

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**RECONSTRUCCIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO EN
IMÁGENES SAR DEBIDO A LA DISTORSIÓN
ORIGINADA POR EFECTOS METEOROLÓGICOS**

PRESENTADO POR:

JUAN FRANCISCO ALAS GÓMEZ

PABLO FEDERICO HERNÁNDEZ MENA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**RECONSTRUCCIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO EN
IMÁGENES SAR DEBIDO A LA DISTORSIÓN
ORIGINADA POR EFECTOS METEOROLÓGICOS**

Presentado por:

JUAN FRANCISCO ALAS GÓMEZ

PABLO FEDERICO HERNÁNDEZ MENA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS EUGENIO MARTÍNEZ CRUZ

SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS EUGENIO MARTÍNEZ CRUZ

AGRADECIMIENTOS

Luego de culminar este camino me es muy grato el sentimiento de felicidad y orgullo que siento en mí, muchas veces llegué a pensar que no iba a ser capaz y que no merecía esta oportunidad. Sin embargo, encontré mi motor de apoyo en las personas que me han rodeado a lo largo de mi vida, sin ellas, digo desde el corazón, que no lo hubiera podido lograr. Me siento eternamente agradecido por todos, independiente de si continúen a mi lado o no, todos han sido un factor en mi crecimiento y me han brindado historias y experiencias que me han hecho sentir muy feliz, he sentido su apoyo en momentos de debilidad y quiebres, lo cual me ha permitido levantarme y continuar fervientemente con el desafío interesante que es esta vida.

A mi madre Dora Alicia Mena, por su amor y apoyo incondicional, nunca dejo de preocuparse o estar pendiente de mí.

A mi padre Carlos Antonio Hernández, aparte de su apoyo y amor, siempre luché por que tuviéramos lo necesario.

A mi abuelito Alfonso Benigno Hernández, que en tierra y cielo me ha motivado a crecer y ser mejor cada día.

A mis hermanos, que me han brindado su apoyo a pesar de las dificultades.

A mis amigos y compañeros del Complejo Educativo Católico Nuestra Señora del Rosario, formaron parte de mi crecimiento y me dieron alegría en su tiempo.

A mis amigos con los que forme parte de los Scouts, con los que continuamos teniendo relación y los considero como hermanos.

A mis amigos y compañeros de la universidad, por todas las experiencias y buenos momentos que compartimos.

A los profesores de mi educación básica y media, con su profesionalismo me brindaron el amor inicial al conocimiento.

Al Dr. Carlos Martínez, por ser un excelente profesional, investigador y docente.

A todos los docentes de la unidad de ciencias básicas y de la escuela de eléctrica, por brindarme las herramientas y pasión por la ingeniería.

Eternamente agradecido con todos ustedes...

Pablo Federico Hernández Mena

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero agradecer a Dios por permitirme culminar este proceso académico. Sin su gracia, misericordia y amor, nada de esto hubiera sido posible.

Quiero expresar mi infinita gratitud a mi madre, cuyo apoyo incondicional, dedicación y motivación han sido fundamentales para alcanzar este logro. A través de su ejemplo, he aprendido que el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia son la base para cumplir cualquier meta en la vida.

Agradezco a mi padre por esclarecer mis ideas y brindarme su apoyo durante todo el proceso. Mi sincero agradecimiento también va para mi hermana, quien siempre estuvo ahí para escucharme y ofrecerme su apoyo incondicional. Estoy muy agradecido a mi abuelo por su constante presencia y apoyo a lo largo de mi vida, y a mi abuela, quien siempre mantuvo su fe y confianza en mis capacidades hasta su último momento en esta tierra; nunca dudó de mí.

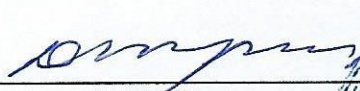
Expreso mi más profundo agradecimiento a nuestro asesor de tesis, Dr. Carlos Martínez, y a la institución por su valiosa colaboración a través de su tiempo y conocimiento en la realización de este trabajo. También agradezco a cada uno de los ingenieros, docentes y colaboradores que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a mi formación profesional. Mi gratitud se extiende a las autoridades de la escuela por brindar la información y colaboración necesarias para la obtención de datos que fundamentaron las bases de este trabajo de graduación.

