúa en -15 dB (Feb) y -16 dB (Mar) (Figura 42).

Estos datos pueden complementarse con la información sobre la distribución de las precipitaciones en las estaciones dentro del área de estudio. Al analizar los registros de precipitación durante los primeros tres meses del año 2019 (Figura 48), se observa que fueron bajos e incluso nulos en algunas estaciones. Esta situación sugiere que los suelos podrían estar secos, lo cual se refleja en una intensidad baja en la señal de retrodispersión del radar. Es importante destacar que este comportamiento es más pronunciado en superficies poco rugosas o lisas.



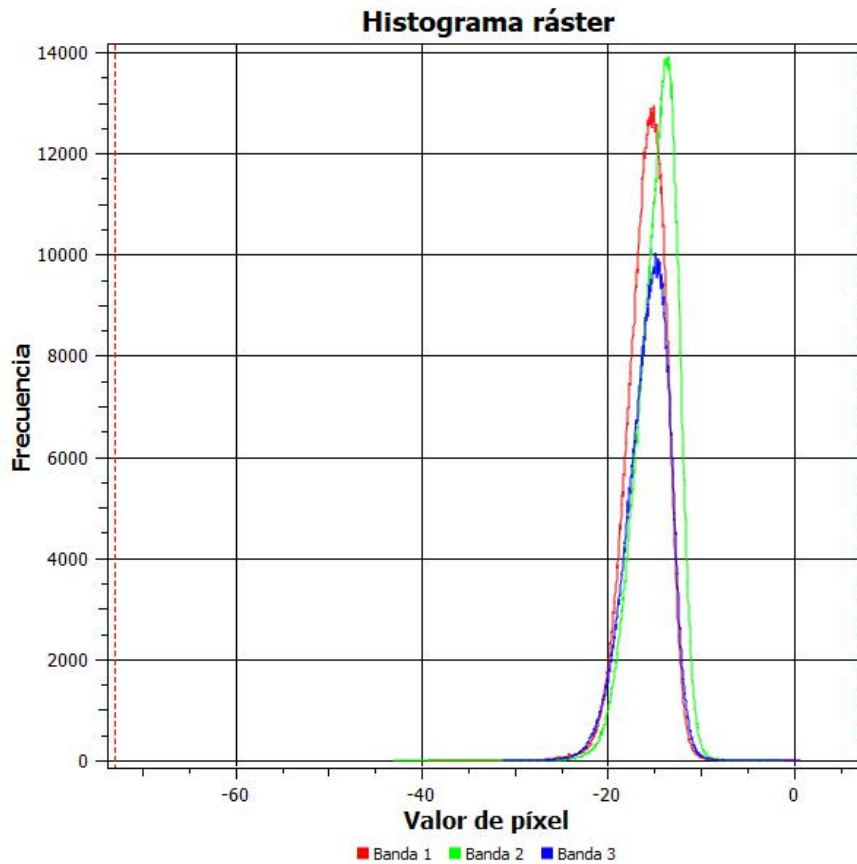
El argumento anterior se puede respaldar citando a Cruz Galván (2020), quien menciona que la retrodispersión está condicionada por la constante dieléctrica, la cual es proporcional a esta.

Esta constante dieléctrica es un indicador de la conductividad de la superficie y está influenciada por la cantidad de agua presente en la vegetación o en el suelo. Las propiedades dieléctricas, a su vez, afectan la capacidad de absorción de energía de microondas, lo que repercute en la dispersión de dicha energía. Según el autor, a medida que aumenta la humedad, disminuye la penetrabilidad de las microondas y, como resultado, se produce una mayor retrodispersión (Cruz Galván, 2020).



**Figura 42. Histograma composición RGB (Ene-Feb-Mar)**

Fuente: Elaboración propia, (2023).



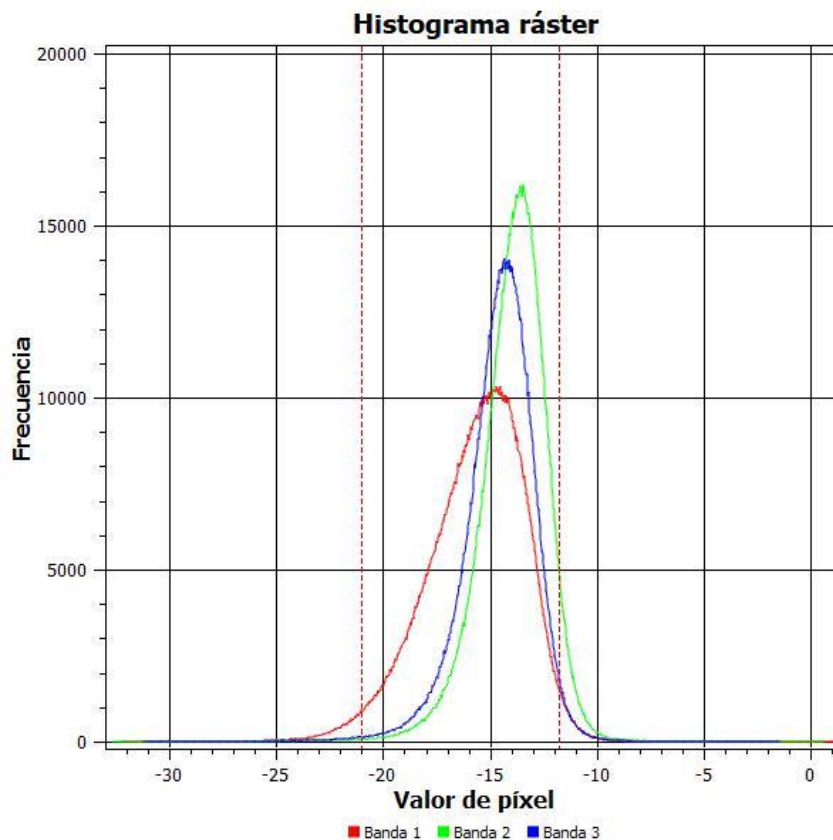
**Figura 43. Histograma composición RGB (Mar-Abr-May)**

Fuente: Elaboración propia, (2023).

En la segunda composición en RGB (Mar-Abr-May) (Figura 43), se observa una dispersión de los valores de retrodispersión que abarca desde -10 dB hasta -25 dB (Figura 43). Además, se identifican picos en las crestas de los histogramas para los meses de marzo y abril, con valores de 14,000 (-16 dB) y 13,000 (-14 dB) respectivamente. Estos meses aún se caracterizan por presentar condiciones secas, como se muestra en la Figura 48. Cruz Galván (2020) indica que la retrodispersión aumenta con la humedad del suelo. Si llueve, la retrodispersión aumentará.

Asimismo, se puede apreciar que las tres bandas presentan curvas muy estrechas, lo que indica poca variabilidad y una distribución homogénea de los datos. La mayoría de los valores en los píxeles se concentran entre -20 y -10 dB.

No obstante, se produce un cambio significativo en el comportamiento de las lluvias durante el mes de mayo, como se observa en la Figura 48. Todas las estaciones meteorológicas registran valores de precipitación que superan los 300 mm. Este aumento en la cantidad de lluvia puede estar relacionado con una disminución en el conteo de píxeles en la banda del azul, lo cual refleja una menor cantidad de superficie seca en la imagen correspondiente al mes de mayo. Este conteo de píxeles alcanza los 10,000, con una cresta de -15 dB.

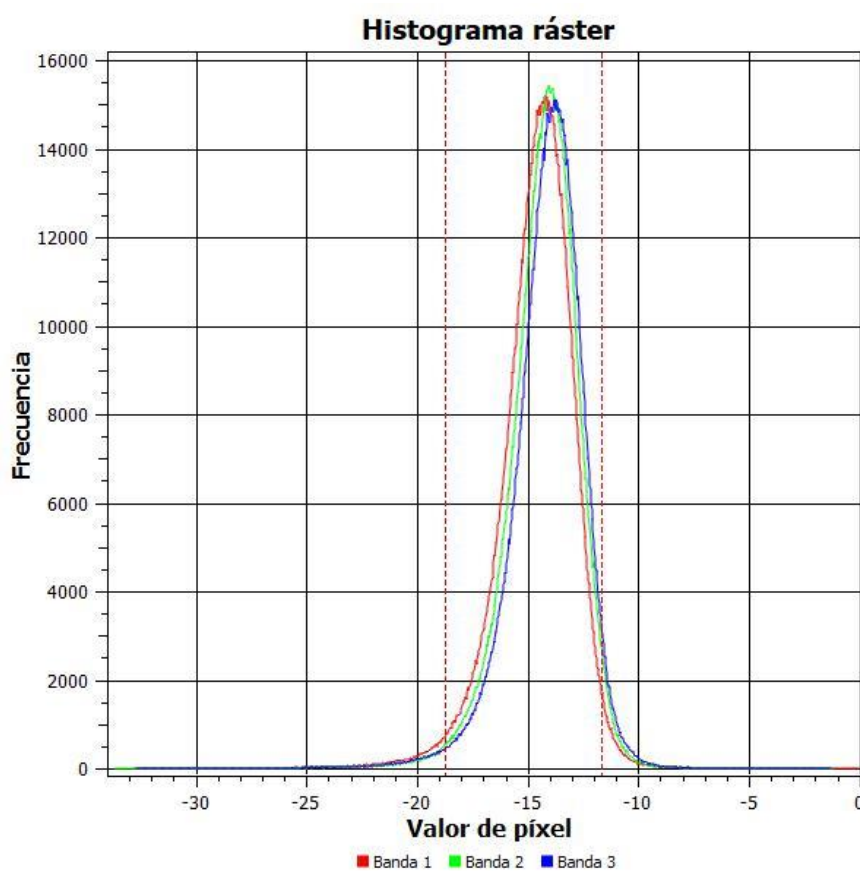


**Figura 44. Histograma composición RGB (May-Jun-Jul)**

Fuente: Elaboración propia, (2023).