Juan Francisco Alas Gómez

NOTA Y DEFENSA FINAL

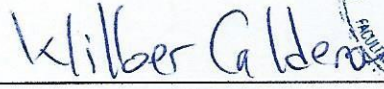
En esta fecha, viernes 23 de agosto de 2024, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 11:30 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino



Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario




Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- DR. CARLOS EUGENIO MARTÍNEZ CRUZ
(Docente Asesor)



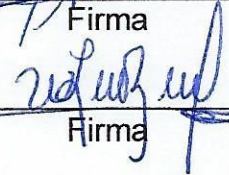
Firma

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ



Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS



Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

RECONSTRUCCIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO EN IMÁGENES SAR DEBIDO A LA
DISTORSIÓN ORIGINADA POR EFECTOS METEOROLÓGICOS

A cargo de los Bachilleres:

- ALAS GÓMEZ JUAN FRANCISCO
- HERNÁNDEZ MENA PABLO FEDERICO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.9

(OCHO PUNTO NUEVE)

ÍNDICE

RESUMEN	12
CAPITULO I	13
I.1. Introducción	13
I.2. Objetivos	13
General:.....	13
Específicos:	13
I.3. Alcances	14
I.4. Antecedentes	14
I.5. Planteamiento del Problema	15
I.6. Justificación	16
I.7. Organización del Documento	16
CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL E HISTÓRICO	17
II.1. Análisis de la problemática del estudio	17
II.2. Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero	18
Niveles de embalse de presas hidroeléctricas	19
II.3. Influencia climática de El Salvador	20
II.4. Eventos Climáticos Específicos	21
II.5. Sentinel-1	23
Polarización VV	23
Polarización VH	24
Bandas de Frecuencia.....	24
Decibelios (dB) en imágenes de Google Earth Engine.....	25
Influencia de la Órbita del Satélite.....	25
II.6. Sentinel-2	27
Índice de agua Normalizado	28
II.7. Series de tiempo con GEE	29
II.8. Pixeles de agua como área de agua	31
II.9. Resumen de Capitulo.	32
CAPITULO III. DESARROLLO	34
III.1. Delimitación del área de interés ROI	34
III.2. Dibujar un polígono	34
III.3. Influencia de las órbitas en la generación de series de tiempo	35
III.4. Influencia de las polarizaciones en las imágenes SAR	36
III.5. Clasificación de pixeles	38
III.6. Variables que influyen en la generación de series de tiempo	41
Determinación de umbral en base a imagen promediada	41
Influencia de la selección apropiada de un polígono en GEE.....	41

III.7. Variaciones de la cantidad de dB con respecto a la polarización.....	43
III.8. Función para crear la serie de tiempo.....	44
Función de clasificación de pixeles.....	45
Pruebas con la función.....	45
III.9. Uso de imágenes ópticas en la generación de series de tiempo.....	51
Visualización de imágenes Ópticas en Sentinel 2.....	51
Función para clasificación de agua en Sentinel 2.....	52
Generación de serie de tiempo con imágenes ópticas de Sentinel 2.....	52
CAPITULO IV. ALTERNATIVAS PARA SOLVENTAR LA INFLUENCIA CLIMÁTICA EN LAS SERIES DE TIEMPO	54
IV.1. Determinación de umbral.....	54
IV.2. Presentación del método.....	57
CAPITULO V. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS.....	64
ANEXO 1. Niveles de Embalse dados por la Unidad de Transacciones.	64
ANEXO 2. Datos obtenidos de Pluviómetro Osicala y Santiago de María.	65
ANEXO 3. Lectura Imágenes Sentinel-1.....	69
ANEXO 4. Imágenes SAR con distintas órbitas y polarizaciones.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales Características de la Central Hidroeléctrica 3 de Febrero de El Salvador.....	19
Tabla 2. Resumen Datos técnicos Sentinel-1.	26
Tabla 3. Bandas de Sentinel-2.....	28
Tabla 4. Resumen de características Sentinel-2.....	28
Tabla 5. Interpretación de valores NDWI [22].	29
Tabla 6. Varianza entre clases VH.	55
Tabla 7. Varianza entre clases en polarización VV.	56
Tabla 8. Promediado de cada mes a las 00:00 horas del nivel de embalse 3 de Febrero.....	64
Tabla 9. Lluvia acumulada en mm Pluviómetro Santiago de María.	65
Tabla 10. Lluvia acumulada en mm Pluviómetro Osicala.....	67
Tabla 11. Código de imágenes SAR Órbita Descendente.....	69
Tabla 12. Código de imágenes SAR Órbita Ascendente.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Serie de tiempo del embalse 3 de Febrero.	17
Figura 2. Ubicación del embalse y Central Hidroeléctrica 3 de Febrero.	18
Figura 3. Radar meteorológico 28 de julio 2023 [13].	21
Figura 4. Lluvia en mm, registrada por pluviómetro Santiago de María.	22
Figura 5. Lluvia en mm, registrada por pluviómetro Osicala.	22
Figura 6. Milímetros de lluvia registrados por pluviómetro MARN 2023.	23
Figura 7. Infografía de misión Sentinel-1 [16].	24
Figura 8. Frecuencia de revisita y cobertura de la constelación de Sentinel-1 [20].	27
Figura 9. Ejemplo de obtención de una serie de tiempo.	30
Figura 10. Parámetro scale para definir resolución de metros por pixel.	31
Figura 11. Coordenadas de la Presa 3 de Febrero ROI.	34
Figura 12. Imagen SAR 20/10/22 del embalse 3 de Febrero, Órbita Descendente, polarización VV.	35
Figura 13. Imagen SAR 04/10/22, del embalse 3 de Febrero, Órbita Ascendente, polarización VV.	36
Figura 14. Imagen SAR 20/10/22, del embalse 3 de Febrero polarización VH.	37
Figura 15. Imagen SAR 20/10/22, embalse 3 de Febrero polarización VV.	37
Figura 16. Histograma polarización VH, órbita descendente.	38
Figura 17. Histograma polarización VH, órbita Ascendente.	39
Figura 18. Histograma polarización VV Órbita Ascendente.	40
Figura 19. Histograma Polarización VV Órbita descendente.	40
Figura 20. Imagen promediada del área de estudio del embalse de la Presa 3 de Febrero.	42
Figura 21. Polígono de selección del Área de estudio del embalse de la Presa 3 de Febrero.	42
Figura 22. Promedio del coeficiente de retrodispersión.	44
Figura 23. Definición de la función en el código.	45
Figura 24. Serie de tiempo con umbral de -18 dB en VH, Órbita Ascendente.	45
Figura 25. Serie de tiempo con umbral de -26dB en VH.	46
Figura 26. Serie de tiempo con umbral de -15dB en VV.	47
Figura 27. Serie de tiempo con umbral de -20 dB en VV, Órbita Ascendente.	47
Figura 28. Serie de tiempo con umbral de -15dB en VV, Órbita Descendente.	48
Figura 29. Serie de tiempo producto del promedio de órbita Ascendente y Descendente.	49
Figura 30. Serie de tiempo producto del promedio VH y VV.	50
Figura 31. Visualización RGB de la región de interés 03/10/2022.	51
Figura 32. Función NDWI para grafica serie de tiempo.	52
Figura 33. Serie de tiempo generada con imágenes Ópticas de Sentinel 2.	53
Figura 34. Varianza respecto al índice del umbral en polarización VH.	55
Figura 35. Varianza respecto al índice del umbral VV.	56
Figura 36. Gráfica de serie de tiempo con el método deducido en el estudio.	57
Figura 37. Comparación de series de tiempo.	58
Figura 38. Nivel de embalse Presa 3 de Febrero en msnm.	64
Figura 39. Infografía de lectura imagen SAR.	69
Figura 40. Polarización VH órbita descendente.	72
Figura 41. Polarización VV órbita descendente.	72
Figura 42. Imagen SAR 04/10/2022 órbita ascendente polarización VH.	73
Figura 43. Imagen SAR 20/10/2022 órbita descendente polarización VH.	73

RESUMEN

Este estudio se basa en la premisa de que las imágenes de apertura sintética SAR son inmunes a las condiciones climáticas adversas en las regiones donde se capturan. Sin embargo, durante la investigación se observa que, al generar series de tiempo utilizando imágenes SAR, los eventos climáticos que afectan las regiones de estudio pueden influir en los datos obtenidos.

El estudio emplea el uso de la plataforma de Google Earth Engine (GEE) para analizar, probar y corregir una serie temporal generada a partir de una colección de imágenes SAR, capturas de la región de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero, un proyecto financiado con fondos públicos y polémico en El Salvador. El periodo de estudio abarca de octubre de 2022 a mayo de 2024, tiempo durante el que transcurren eventos significativos como el vaciado de emergencia del embalse de la Presa Hidroeléctrica El Chaparral, ahora conocida como 3 de Febrero, y su inauguración por parte del gobierno actual.

Considerando los antecedentes públicos y funcionales de la región de estudio, este trabajo pretende explicar y presentar al lector una serie temporal creada con imágenes SAR capturas en la región. Sin embargo, la serie contiene dos puntos críticos que no se justifican considerando la estabilidad que el embalse de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero tuvo que haber tenido. Por ello, este informe busca corregir estas anomalías mediante la realización de pruebas con diversas variables aplicadas a la captura de imágenes SAR. Estas variables repercuten en los datos utilizados para crear una serie temporal.

La experimentación busca fijar un método para corregir cambios en la tendencia de una serie temporal, que se estima son causados por eventos climáticos puntuales, como una tormenta en la región oriental del país. Para ello, se utilizan registros de entidades institucionales como la Unidad de Transacciones y el Ministerio de Medio Ambiente, considerando datos sobre el nivel del embalse durante ese periodo y registros, como la cantidad de lluvia acumulada.