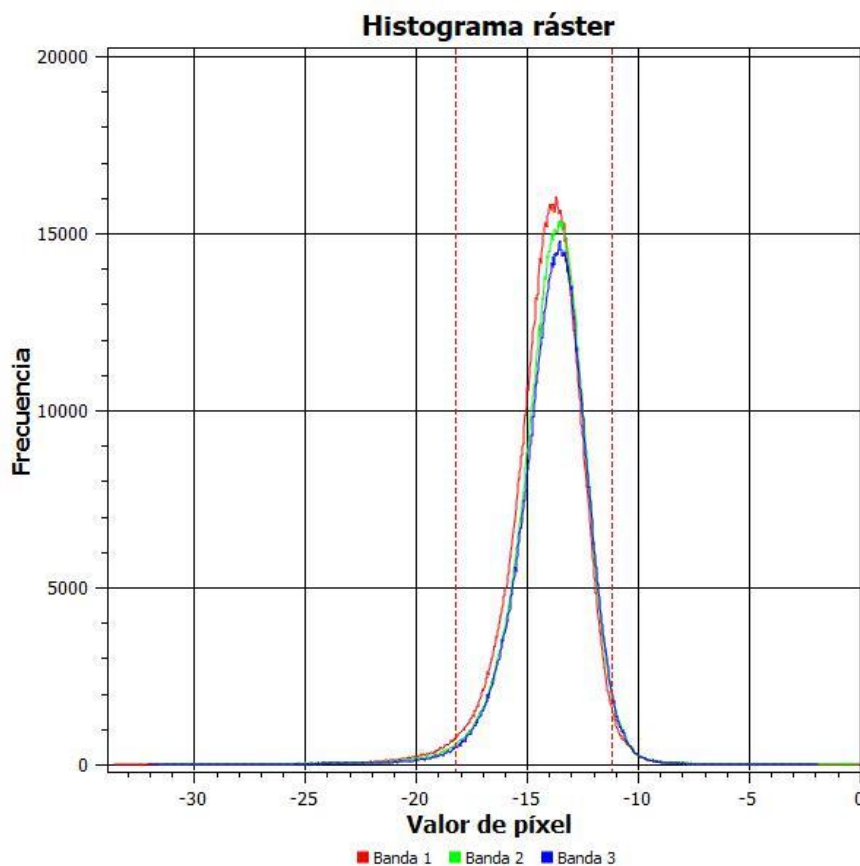
En la tercera composición (Figura 44) en RGB (May-Jun-Jul), se observa que las crestas de los histogramas correspondientes a los valores máximos de cantidad de píxeles se encuentran en los meses de junio (16,000 píxeles) con una retrodispersión de -13 dB, y en el mes de julio (14,000 píxeles) con una retrodispersión de -14 dB.

En estos meses, junio y julio, las precipitaciones (Figura 48) se vuelven significativas en toda la región de Brunca. Esto se refleja en la dispersión ligeramente mayor de los valores de retrodispersión en esas dos bandas en comparación con los meses anteriores.



**Figura 45. Histograma composición RGB (Jul-Ago-Set)**

Elaboración propia, (2023).



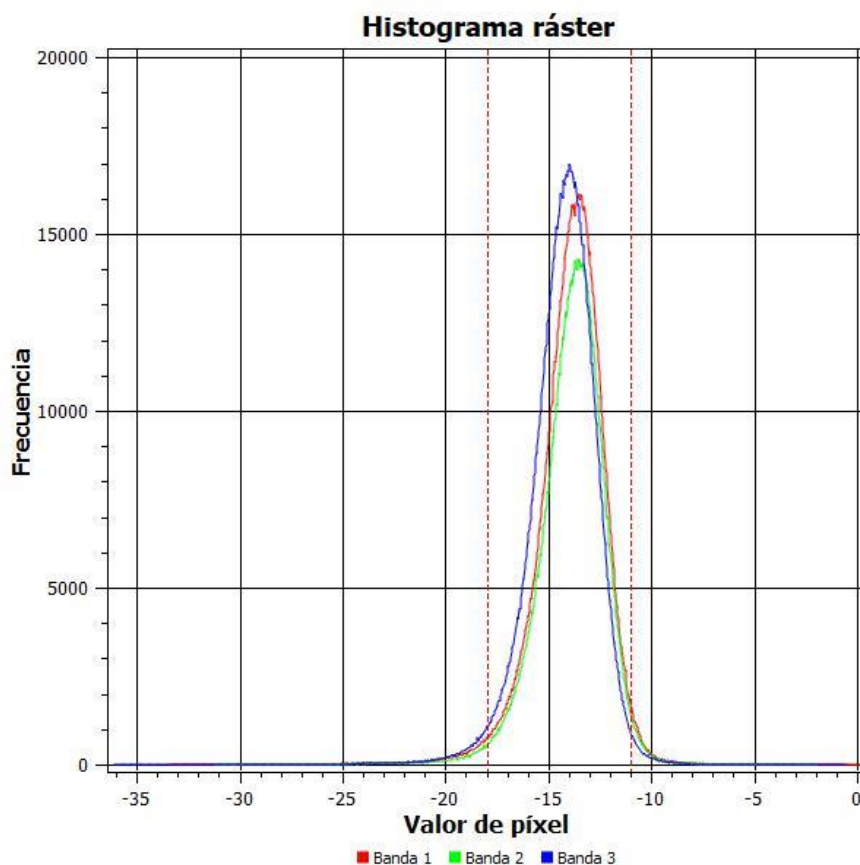
**Figura 46. Histograma composición RGB (Set-Oct-Nov)**

Fuente: Elaboración propia, (2023).

La cuarta composición, que abarca los meses de julio, agosto y septiembre de 2019 (Figura 45), al igual que las figuras 46 y 47, correspondientes a las composiciones quinta (septiembre, octubre y noviembre) y sexta (octubre, noviembre y diciembre), muestra una dispersión de valores en retrodispersión que se mantiene entre -20 dB y -10 dB. En cuanto a las crestas de las bandas que componen las composiciones RGB, se observa que son ligeramente menores en comparación con los meses secos, siendo todas ellas inferiores a los -15 dB.

El ligero aumento en el comportamiento de la retrodispersión se podría relacionar con el incremento en las precipitaciones en toda la región. Esto puede ser atribuido a lo descrito por Cruz-Galván (2020), quien menciona que una vez que se producen nuevas precipitaciones,

el valor de la retrodispersión tiende a aumentar. Se observa un comportamiento cíclico y directamente proporcional entre la cantidad de precipitación y la retrodispersión.



**Figura 47. Histograma composición RGB (Oct-Nov, Dic)**

Fuente: Elaboración propia, (2023).

En resumen, se observa una relación entre la retrodispersión y las condiciones de humedad de la superficie. Los meses secos presentan valores bajos de retrodispersión, especialmente en superficies lisas, mientras que los meses con mayores precipitaciones muestran una dispersión más amplia de los valores de retrodispersión. Esto respalda la teoría de que la retrodispersión está influenciada por la humedad en los suelos producidas por las precipitaciones (Figura 48), el contenido de humedad en el suelo y la conductividad de las superficies.

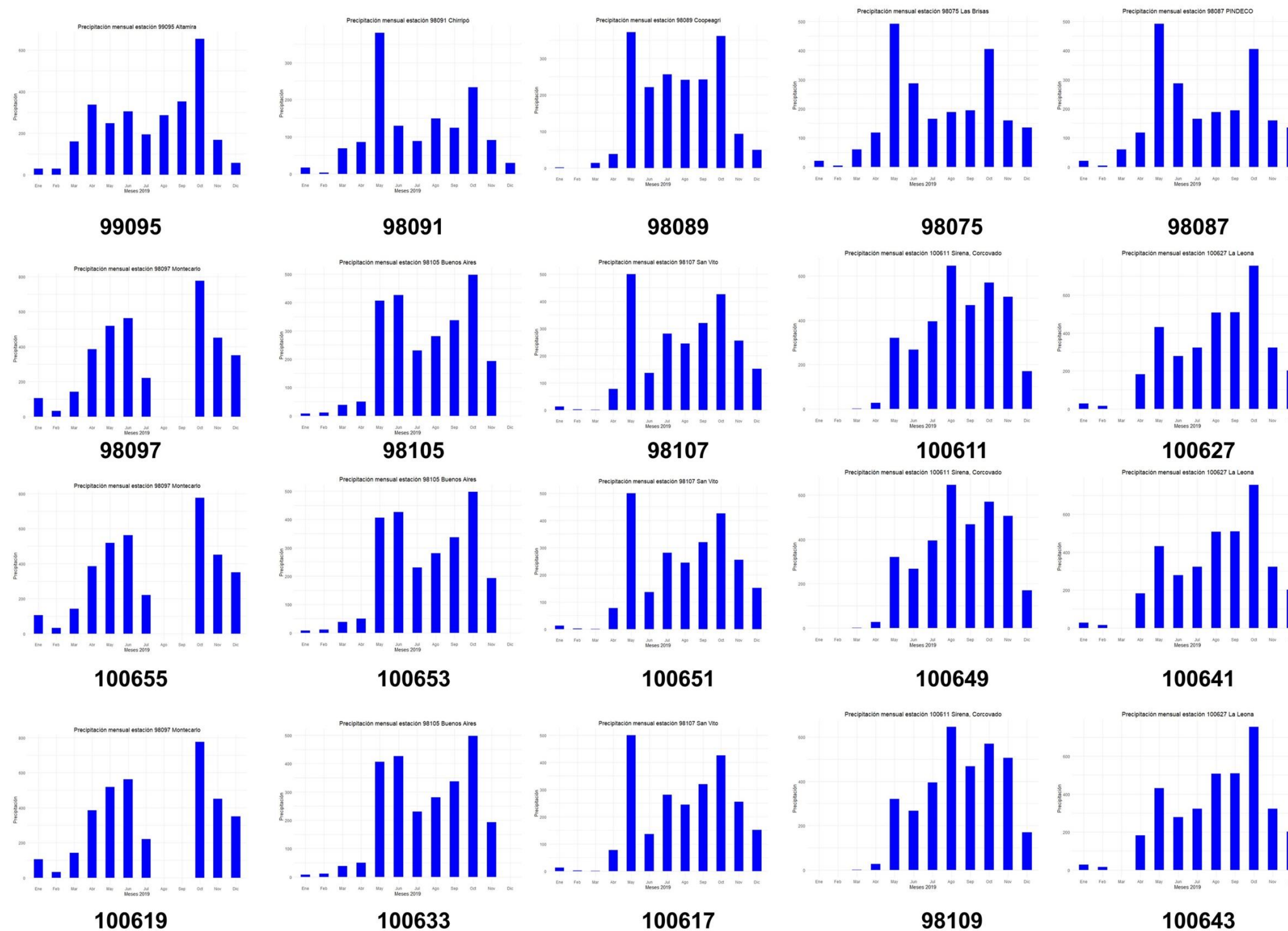


Figura 48. Gráficos del registro de las precipitaciones mensuales para la región Brunca año 2019 (El número bajo el gráfico es el código de la estación)

Fuente: IMN (2023) y elaboración propia, (2023)

#### **4.4.3. Descripción de las imágenes radar Sentinel 1A en composición RBG**

En las Figuras 49, 50, 51, 52, 53 y 54 se presentan las imágenes del radar Sentinel-1A GRD IW en una composición de falso color RGB. Cada banda de color corresponde a un mes específico, y las fechas de cada una de las imágenes se encuentran detalladas en el Cuadro 3. El orden utilizado para componer cada imagen sigue la regla de colocar la imagen más antigua en la banda del rojo, la fecha intermedia en la banda del verde y la fecha más reciente en la banda del azul.