La estructuración de un método para solventar y mitigar estos efectos conlleva cambios de polarización, el cambio de órbita y ajustar el umbral de filtrado. Estas variables se utilizan para clasificar, a través de una función los píxeles que representan agua y los que no.

Realizando una serie de pruebas que implican la combinación, promediado y mezcla de diversas variables, además de la experimentación con imágenes ópticas disponibles a través de GEE. Se obtiene las bases, tanto desde un punto de vista matemático como visual, de las condiciones que proporcionan los mejores resultados para una serie temporal de la región.

Como resultado del estudio y la experimentación, se propone un método que utiliza el umbral calculado, además de la polarización VH y una órbita ascendente. Este enfoque permite corregir las anomalías en la serie de tiempo y realizar las correcciones necesarias para reconstruir de manera satisfactoria la tendencia que debería representar la serie temporal.

CAPITULO I

I.1. Introducción

El monitoreo de embalses de presas hidroeléctricas es importante para la gestión eficiente de los recursos hídricos y la generación de energía. Dicho lo anterior, las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) se han convertido en una herramienta muy relevante para el monitoreo de cambios en la superficie terrestre, proporcionando datos de alta resolución espacial y temporal.

La siguiente investigación se enfoca en el efecto significativo que las condiciones climáticas ejercen sobre la generación de series de tiempo a partir de imágenes SAR, específicamente aquellas obtenidas del satélite Sentinel-1 de la misión COPERNICUS. Nuestro lugar de estudio es en el embalse de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero ubicada en El Salvador, anteriormente conocida como Chaparral, donde la capacidad de generar series de tiempo es relevante para comprender el ciclo de llenado y vaciado del embalse, así como para la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres.

La serie de tiempo generada a partir de imágenes SAR revela cambios abruptos en la superficie del embalse, los cuales están influenciados por una variedad de factores, incluyendo las condiciones climáticas como la precipitación y la humedad del suelo. Estos cambios abruptos pueden dificultar la interpretación precisa de la serie de tiempo y afectar negativamente al análisis de datos.

Se hace la propuesta de un método que mitigue las variaciones inducidas por las condiciones climáticas en la serie de tiempo generada a partir de imágenes SAR. Este método explora diferentes polarizaciones, umbrales de detección, y considerará múltiples órbitas de adquisición de datos para mejorar la precisión del análisis.

El desarrollo de este método tiene como objetivo mitigar los cambios abruptos dentro de las series de tiempo generadas en el embalse de la Presa de la Central Hidroeléctrica 3 de Febrero, producto de condiciones climáticas pueden afectar los datos obtenidos de las imágenes SAR, desafiando las suposiciones previas de la literatura.

I.2. Objetivos

General:

Demostrar que contrario a lo establecido en la literatura el clima tiene efectos en las imágenes SAR y la serie de tiempo que se obtiene a partir de ella.

Específicos:

- 1) Probar diferentes polarizaciones para obtener series de tiempo.
- 2) Probar diferentes órbitas para obtener series de tiempo.
- 3) Probar diferentes umbrales para obtener series de tiempo.

- 4) Proponer métodos para corregir o minimizar los efectos de la interferencia atmosférica.
- 5) Graficar una serie de tiempo usando el método establecido que arrojo los mejores resultados.
- 6) Utilizar imágenes ópticas para graficar series de tiempo.
- 7) Proponer alternativas que enfrenten la influencia de cambios climáticos severos en la construcción de serie de tiempo

I.3. Alcances

La investigación se centra directamente en el análisis de efectos climáticos en la creación de series de tiempo a partir de imágenes SAR, con un enfoque específico en el embalse de la Presa 3 de Febrero. Esta elección se fundamenta en su relevancia geográfica y la disponibilidad de datos pertinentes para llevar a cabo un análisis detallado.

Se analizan los efectos, cambios y modificaciones en los puntos de las series de tiempo generadas a partir de imágenes SAR, con el fin de identificar y comprender cómo los fenómenos meteorológicos influyen en la dinámica del embalse. Específicamente, se pretende: Graficar series de tiempo que muestren las variaciones en el embalse a lo largo del tiempo, destacando tendencias irregulares o puntos incoherentes que puedan ser atribuidos a factores climáticos.

El análisis de datos se llevará a cabo mediante la utilización de imágenes SAR obtenidas desde octubre del año 2022 hasta mayo del año 2024. Se prestará especial atención a variables como el nivel de embalse, la extensión del embalse y la variabilidad temporal en estas mediciones. Se efectúa una experimentación con las condiciones que modificación las imágenes y un análisis estadístico para identificar y corregir los efectos climáticos en la serie temporal del embalse.

Se realiza un análisis específico para evaluar el impacto de las tormentas tropicales en la dinámica del embalse. Se busca distinguir y caracterizar las modificaciones en el embalse que puedan atribuirse a la actividad de tormentas tropicales, así como determinar la duración y la magnitud de estos efectos.

Basándose en los resultados obtenidos del análisis de series de tiempo y la identificación de los efectos climáticos, se diseñará una propuesta de mejora que pueda contribuir a la optimización de la generación y análisis de series de tiempo a partir de imágenes SAR. Esta propuesta se fundamentará en las conclusiones derivadas del estudio y se orientará hacia la implementación de prácticas o metodologías que permitan una mejor comprensión y monitorización de los efectos climáticos en cuerpos de agua como el embalse de la Presa 3 de Febrero.

I.4. Antecedentes

Tomando de forma inicial el trabajo de graduación, el cual enfatiza el uso de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) para el análisis de embalses de presas hidroeléctricas en El Salvador, se busca profundizar en esta metodología aplicándola específicamente al embalse 3 de Febrero en el marco de nuestra investigación [1].

Las imágenes SAR, según nos describe la teoría, al ser capaces de captar datos en cualquier condición climática son extremadamente útiles en regiones con condiciones meteorológicas adversas. Esto se debe a que en principio las microondas utilizadas por el radar pueden penetrar nubes, lluvia y niebla,

proporcionando imágenes detalladas independientemente del clima. Entonces al generar series de tiempo del embalse, se debería realizar un seguimiento continuo y preciso de los cambios en la superficie del agua y otros parámetros críticos, identificando patrones influenciados por fenómenos climáticos como sequías, lluvias intensas y huracanes.

Es imprescindible reconocer los aportes de investigaciones anteriores que han examinado la influencia de la precipitación en la calidad de las imágenes. Una muy relevante en este ámbito es el estudio **“Precipitation Induced Signatures in SAR Images”** [2]. Detalla cómo las fuertes lluvias pueden inducir distorsiones significativas en las imágenes SAR, especialmente en frecuencias de banda X y superiores. Este documento es de gran relevancia para la presente investigación, ya que ofrece una evaluación cuantitativa de los efectos de la precipitación y establece una metodología para correlacionar datos de radar meteorológico con imágenes SAR. Los resultados obtenidos son fundamentales para la interpretación precisa de las series de tiempo SAR y para la mejora de la fiabilidad de estas tecnologías en condiciones meteorológicas desafiantes. La comprensión de estos efectos es crucial para el desarrollo de algoritmos robustos que puedan compensar las anomalías inducidas por el clima y asegurar la integridad de los datos en estudios a largo plazo.

La precisión en la interpretación de series de tiempo generadas a partir de imágenes SAR es de suma importancia para diversas aplicaciones, incluyendo el monitoreo ambiental y la gestión de desastres. Sin embargo, esta precisión puede verse comprometida por los efectos de la propagación atmosférica, como lo demuestra el estudio **“Assessment of Atmospheric Propagation Effects in SAR Images”** [3]. Este análisis, realizado con el satélite TerraSAR-X, revela cómo fenómenos meteorológicos como la precipitación intensa pueden introducir artefactos en las imágenes SAR. El estudio identificó firmas de células de lluvia, las cuales representan pequeñas áreas de precipitación intensa dentro de una nube de tormenta. Aunque su duración es relativamente corta, la precipitación dentro de una célula de lluvia puede ser extremadamente intensa, produciendo lluvias torrenciales, granizo y, en algunos casos, ráfagas de viento fuertes. Durante la fase de puesta en marcha del satélite, se encontraron estas firmas en aproximadamente 100 de las 12,000 escenas examinadas, lo que subraya la necesidad de una evaluación cuidadosa de los datos SAR.

Un caso destacado en el estudio anterior fue la adquisición de datos sobre la ciudad de Nueva York, donde se observaron firmas típicas de células de lluvia. La comparación de estas imágenes SAR con datos de radar meteorológico adquiridos casi simultáneamente confirmó que las reflectividades altas en el radar meteorológico pueden causar distorsiones visibles en las imágenes SAR. Además, el estudio abordó cómo la atmósfera puede afectar la calibración externa de los datos SAR. Al correlacionar los datos de radar meteorológico con las adquisiciones SAR, fue posible identificar y excluir las imágenes afectadas por la precipitación del proceso de calibración, mejorando así la precisión de la constante de calibración absoluta.

I.5. Planteamiento del Problema

Las series de tiempo generadas a partir de imágenes SAR contrario a lo establecido en la literatura sufren cambios drásticos e incoherentes, como resultado de fenómenos meteorológicos viéndose reflejados en puntos fuera de la secuencia lógica de la serie de tiempo graficada.