La interpretación de los cambios en la cobertura de pastos en las imágenes se basa en los valores de intensidad o retrodispersión presentes en cada una de las coberturas. Estos valores están relacionados con características como la aspereza de la superficie, la geometría, la interacción con la onda y el contenido de humedad, que se han descrito a lo largo de este TFG. En el apartado anterior, se detallaron los valores en decibelios de las coberturas de pastos, así como la distribución de los valores y los píxeles en las imágenes.

También se mencionó que existen cuatro mecanismos de retrodispersión: de doble rebote, de volumen, difusa y especular, y cada uno de ellos presenta un comportamiento y apariencia distintos en las imágenes de radar.

En todas las composiciones RGB (Figuras de 49 a 54), los colores brillantes se asocian a las coberturas de manglares, bosque y palma aceitera (estructuras con mayores rugosidades en comparación a los pastos); mientras que los oscuros, a superficies lisas o tranquilas como aguas en calma. En la Figura 49, los colores brillantes indican áreas con una mayor intensidad de retrodispersión, lo cual se relaciona con superficies rugosas o una mayor vegetación.

Por otro lado, las áreas que aparecen en tonos oscuros de rojo, verde o azul en las imágenes no se deben a cambios en la cobertura de pastos, sino a valores bajos en la retrodispersión.

Las máscaras de pastos del MOCUPP se utilizaron para delimitar y conocer la distribución espacial y temporal de la cobertura de pastos durante el 2019. Por lo tanto, los rectángulos en rojo en las imágenes representan principalmente coberturas de pastos, con el objetivo de



evaluar visualmente la evolución y los cambios en dicha cobertura a lo largo de ese año. Debido a la escala de análisis y al tipo de cobertura, los cambios registrados estuvieron principalmente vinculados a valores bajos en la retrodispersión y no a cambios en el tipo de cobertura, como consecuencia de eventos como deslizamientos o incendios.

En la Figura 49, se observan tonos oscuros de rojo y negro, correspondientes a la banda del rojo y a la fecha de enero. En las Figuras 50 - 54, dentro de los rectángulos rojos, las intensidades bajas de retrodispersión se mantienen, pero en comparación con la composición anterior, predominan los colores verdes y azules un poco más brillantes (aunque aún representan valores bajos en la retrodispersión). Estos colores verdes y azules podrían estar relacionados con un posible contenido de humedad en la superficie, debido al periodo lluvioso, como se evidencia en las precipitaciones registradas en las estaciones ubicadas en la región Brunca, donde se superaron los 500 mm.

En este capítulo, se lograron cumplir los dos últimos objetivos específicos planteados. Se llevó a cabo un estudio para analizar los cambios en la cobertura de pastos en la Región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes Sentinel 1A GRD IW. Durante el análisis, se encontró una correlación positiva entre las variables medidas, lo cual indica una relación entre los cambios en la cobertura de pastos y las variables estudiadas. Sin embargo, debido a la variabilidad de los datos y la influencia de otras variables ambientales que no se incluyeron en el análisis, no fue posible obtener conclusiones más certeras.

También se observó que los pastos se comportan como superficies lisas o poco irregulares al interactuar con el radar, lo cual es una información relevante para entender la respuesta de las imágenes. Además, se encontró que la humedad del suelo y la vegetación tienen influencia en la respuesta de las imágenes.

Adicionalmente, los análisis estadísticos y las imágenes en RGB proporcionaron información valiosa sobre los cambios en la cobertura de pastos a lo largo del año. Estos resultados contribuyen al conocimiento científico en el área y sirven como base para investigaciones futuras en el campo de la monitorización de pastizales, utilizando datos de radar. Sin embargo,

debido a las limitaciones mencionadas, se requiere continuar investigando para obtener conclusiones más sólidas.

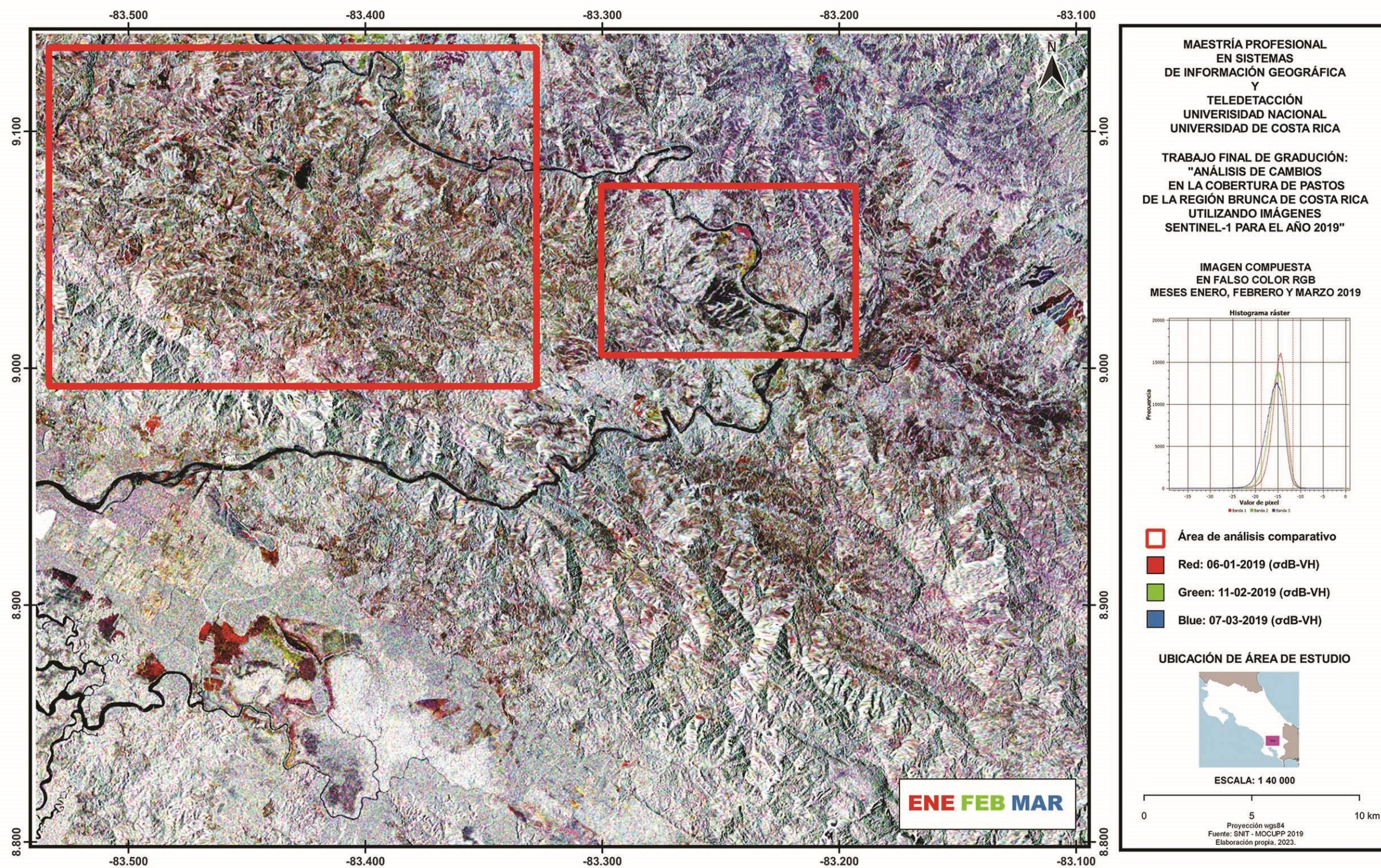


Figura 49. Composición RGB: Enero, febrero, marzo 2019.

Fuente: Elaboración propia (2023)

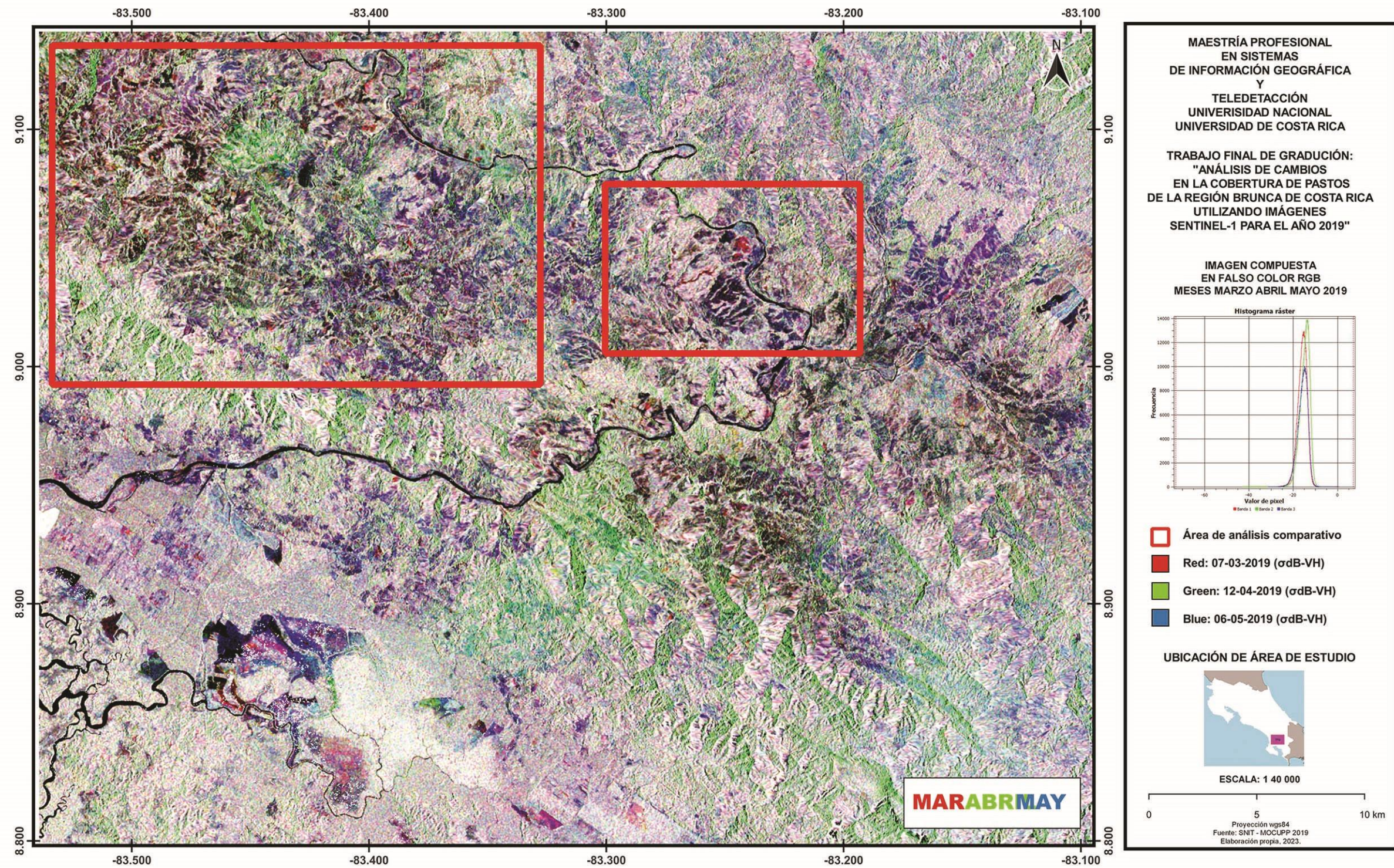


Figura 50. Composición RGB: Marzo, abril, mayo, 2019.