I.6. Justificación

Contrario a lo establecido en la literatura, los fenómenos climáticos presentan efectos adversos en la obtención de series de tiempo a partir de imágenes SAR. Se propone un método que permita reducir estos efectos en las series de tiempo, permite que estas series de tiempo en futuros estudios cuenten con mayor precisión y por ende mejores resultados.

Al comprender mejor cómo los fenómenos meteorológicos que afectan las series de tiempo generadas mediante imágenes SAR, se espera poder contribuir al desarrollo de técnicas más efectivas para el procesamiento y la interpretación de este tipo de datos, lo que resultará en una mejor aplicación en diversas áreas para casos de estudio u investigación.

Las series de tiempo derivadas de imágenes SAR son una valiosa herramienta para el monitoreo y ayudan a comprender la dinámica de cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Estas series proporcionan información detallada sobre fenómenos como cambios en el uso del suelo, deformaciones en la superficie, y variaciones en cuerpos de agua, entre otros. La utilización de estas brinda un enfoque más detallado e incluso pueden hacer más preciso una investigación sobre un cuerpo específico. Poder optimizar los datos que presentan debe ser fundamental para tener veracidad en las investigaciones y presentación de resultados en ellas.

En el contexto específico del embalse de la presa Hidroeléctrica 3 de Febrero en El Salvador, la generación de series de tiempo a partir de imágenes SAR podría tener un impacto significativo para observar la evolución que este ha tenido, sin depender de organismos gubernamentales. A pesar de su potencial, existe una falta notable de información detallada y actualizada sobre la dinámica temporal de este embalse. Anteriormente la información sobre los embalses de las presas hidroeléctricas en El Salvador era compartida al ojo público, pero actualmente la información se ha vuelto más complicada de obtener, por lo cual es necesario poder obtener esta información y tener un criterio sobre cómo ha sido el comportamiento y evolución que la presa y embalse han tenido a lo largo de su polémica historia.

I.7. Organización del Documento

El desarrollo de este documento conlleva la siguiente secuencia para demostrar el procedimiento de obtención de resultados: El capítulo II brinda algunos antecedentes históricos en torno al proyecto de la central eléctrica 3 de Febrero, el uso de series de tiempo dadas por GEE y como referencia el clima en El Salvador, delimitando a efectos climatológicos específicos. En el capítulo III se desarrollan una serie de pruebas en distintos escenarios con el fin de explicar los cambios y la relevancia de las variables de interés dentro del estudio, como lo son las órbitas y las polarizaciones, además de evidenciar la importancia de un umbral adecuado para procesar las imágenes y que los datos obtenidos sean de aporte técnico y gráfico para futuros estudios de la región. Con el fin de lograr la implementación de un código en la plataforma GEE para generar una serie temporal de imágenes SAR que logre mitigar los efectos y la distorsión producida por los fenómenos climáticos que han afectado a la región en el periodo de estudio. El capítulo IV detalla pasos para mitigar puntos dispersos en la serie temporal de imágenes SAR del embalse de la presa hidroeléctrica 3 de Febrero. En el capítulo V se analizan los resultados obtenidos.

CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL E HISTÓRICO

II.1. Análisis de la problemática del estudio

Las series de tiempo generadas a partir de imágenes SAR, contrario a lo establecido en la literatura, a menudo sufren cambios drásticos e incoherentes. Estos cambios inesperados son el resultado de fenómenos meteorológicos, como lluvias intensas o vientos fuertes, que pueden influir significativamente en la señal de retrodispersión capturada por el radar. Estos eventos meteorológicos alteran las condiciones de superficie, creando patrones de retrodispersión que no reflejan cambios reales en los cuerpos de agua, sino más bien variaciones momentáneas en la superficie de las mismas.

Por ejemplo, una lluvia intensa puede generar una superficie más rugosa en un cuerpo de agua, aumentando la retrodispersión y haciendo que el agua se vea más brillante en las imágenes SAR. Del mismo modo, vientos fuertes pueden causar ondulaciones en la superficie del agua, afectando también la señal de retrodispersión y resultando en datos que parecen incoherentes o sin fundamento cuando se grafican en una serie de tiempo.

Dicho lo anterior, nuestro problema de análisis se basa en la serie de tiempo obtenida en las fechas de octubre de 2022 hasta mayo de 2024, siendo el área de estudio el embalse de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero. Se observa en la Figura 1 como el 31 de julio de 2023 y el 8 de abril de 2024 sucedió un pico de caída drástico a la tendencia que, según consultas hechas a entidades gubernamentales y privadas, no deberían suceder porque no hubo algún vaciado de embalse, al menos no anunciado públicamente. Cabe destacar que el enfoque de este estudio se limita al evento de 2023, mientras que el de 2024, queda fuera de los alcances iniciales de los objetivos, será brevemente considerado en el capítulo de conclusiones para aportar algunas reflexiones adicionales. A continuación, se presenta la siguiente serie de tiempo de interés a resolver:

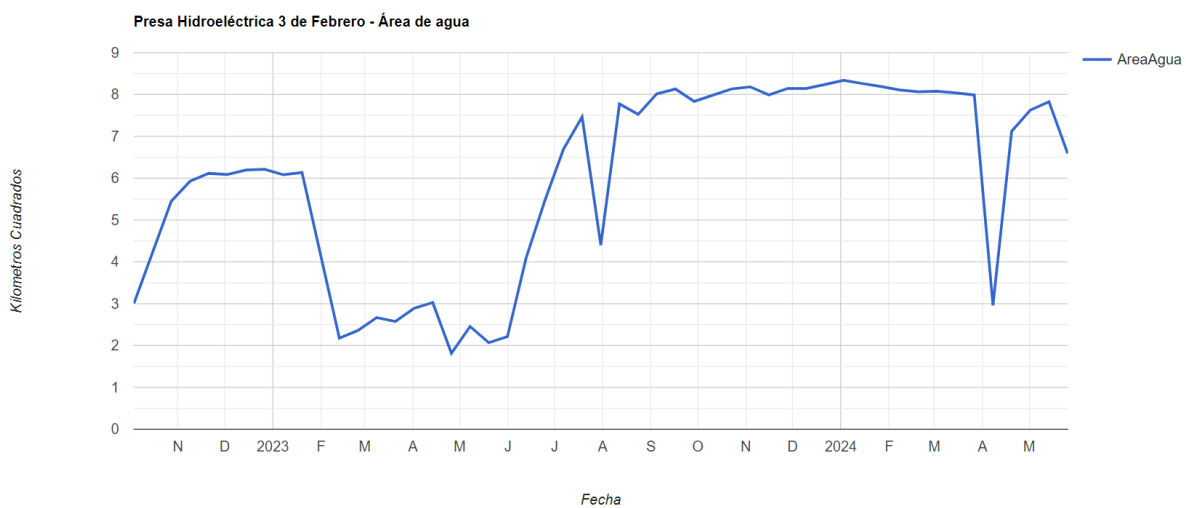


Figura 1. Serie de tiempo del embalse 3 de Febrero.

Se establece que es por un fenómeno meteorológico debido a que, en las fechas dichas anteriormente, las del pico de caída, sucedieron tormentas en la zona puntual y colindante con la del área de estudio. Dichos datos han sido fundamentados con reportes del ministerio de medio ambiente, el cual ha hecho público que existieron ciertas precipitaciones, a su vez, se obtuvieron los datos de lluvia acumulada que se presentó en el año 2023 por día, dato proveniente del pluviómetro de Osicala, el cual se encuentra más cercano con una distancia de 22 kilómetros, dando validez a la problemática planteada.

Por lo tanto, para mitigar estos efectos y mejorar la precisión de las series de tiempo generadas a partir de imágenes SAR, es esencial implementar métodos que consideren y compensen estos fenómenos meteorológicos. Esto puede incluir la integración de datos meteorológicos adicionales para identificar y corregir anomalías, así como la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, como el filtrado espacial y temporal, para suavizar las series de tiempo y reducir el impacto de estas variaciones no deseadas.

En los siguientes apartados se ira planteando la teoría general sobre algunos sucesos históricos, para brindarnos un contexto sobre lo que significa la Central Hidroeléctrica 3 de Febrero, información sobre los embalses y según la CEL cuando han sucedido los vaciados de embalse. Se incluye teoría sobre el clima que ocurre en El Salvador, marcando cuales son las épocas lluviosas o de invierno. Para finalmente introducir la herramienta que utilizaremos de análisis, Google Earth Engine, la plataforma que nos permitirá visualizar y analizar las imágenes satelitales obtenidas para nuestro lugar y fecha de estudio, a través de las imágenes obtenidas por el satélite Sentinel-1 de la misión Copernicus, el cual nos brinda imágenes de apertura sintética SAR.

II.2. Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero

Iniciando su construcción en el 2008, bajo el gobierno del presidente Elías Antonio Saca, dicha represa ha tomado nombres según cada gobierno en curso, siendo Central Hidroeléctrica 3 de Febrero el nombre bajo el cual se inauguró en el gobierno del presidente Nayib Bukele, dando fin a un proyecto de casi 15 años en construcción con unos cuantos más desde su planificación. El proyecto desde sus inicios ha superado el costo de más de \$1000 millones debido a problemas de despilfarro, negligencia y corrupción. En la Figura 2 se observa la ubicación del Embalse 3 de Febrero.