Fuente: Elaboración propia (2023)

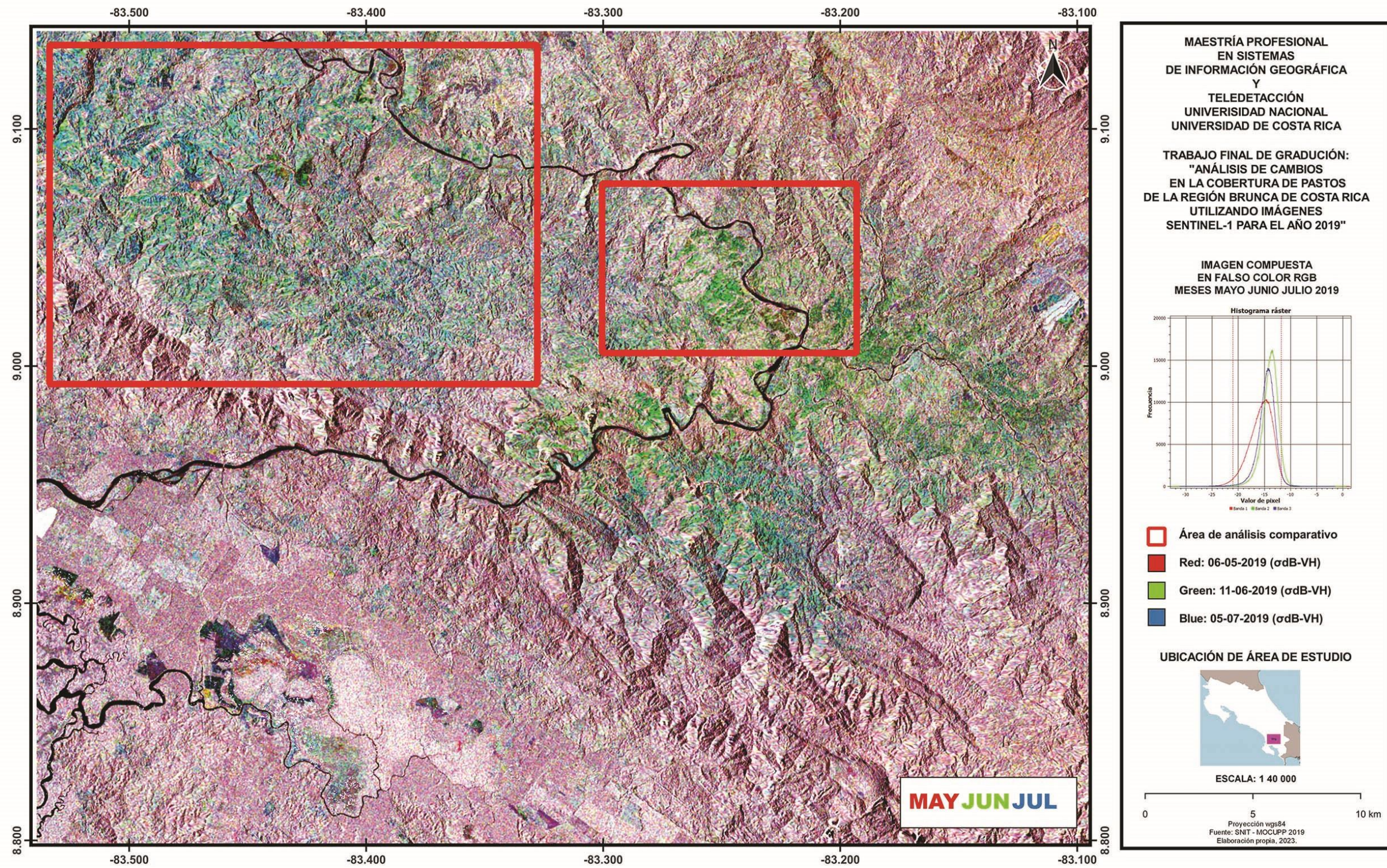


Figura 51. Composición RBG: Mayo, junio, julio, 2019.

Fuente: Elaboración propia (2023)

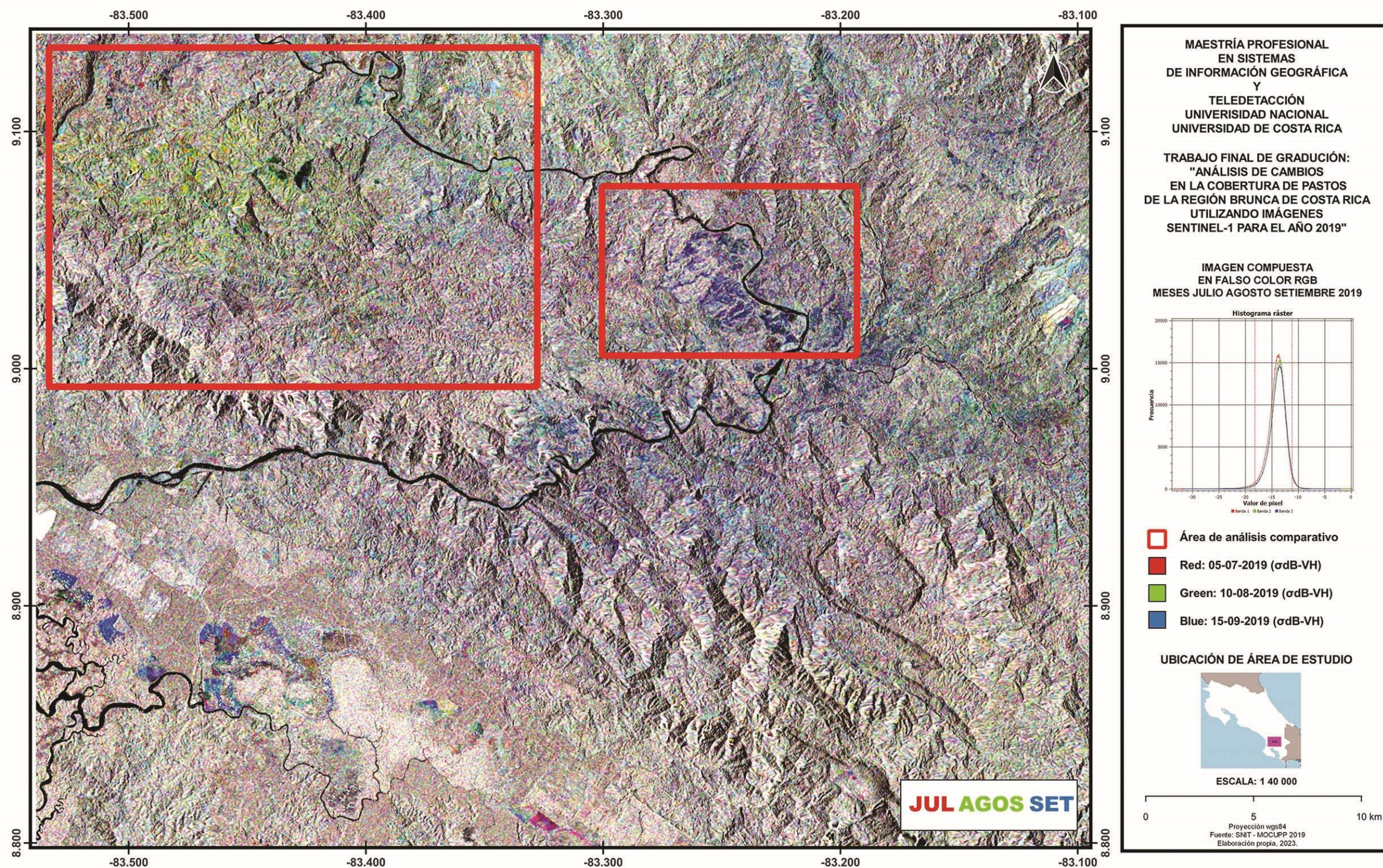


Figura 52. Composición RGB: Julio, agosto, setiembre, 2019.

Fuente: Elaboración propia (2023)

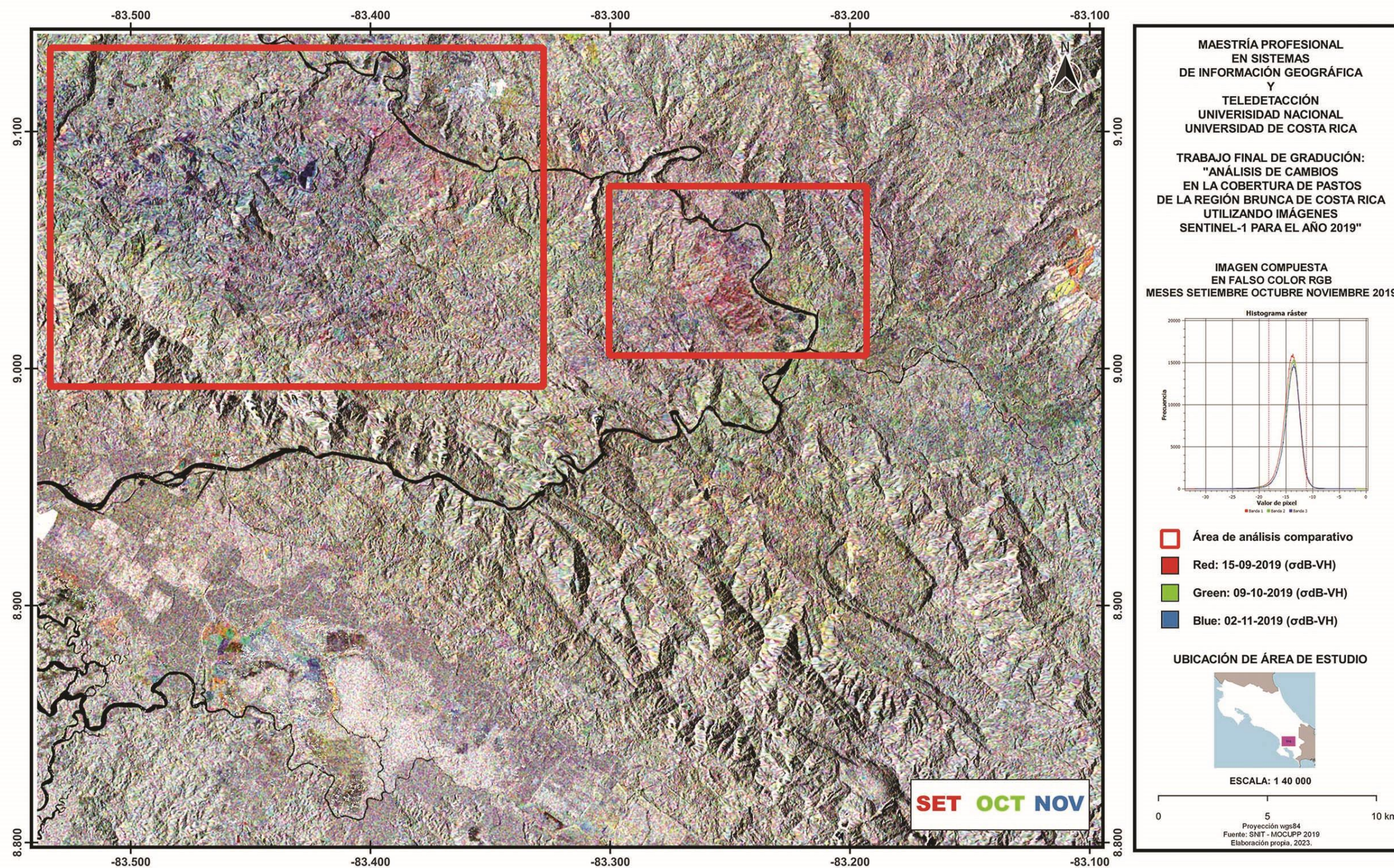


Figura 53. Composición RGB: Setiembre, octubre, noviembre, 2019.

Fuente: Elaboración propia (2023)

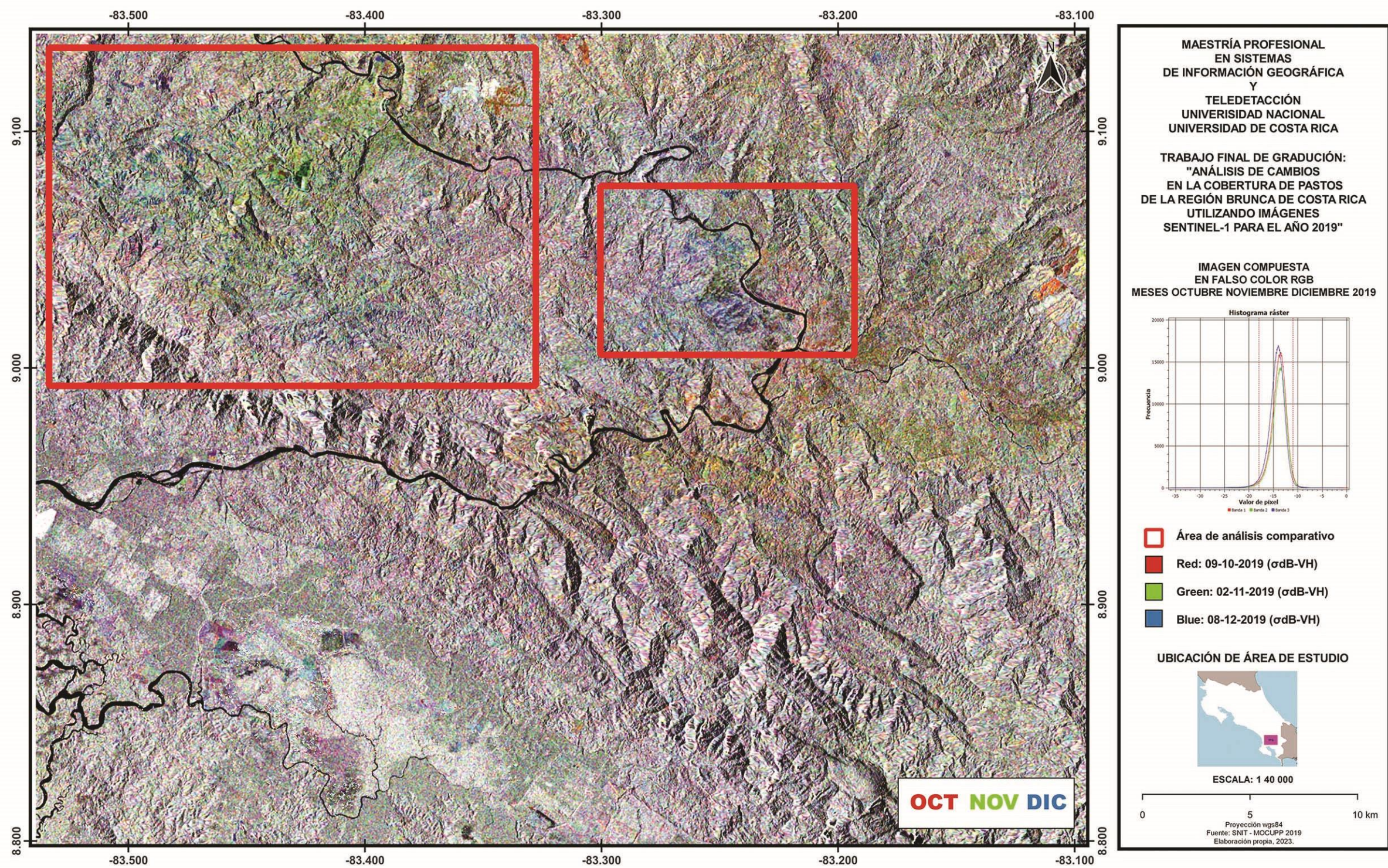


Figura 54. Composición RGB: Octubre, noviembre, diciembre, 2019.

Fuente: Elaboración propia (2023)



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este TFG se realizó un análisis interpretativo de los cambios en la cobertura de pastos vinculados a los valores de retrodispersión, en una sección de la región Brunca de Costa Rica para el año 2019 utilizando el sensor Sentinel 1A GRD IW de banda C. Se aplicaron técnicas estadísticas y se evaluaron los datos de retrodispersión de las imágenes. Para esto, se aplicó una metodología para la normalización y corrección de las imágenes en el programa SNAP.

El análisis estadístico exploratorio que utilizó el coeficiente de correlación de Pearson mostró una relación positiva entre las variables medidas, aunque las correlaciones no fueron fuertes. Sin embargo, los valores p obtenidos indicaron una evidencia muy fuerte en contra de la hipótesis nula, lo que sugiere que la correlación observada no es producto del azar.

Se observó heterocedasticidad en la distribución de los puntos, lo que indica una variación no constante de la dispersión de los datos. Esto afectó la interpretación de los resultados y sugiere que las estimaciones pueden estar sesgadas. Por lo tanto, la inclusión de otras variables como humedad en suelos es importante para mejorar la interpretación.

El análisis interpretativo de las imágenes en RGB mostró que los pastos en áreas de potreros se comportan como superficies lisas o poco rugosas cuando interactúan con el radar. Esto se debe a sus características, como raíces poco profundas, tallos cilíndricos con nudos y hojas alternas. Como resultado, las áreas cubiertas por pastos se presentan en las imágenes de radar en colores oscuros o negros.

La humedad del suelo y las propiedades dieléctricas de los objetos en la superficie influyen en la respuesta del radar. La retrodispersión de los pastos está influenciada por la humedad del suelo, especialmente en las etapas iniciales de desarrollo de los cultivos y las plantas. A medida que la vegetación se desarrolla, la contribución de la humedad del suelo disminuye y las variaciones se relacionan más con la variabilidad de la humedad del suelo.

## 5.1. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un monitoreo continuo de los pastos utilizando parcelas y técnicas de muestreo para obtener datos más precisos sobre los cambios en la cobertura de pastos en la región Brunca. Esto permitirá una evaluación más detallada de la respuesta de los pastos a los cambios ambientales y facilitará el análisis de correlaciones más fuertes, además de la interpretación de la respuesta de esta cobertura con la interacción del radar.

Se recomienda complementar los datos procedentes del sensor Sentinel 1A de polarización dual (VV-VH) con otros de polarización (HH y HV) que eventualmente permitan generar índices de vegetación radar. Para poder interpretar el comportamiento de los tipos de pastos rastreros y otras gramíneas presentes en la región Brunca, considerando sus características estructurales y su respuesta a la retrodispersión del radar. Esto podría ayudar a mejorar la interpretación de las imágenes de radar y a identificar patrones específicos de los diferentes tipos de pastos.

Además, se recomienda llevar a cabo análisis de humedad del suelo utilizando técnicas y métodos específicos, como el uso de sensores de humedad en el suelo y la instalación de parcelas en diferentes grados de pendiente. Esto permitirá obtener datos cuantitativos sobre la humedad del suelo en diferentes áreas de la región Brunca y su influencia en la respuesta del radar.

Adicionalmente, se recomienda llevar a cabo análisis fenológicos de los pastos rastreros presentes en la región Brunca. Esto implica realizar observaciones y mediciones periódicas de los diferentes estadios de desarrollo de los pastos, como crecimiento, floración y senescencia. Estos análisis permitirán comprender mejor los ciclos de vida de los pastos y su relación con la retrodispersión del radar.

Por último, se sugiere realizar una caracterización detallada de los pastos rastreros presentes en la región Brunca, considerando aspectos como su composición botánica, densidad, altura, cobertura y calidad nutricional. Esto ayudará a obtener una visión más completa de los pastos

y sus características estructurales, lo cual será de utilidad para mejorar la interpretación de las imágenes de radar y para identificar patrones específicos asociados a diferentes tipos de pastos.

En resumen, se recomienda llevar a cabo un monitoreo continuo de los pastos utilizando parcelas y técnicas de muestreo. Además, se sugiere realizar análisis de los tipos de suelos y sus características físicas y químicas, así como evaluar los contenidos de humedad e infiltración en el suelo. También se aconseja realizar análisis fenológicos y caracterizar los pastos rastreros en la región Brunca. La implementación de estas recomendaciones permitirá obtener datos más precisos y detallados, mejorando la interpretación de las imágenes de radar y facilitando la comprensión de los procesos relacionados con la cobertura de pastos en la región.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abaurrea Pereda, M. (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra* [Tesis de grado, Universidad Pública de Navarra]. <https://academica-e.unavarr.es/handle/2454/7790>
- Acevo Herrera, R. (2011). *Sistemas de teledetección activos y pasivos embarcados en sistemas aéreos no tripulados para la monitorización de la tierra* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94385>
- Aguilar-Arias, H., Calvo Elizondo, Y., Blanco Arias, B., Vargas Céspedes, A., Romero Badilla, D., Jiménez Rodríguez, M., Fernández Garro, J., Hernández Hernández, S., Manrow Villalobos, M., & Miller Granados, C. (2021). *Informe final del paisaje productivo de pastos para el año 2018 dentro del MOCUPP*. Costa Rica: CENAT - PRIAS. <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/8256>
- Alaska Satellite Facility. (2019). *Cómo crear un subconjunto de un producto Sentinel-1*. <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/how-to-create-a-subset-of-a-sentinel-1-product/>
- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B., & Green, S. (2016). Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology*, 9(6), 649-671. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw005>
- Alpala Aguilar, J. A., & Erazo Montenegro, Y. Y. (2021). *Interferometría con software libre e imágenes Sentinel 1A/1B, aplicada al monitoreo de la deformación volcánica en Colombia, caso de estudio volcanes Chiles - Cerro Negro*. [Tesis de maestría, Universidad de Cauca]. <https://www.researchgate.net/publication/354131944> [Interferometria con software libre e imagenes Sentinel 1A1B aplicada al monitoreo de la deformacion volcanica en Colombia caso de estudio volcanes Chiles - Cerro Negro](https://www.researchgate.net/publication/354131944/interferometria-con-software-libre-e-imagenes-sentinel-1a1b-aplicada-al-monitoreo-de-la-deformacion-volcanica-en-colombia-caso-de-estudio-volcanes-chiles-cerro-negro)

- ArcGIS Pro. (s.f.). *Interpretación de los datos SAR para la representación cartográfica de inundaciones*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/interpret-sar-data-for-flood-mapping.htm>
- Balzter, H. (2001). Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (InSAR). *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 25(2), 159–177. <https://doi.org/10.1177/030913330102500201>
- Balzter, H., Cole, B., Thiel, C., & Schullius, C. (2015). Mapping CORINE land cover from Sentinel-1A SAR and SRTM digital elevation model data using random forests. *Remote Sensing*, 7(11), 14876-14898. <https://doi.org/10.3390/rs71114876>
- Barrett, B., Nitze, I., Green, S., & Cawkwell, F. (2014). Assessment of multi-temporal, multi-sensor radar and ancillary spatial data for grasslands monitoring in Ireland using machine learning approaches. *Remote sensing of environment*, 152, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.018>
- Belmonte, I. A., & Caamaño, B. S. (2009). *Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/19>
- Bioresita, F. (2019). *Use of multi-source image time series for surface water mapping* [Tesis Doctoral, University of Strasbourg]. <https://www.theses.fr/2019STRAH004.pdf>
- Blaes, X., Defourny, P., Wegmuller, U., Della Vecchia, A., Guerriero, L., & Ferrazzoli, P. (2006). C-band polarimetric indexes for maize monitoring based on a validated radiative transfer model. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 44(4), 791-800. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2005.860969>
- Bonilla, O. (s.f.). *Práctica: Pastoreo*. [http://www.platicar.go.cr/images/buscador/fichas-tecnicas/GANADERIA/06\\_Pastoreo.pdf](http://www.platicar.go.cr/images/buscador/fichas-tecnicas/GANADERIA/06_Pastoreo.pdf)

- Boschetti, M., Bocchi, S., & Brivio, P. A. (2007). Assessment of pasture production in the Italian Alps using spectrometric and remote sensing information. *Agriculture, ecosystems & environment*, 118(1-4), 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.024>
- Brayan, F. (2020). *SAOCOM-1B, primer lanzamiento polar en 60 años desde cabo cañaveral*. <https://ecoferio.com/saocom-1b-primer-lanzamiento-polar-en-60-anos-desde-cabo-canaveral/>
- Brenes Pérez, C. F., Gómez-Hoyos, D., Wiese, K., Betbeder, J., Cifuentes Jara, M., Somarriba, E., ... & García, E. (2022). *Metodología para la clasificación automática de los árboles en fincas (TonF) y su aplicación en el análisis de la biodiversidad en un paisaje productivo de Olancho, Honduras* (Serie Técnica. Informe Técnico 346). CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11741>
- Buemi, M. E. (2012). *Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack* [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires]. [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n5129\\_Buemi.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5129_Buemi.pdf)
- Caíta, R., & Castañeda, W. (2021). *Determinación de la mejor clasificación de coberturas obtenidas con imágenes satelitales de radar, ópticas y su sinergia en el periodo 2015–2020 e implementación de un modelo de predicción de la pérdida de bosque al año 2030 en seis municipios de la Amazonia colombiana*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28015>
- Camacho Martínez, C. (s.f.). *Coefficiente de correlación lineal de Pearson*. Universidad de Sevilla. <https://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>
- Canada Centre for Remote Sensing (CCRS). (2005). *Fundamentals of Remote Sensing*. [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2022-11/Fundamentals\\_of\\_RS\\_Edited\\_SC.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2022-11/Fundamentals_of_RS_Edited_SC.pdf)

Centro de Investigaciones Agronómicas. (s.f.). *Mapa de suelos de Costa Rica*.

<http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>

Centro Nacional de Información Geoambiental. (2020). Descripción del Sistema de Clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra propuesto para el SIMOCUTE. *Ambientico*, 273, 23.

[link.gale.com/apps/doc/A676666549/IFME?u=facat\\_rs&sid=bookmark-IFME&xid=6dab7cdb](http://link.gale.com/apps/doc/A676666549/IFME?u=facat_rs&sid=bookmark-IFME&xid=6dab7cdb).

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp.

Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10, 1-9. <http://www.aet.org.es/?q=revista10-4>

Clerici, N., Valbuena, C. A., & Posada, J. M. (2017). Fusión de datos Sentinel -1A y Sentinel -2A para el mapeo de la cobertura terrestre: un estudio de caso en la región del bajo Magdalena, Colombia. *Diario de mapas*, 2(13). <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/17445647.2017.1372316scroll=top&needAccess=true>

Cloude, S. R. (2002). *Unsupervised image classification using the entropy/alpha/anisotropy method in radar polarimetry* (NASA-JPL, AIRSAR-02 Workshop, Vol. 44).

<https://hal.science/hal-00936640>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México. (2022). *Pastizales*. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales>

Congedo, L. (2016). Semi-automatic classification plugin documentation. *Release*, 4(0.1), 29.

[https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/es/latest/remote\\_sensing.html#basic-definitions](https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/es/latest/remote_sensing.html#basic-definitions)

Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica. [https://www.researchgate.net/profile/Fulgencio-Canovas-Garcia/publication304825355\\_Modificacion\\_del\\_algoritmo\\_Ran-](https://www.researchgate.net/profile/Fulgencio-Canovas-Garcia/publication304825355_Modificacion_del_algoritmo_Ran-)

[dom Forest para su empleo en clasificacion de imagenes de teledeteccion/links/577be67a08aec3b743366b69/Modificacion-del-algoritmo-Random-Forest-para-su-empleo-en-clasificacion-de-imagenes-de-teledeteccion.pdf](https://www.researchgate.net/publication/328111111/links/577be67a08aec3b743366b69/Modificacion-del-algoritmo-Random-Forest-para-su-empleo-en-clasificacion-de-imagenes-de-teledeteccion.pdf)

Consultoría Estratégica de Investigación de Mercados. (s.f.). *¿Qué es el coeficiente de correlación de Pearson?*. <https://www.cimec.es/coeficiente-correlacion-pearson/>

Corgne, S. (2019). *Taller de teledetección : Aplicación al estudio de los manglares. Plan de acción regional para la conservación de los manglares en el pacífico sudeste*. [https://par-manglares.net/images/docs/actividades/2019/taller%20teledetecci%C3%B3n/Presentacion\\_taller\\_teledeteccion/Sentinel1\\_Manglares.pdf](https://par-manglares.net/images/docs/actividades/2019/taller%20teledetecci%C3%B3n/Presentacion_taller_teledeteccion/Sentinel1_Manglares.pdf)

Crabbe, R. A., Lamb, D., & Edwards, C. (2020). Discrimination of species composition types of a grazed pasture landscape using Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101978. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101978>

Cruz Galván, D. (2020). *Estudio del contenido de humedad del suelo en zonas de alta montaña mediante técnicas de teledetección* [Tesis de maestría, Universidad de Alcalá]. <http://hdl.handle.net/10017/44076>

Di Gregorio, A. (2016) *Land Cover Classification System. Classification concepts Versió 3. F*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>

Di Gregorio, A., & Jansen, L. (1998). *Land Cover Clasification System (LCCS): Classification concepts and User Manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [https://www.researchgate.net/publication/229839605\\_Land\\_Cover\\_Classification\\_System\\_LCCS\\_Classification\\_Concepts\\_and\\_User\\_Manual](https://www.researchgate.net/publication/229839605_Land_Cover_Classification_System_LCCS_Classification_Concepts_and_User_Manual)



- Díaz Santana, A. (2016). *Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras* [Tesis de grado, Universidad de las Palmas de Gran Canaria]. <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/92185/1/Aridane%20D%C3%ADaz%20Santana.pdf>
- Dusseux, P., Corpetti, T., & Hubert-Moy, L. (2013). Temporal kernels for the identification of grassland management using time series of high spatial resolution satellite images. *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, 3258–3260. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723522>
- Elachi, C., & Van Zyl, J. (2021). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119523048>
- Eoportal. (2022). *SNAP (Sentinel Application Platform)*. <https://www.eoportal.org/other-space-activities/snap-sentinel-application-platform#snap-sentinel-application-platform-toolbox>
- EOS Data Analytics. (s.f.). *NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada*. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>
- Escobar Valdivia, M. (2019). *Identificación de regiones contaminadas en la superficie del Lago Villarrica con base en imágenes Sentinel, en el período 2017-2018* [Tesis de grado, Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/3307>
- European Space Agency. (2014). *Radar de apertura sintética (SAR)*. [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_ES/SEMVKXF64RH\\_2.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMVKXF64RH_2.html)
- European Space Agency. (s.f.). *¿Qué es la teledetección?*. [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMO1U3FEXF\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_0.html)
- European Space Agency. (s.f.a). *Sentinel-1*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

- European Space Agency. (s.f.b.). *Sentinel-1. Tipos de productos y niveles de procesamiento*.  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels>
- Fernández Ordoñez, Y. M., & Soria Ruíz, J. (2015). Imágenes de radar de apertura sintética y conceptos básicos de polarimetría. En Y. M. Fernández-Ordoñez, M. J., Escalona Maurice, & J. Valdez Lazalde (Eds.), *Avances y Perspectivas de Geomática con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas y Urbanas* (pp. 37-66). [https://www.researchgate.net/publication/301247047\\_Imagenes\\_SAR\\_y\\_Conceptos\\_Basicos\\_de\\_Polarimetria](https://www.researchgate.net/publication/301247047_Imagenes_SAR_y_Conceptos_Basicos_de_Polarimetria)
- Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallo, K. L. (2021). Pruebas no paramétricas para determinar la aleatoriedad de los datos en procesos productivos y procedimientos para calcular estadísticas en pareja. *Ciencia, Economía y Negocios*, 5(1),97-118.  
<https://doi.org/10.22206/ceyn.2021.v5i1.pp97-118>
- Fonseca, W., Chaves, H., Alice Guier, F., & Rey Benayas, J. M. (2010). Cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, 59-60, 99-107. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5853>
- Fontal, B., Suárez, T., & Reyes, M. (2005). *El espectro electromagnético y sus aplicaciones*. Escuela de la Ingeniería. [https://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/07/espectro\\_electromagnetico.pdf](https://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/07/espectro_electromagnetico.pdf)
- Foumelis, M. (2015). *ESA Sentinel-1 Toolbox Generation of SAR Backscattering Mosaics* [Presentación Power Point]. [https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/02/D2P1a\\_LTC2015\\_Foumelis.pdf](https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/02/D2P1a_LTC2015_Foumelis.pdf)
- Gagnon, L., & Jouan, A. (1997, octubre). Speckle filtering of SAR images: a comparative study between complex-wavelet-based and standard filters. *Wavelet Applications in Signal and Image Processing V* (3169), 80-91. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.279681>

- Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M. J., & Baghdadi, N. (2017). Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for soil moisture mapping at 100 m resolution. *Sensors*, 17(9), 1966. <https://doi.org/10.3390/s17091966>
- García Girón, J. D. (2020). *Distribución espacial de la humedad del suelo y su relación con la cobertura vegetal en América Central, discrepancias dentro y fuera del corredor seco Centroamericano*. [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/10669/81332>
- Gonzaga Aguilar, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34487>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación* (4<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.
- Herrera, G., Tomás, R., López-Sánchez, J. M., Monserrat, O., Cooksley, G., & Mulas de la Peña, J. (2009). Sistemas radar aplicados a la investigación de subsidencia y movimientos de ladera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 316-324. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/51568>
- Hervés Blanco, M. (2019). *Detección de aprovechamientos forestales mediante imágenes multi-temporales del satélite Sentinel-1* [Tesis de maestría, Universidad Pública de Navarra]. <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/35104>
- Hinostroza Farfán, H. (2022). *Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5116>

- Holzman, M. E. (2012). *Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con rendimientos en la región Pampeana mediante imágenes de temperatura de superficie e índice de vegetación* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2421>
- Huacani Calsin, W. (2019). *Aplicación de la teledetección en la desglaciación del nevado del Ampay relacionado al cambio climático entre 1980-2015* [Tesis de maestría, Universidad Alas Peruanas]. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/9725>
- IGN Spain. (2021). *Curso de procesamiento de imágenes Sentinel con SNAP – Imágenes radar (Sentinel-1)* [video]. Instituto Geográfico Nacional de España. <https://www.youtube.com/watch?v=QK8J8huXzio&t=1119s>
- Instituto Geográfico Nacional de España. (2018). *Fundamentos de teledetección radar*. [https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa\\_Marco\\_Co-pernicus\\_User\\_Uptake\\_5\\_Fundamentos\\_de\\_teledeteccion\\_radar.pdf](https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Co-pernicus_User_Uptake_5_Fundamentos_de_teledeteccion_radar.pdf)
- Instituto Meteorológico Nacional. (2008). *Clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Ministerio de Ambiente Energía y Telecomunicaciones (MINAET). Instituto Meteorológico Nacional, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Comité Regional de Recursos Hídricos. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/el-clima-su-variabilidad-y-cambio-climatico-en-costa-rica/>
- Instituto Meteorológico Nacional. (s.f.). *El ENOS y sus efectos en Costa Rica*. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/8EL+ENOS+Y+SUS+EFEC-TOS+EN+COSTA+RICA.pdf/78ea227d-49db-4983-8b2d-e116fc7e6de1>
- Instituto Meteorológico Nacional. (s.f.a.). *3.4. Pacífico Sur*. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/PacificoSur.pdf/e9ff2013-e30e-46a3-ad39-934200753fff>

- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario 2014*. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2016). *Suelos de Costa Rica Orden Ultisol* (Boletín Técnico 1). <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>
- Jara Santillán, C. A. (2022). *Estudio integral de humedales altoandinos (andean peatlands) con teledetección y SIG* [Tesis doctoral, Universitat de València]. <https://rode-ric.uv.es/handle/10550/82721>
- Jiménez Abarca, A. V., & Guerrero Madrigal, M. J. (2023). *Evaluación de dos clasificadores para la identificación de áreas inundables con diferentes metodologías de procesamiento mediante imágenes de Radar de Apertura Sintética en la planicie inundable de la margen derecha del Río Tempisque, Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/03/TFG-AngieJimenezMariaJoseGuerrero.pdf>
- Jiménez, W. S. (Comp.) (2021). *Pastos y forrajes: tipos, producción, manejo y cultivo*. <https://agrotendencia.tv/agropedia/pastos-y-forrajes/pasto-y-forraje-produccion-manejo-tipos-y-uso/>
- Komisarenko, V., Voormansik, K., Elshawi, R., & Sakr, S. (2022). Exploiting time series of Sentinel-1 and Sentinel-2 to detect grassland mowing events using deep learning with reject region. *Scientific Reports*, 12(1), 983. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-04932-6>
- Kupidura, P. (2016). Comparison of filters dedicated to speckle suppression in sar images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLI-B7, 269-276. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b7-269-2016>

- Liss, B., Howland, M. D., & Levy, T. E. (2017). Testing Google Earth Engine for the automatic identification and vectorization of archaeological features: A case study from Faynan, Jordan. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 15, 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.013>
- Lobert, F., Holtgrave, A. K., Schwieder, M., Pause, M., Vogt, J., Gocht, A., & Erasmi, S. (2021). Mowing event detection in permanent grasslands: Systematic evaluation of input features from Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat 8 time series. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112751. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112751>
- Los pastos o gramíneas. (s.f.). *Pastos y forrajes*. <https://infopastosyforrajes.com/los-pastos-o-gramineas/>
- Luque Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Manual formativo de ACTA. Autores Científicos Técnicos y Académicos*, 62, 17-31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5738106>
- Marchionni, D. S., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural: Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. *Geoacta*, 39(1), 62-89. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-77442014000100007&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-77442014000100007&script=sci_abstract&tlng=pt)
- Marte, T. (2020). *El espectro electromagnético*. <https://www.tomasmarte.com/2020/07/03/el-espectro-electromagnetico/>
- Mata Muñoz, M. D. (2019). *Monitorización de inundaciones mediante RADAR SAR (Sentinel-1)*. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/41791>
- McNairn, H., & Jiao, X. (2018). *SAR para el mapeo de suelos y cultivos*. [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/SAR\\_S3-spanish.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/SAR_S3-spanish.pdf)

- McNairn, H., Champagne, C., Shang, J., Holmstrom, D., & Reichert, G. (2009). Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(5), 434-449.
- Medina Valderrama, J. A. (2018). *Evaluación de la capacidad de las imágenes de radar de apertura sintética para la detección del cultivo del café en Pitalito Huila* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]. [https://repositorio-ucm.edu.co/bitstream/10839/2068/1/Jorge%20Alberto%20Medina%20Valderrama.pdf](https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2068/1/Jorge%20Alberto%20Medina%20Valderrama.pdf)
- Millano, J. Paredes, F. (2016) Variabilidad de la vegetación con el índice de diferencia normalizada (NDVI) en Latinoamérica. *Novum Scientiarum*, 4, 33-44. <http://www.ecoambiente.org/revista/ojs/index.php/novum/article/view/109>.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (s.f.). *Plan Operativo para la reactivación Económica Región de Desarrollo Brunca*. [https://www.mag.go.cr/regiones/region\\_brunca/Caracterizacion-Region-Brunca.pdf](https://www.mag.go.cr/regiones/region_brunca/Caracterizacion-Region-Brunca.pdf)
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2020). *Diagnóstico Minero Región Brunca*. Dirección Geología y Minas. [https://www.geologia.go.cr/mineria/regiones\\_mineras/informes/2019-2020/DIAGNOSTICO%20MINERO%20REGION%20BRUNCA,%202019-2020.pdf](https://www.geologia.go.cr/mineria/regiones_mineras/informes/2019-2020/DIAGNOSTICO%20MINERO%20REGION%20BRUNCA,%202019-2020.pdf)
- Mogadouro, J. J. (2022). *Identificación, mapeo y estimación de biomasa de los pastizales en la región ganadera de Argentina utilizando imágenes ópticas y SAR* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/27947>
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote sensing of Environment*, 61(3), 319-346. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00045-X)

- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1), 6-43. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6504845>
- Moulin, S., Bondeau, A., & Delecalle, R. (1998). Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*, 19(6), 1021-1036. <https://doi.org/10.1080/014311698215586>
- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>
- Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R., Cuartas, C., & Naranjo, J. (2014). Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 17(3), 501-507. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93935728001.pdf>
- NASA. (2013). *Landsat 7 Science Data User's Handbook*. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>
- NASA. (s.f.). *ARSET*. <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)
- Onda electromagnética. (s.f.). *Ingenierizando*. <https://www.ingenierizando.com/cinematica/onda-electromagnetica/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2022). *FAO en Costa Rica. Pilotaje en región Brunca promueve una ganadería más sostenible*. <https://www.fao.org/costarica/noticias/detail-events/fr/c/1626855/>
- Park, J. W., Korosov, A. A., Babiker, M., Sandven, S., & Won, J. S. (2017). Efficient thermal noise removal for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel. *IEEE Transactions on*



*Geoscience and Remote Sensing*, 56(3), 1555-1565. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8126233>

- Pascual, I. G. (2018). *Clasificación de áreas sembradas y determinación del momento de cosecha en Caña de azúcar y Pastizales mediante imágenes ópticas y SAR* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/10753>
- Pech May, F., Sánchez Hernández, J. V., & Sánchez Jacinto, H. (2020). Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2. *Lámpsakos*, 24, 48-59. <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>
- Peña, M. A. (2009). Teledetección de vanguardia para el manejo y monitoreo de los recursos naturales del país. *Gestión Ambiental*, 44-47. [https://www.researchgate.net/profile/Marco\\_Pena2/publication/259622476\\_Teledeteccion\\_de\\_vanguardia\\_para\\_el\\_manejo\\_y\\_monitoreo\\_de\\_los\\_recursos\\_naturales\\_del\\_pais/links/00b7d52ceeee9e2b1b000000/Teledeteccion-de-vanguardia-para-el-manejo-y-monitoreo-de-los-recursos-naturales-del-pais.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marco_Pena2/publication/259622476_Teledeteccion_de_vanguardia_para_el_manejo_y_monitoreo_de_los_recursos_naturales_del_pais/links/00b7d52ceeee9e2b1b000000/Teledeteccion-de-vanguardia-para-el-manejo-y-monitoreo-de-los-recursos-naturales-del-pais.pdf)
- Pérez Gracia, M. D. L. V. (2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/93528>
- Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca. Salamanca, España. [https://eprints.ucm.es/13964/2/TFM\\_Maria\\_Perez.pdf](https://eprints.ucm.es/13964/2/TFM_Maria_Perez.pdf)
- Pérez Ortega, M. (2011). *Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de La Mancha húmeda* [Tesis de maestría, Universidad Computense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/46408>

- Pezo Quevedo, D. A. (2018). *Los pastos mejorados: su rol, usos y contribuciones a los sistemas ganaderos frente al cambio climático* [Serie Técnica. Boletín Técnico N° 91]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8753>
- Podest, E. (2018). *SAR para el mapeo de Cobertura terrestre*. NASA-ARSET <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/session1-AdvSAR%20%28Spanish%29.pdf>
- Podest, E. (2018a). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética*. En *La Teledetección por Radar y sus Aplicaciones para la Tierra, el Agua y Desastres National Aeronautics Space Administration*. <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/SAR-17/Session1-SARSpanish.pdf>
- Podest, E., McCullum, A., Torres, J. L., & McCartney, S. (2020). *Mapeo y Monitoreo de Bosques con Datos SAR: Análisis multitemporal*. [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/SAR\\_Part1\\_Spanish.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/SAR_Part1_Spanish.pdf)
- Programa Estado de la Nación. (2021). *Armonía con la naturaleza. Capítulo 4*. <https://estadonacion.or.cr/wp-content/uploads/2021/11/estado-nacion2021.pdf>
- Qgis. (2016). *Complemento estadísticas de zona QGIS* [Software, versión 2.18]. [https://docs.qgis.org/2.18/es/docs/user\\_manual/plugins/plugins\\_zonal\\_statistics.html](https://docs.qgis.org/2.18/es/docs/user_manual/plugins/plugins_zonal_statistics.html)
- Radriagan, M. (2005). *Metodología de la Investigación*. Nueva Lente Edición.
- Reef Resilience Network. (s.f.). *Teledetección óptica y por radar*. <https://reefresilience.org/es/management-strategies/remote-sensing-and-mapping/introduction-to-remote-sensing/optical-and-radar-remote-sensing/>
- Requena, A., Quintanilla, R., Bolarín, J. M., Bastida, A., & Zúñiga, J. (2008a). La longitud de onda y frecuencia de la radiación. *Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, para PyMEs, IV(1-3)*. <https://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-IV-1/C41s3p1.htm>

- Requena, A., Quintanilla, R., Bolarín, J. M., Bastida, A., & Zúñiga, J. (2008b). *SIGMUR SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia. Tema 3: Plataforma, Sensores y canales*.  
[https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_3.pdf](https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_3.pdf)
- Rodríguez, C. M. (2020). Presentación del Sistema Nacional de Monitoreo de Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE). *Ambientico*, (273), 4-6. <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/273.pdf>
- Ruíz Fernández, L. Á. (2015). *Sensores de microondas en teledetección–II: Aspectos radiométricos*. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/51175/Objeto\\_Radar1.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/51175/Objeto_Radar1.pdf?sequence=1)
- Sánchez, A. (2015). *Diagnóstico sobre posibles problemas que están afectando el funcionamiento del mercado de carne de res*. <http://reventazon.meic.go.cr/informacion/estudios/2015/bovino.pdf>
- Sánchez, C. A. (2023). *Las pruebas de normalidad*. [https://www.researchgate.net/publication/366922523\\_Las\\_pruebas\\_de\\_normalidad](https://www.researchgate.net/publication/366922523_Las_pruebas_de_normalidad)
- Sancho-Jiménez, L. F., & Brenes-Cambronero, L. (2021). Cobertura de suelo en La Paz, Piedades Norte, San Ramón, Alajuela, Costa Rica (2016-2017). *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 19(37), 74-103. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/16798>
- Sandoval-Mejía, L. A., Bueso-Uclés, F. J., & Vélez-Nauer, M. (2008). Predicción nutricional para pastos tropicales por espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano. *Agronomy Mesoamerican*, 19(2), 221-225. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/5003/4810>
- Schomwandt, D. (2015). *Teledetección Aplicada a las Ciencias Agronómicas y Recursos Naturales*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación, Argentina.  
[http://www.siiia.gob.ar/joomla\\_files/images/mapas/ManualSensores.pdf](http://www.siiia.gob.ar/joomla_files/images/mapas/ManualSensores.pdf)

- Scurlock, J. M. O., & Hall, D. O. (1998). The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 4(2), 229-233.
- Sebem, E. (2005). *Aportaciones de la teledetección en el desarrollo de un sistema metodológico para la evaluación de los efectos de cambio climático sobre la producción de las explotaciones agrarias* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].  
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.78>
- Sierra, R., Cambronero, A., & Vega, E. (2016). *Patrones y factores de cambio de la cobertura forestal natural de Costa Rica, 1987-2013* [Informe Final]. [https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/rsierraacambroneroevega\\_patrones\\_y\\_factores\\_cus.pdf](https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/rsierraacambroneroevega_patrones_y_factores_cus.pdf)
- Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Servicios de publicaciones. Universidad de Valencia.  
<https://www.uv.es/ucg/books.html>
- Solano, J., & Villalobos, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climática de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 8(1), 26-39.
- Solorza, R. (2013). *Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes SARAT*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba]. [https://ig.coe.nae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2010\\_Solorza-Romina.pdf](https://ig.coe.nae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2010_Solorza-Romina.pdf)
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & De Haan, C. (2009). *La larga sombra del ganado: Problemas ambientales y opciones*. Fao. <https://agritrop.cirad.fr/553605/>
- Torre Pillpa, M. I., & Rivas Aquino, P. D. (2019). *Análisis temporal de la pérdida de cobertura vegetal mediante teledetección en el distrito de Satipo-Satipo-Junín, durante los años*

2015–2018 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/39901>

Unionedomex. (2021). *Ondas mecánicas y electromagnéticas*. <https://www.unionedomex.mx/2021/01/15/ondas-mecanicas-y-electromagneticas-aprende-en-casa-3-secundaria/>

Valencia, B., & Upegui, E. (2020). Propuesta metodológica para generar mapas de cobertura de la tierra a partir de imágenes de radar ALOS/PALSAR: Estudio de caso Mompós, Colombia. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E28), 56-68. <https://www.proquest.com/docview/2388304990>

Valverde Chávez, B. (2022). *Análisis de la dinámica de deforestación ocurrida en los últimos cinco años en la zona intangible “Tagaeri taromenane” (ZITT) mediante aplicación de tecnologías geoespaciales* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16124>

Vásquez Prieto, L. P., & Cardona Morales, O. (2019). *Diseño de una metodología de clasificación de cobertura de manglar empleando imágenes SAR polarimétricas* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Manizales]. <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/2511>

Villarroya-Carpio, A., Lopez-Sanchez, J. M., & Engdahl, M. E. (2022). Sentinel-1 interferometric coherence as a vegetation index for agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113208. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113208>

Villegas, P. (2019). *Mecanismos de retrodispersión de las imágenes de radar de apertura sintética SAR*. <https://aguaysig.com/mecanismos-de-retrodispersion-de-las-imagenes-sar/>

Voormansik, K., Zalite, K., Sünter, I., Tamm, T., Koppel, K., Verro, T., ... & Praks, J. (2020). Separability of mowing and ploughing events on short temporal baseline Sentinel-1 coherence time series. *Remote Sensing*, 12(22), 3784. <https://doi.org/10.3390/rs12223784>

- Wang, S., Yuen, K. V., Yang, X., & Zhang, B. (2022). A nonparametric tropical cyclone wind speed estimation model based on dual-polarization SAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-13. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9815116>
- Whitcraft, A. K., Vermote, E. F., Becker-Reshef, I., & Justice, C. O. (2015). Cloud cover throughout the agricultural growing season: Impacts on passive optical earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 156, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.009>
- Wiseman, G., McNairn, H., Homayouni, S., & Shang, J. (2014). RADARSAT-2 polarimetric SAR response to crop biomass for agricultural production monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(11), 4461-4471.
- Xiong, J., Thenkabail, P. S., Gumma, M. K., Teluguntla, P., Poehnelt, J., Congalton, R. G., & Thau, D. (2017). Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 225-244. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019>

## ANEXOS

**ANEXO 1. CÓDIGO EN JAVASCRIPT PARA OBTENER EL NDVI DE LAS IMÁGENES SENTINEL 2A SR.**

```
ets...

SENTINEL2ASR_NDVI_BRUNCA  Get Link Save Run Reset Apps

1 // Define la región de interés (Brunca, Costa Rica)
2 var regionBrunca = ee.Geometry.Rectangle([-83.5396389429996304,8.7928680861803343,-83.0557
3
4 // Filtra las imágenes Sentinel-2A SR del mes de enero de 2019
5 var images = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
6   .filterBounds(regionBrunca)
7   .filterDate('2019-01-01', '2019-01-06');
8
9 // Función para calcular el NDVI
10 function calcularNDVI(image) {
11   var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');
12   return image.addBands(ndvi);
13 }
14
15 // Aplica la función calcularNDVI a todas las imágenes
16 var imagesNDVI = images.map(calcularNDVI);
17
18 // Mosaico de las imágenes
19 var mosaic = imagesNDVI.median();
20
21 // Define la visualización del NDVI
22 var visParams = {
23   min: -1,
24   max: 1,
25   palette: ['blue', 'white', 'green']
26 };
27
28 // Agrega el mosaico al mapa
29 Map.addLayer(mosaic.select('NDVI'), visParams, 'NDVI Brunca, Enero 2019');
30
31
32 // Exporta la imagen del NDVI
33 Export.image.toDrive({
34   image: mosaic.select('NDVI'),
35   description: 'NDVI_Brunca_2019_ENERO_01_06_01_2019',
36   scale: 10, // Ajusta la escala según tus necesidades
37   region: regionBrunca
38 });
```

## ANEXO 2. CÓDIGO EN RSTUDIO PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

The screenshot displays the RStudio interface with the following components:

- Source Editor:** Contains R code for installing packages (tidyverse, rstatix, ggpubr), loading libraries, reading a CSV file, calculating the Pearson correlation coefficient using `ggscatter`, performing a Shapiro-Wilk normality test, and creating a scatter plot with a regression line using `ggplot`.
- Environment:** Shows loaded data objects: `base_datos_` (3456 obs. of 20 variables), `ptc` (26125 obs. of 44 variables), `ptos` (26125 obs. of 43 variables), and `resultado` (List of 4).
- Files:** Lists installed packages including `FIESTA.pkg`, `install.FIESTA.pks`, `FI.COBERTURAX`, and `unquetid`.
- Console:** Shows the execution of the code, including the Shapiro-Wilk test results: `data: base_datos_ptc_SIQMAnIn`, `w = 0.95201`, and `p-value = 2.2e-16`.
- Plot:** A scatter plot showing the relationship between `00 dB VH_ENERO_06_2019` (x-axis) and `NDVI_enero_2019` (y-axis). The plot includes a regression line and a shaded confidence interval. The correlation coefficient is  $R = 0.3$  and the p-value is  $p < 2.2e-16$ .