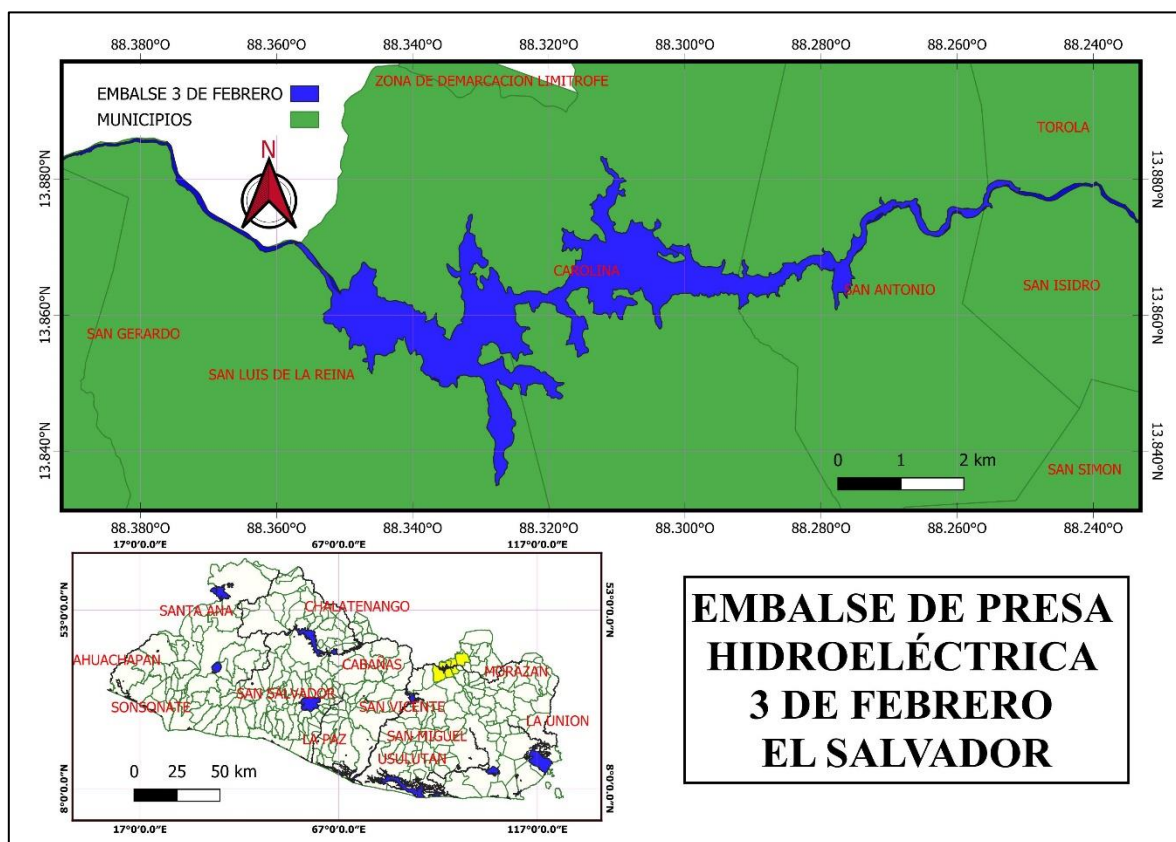


Figura 2. Ubicación del embalse y Central Hidroeléctrica 3 de Febrero.

En 2010, la construcción de la Presa Hidroeléctrica El Chaparral sufrió un serio contratiempo debido a una tormenta que afectó la zona. Este fenómeno natural provocó un deslizamiento de tierra en la montaña donde se apoyaba el lado derecho del dique. Este deslizamiento causó un movimiento de terreno significativo que resultó en daños considerables y retrasos en el proyecto, esto dicho por la empresa constructora Astaldi [4].

El evento fue un factor clave que llevó a una situación de emergencia y a una reevaluación del diseño y las condiciones del terreno, incrementando el costo del proyecto en \$108.5 millones debido a los arreglos necesarios con la empresa constructora Astaldi. Esta interrupción y los problemas técnicos asociados prolongaron la ejecución de la obra y contribuyeron a la serie de retrasos y aumentos en el presupuesto que marcaron la historia de este proyecto hasta su finalización en 2023.

La Tabla 1 muestra un resumen de aspectos técnicos de la Central Hidroeléctrica 3 de Febrero [5].

Tabla 1. Principales Características de la Central Hidroeléctrica 3 de Febrero de El Salvador

Detalle Técnico	Descripción
Ubicación	Departamento de San Miguel Norte, El Salvador
Río	Río Torola
Capacidad de Generación	67 MW
Altura de la Presa	87.5 metros
Longitud de la Presa	251.99 metros
Volumen del Embalse	17.8 millones de metros cúbicos
Superficie del Embalse	8.6 kilómetros cuadrados
Nivel máximo de embalse	153 metros sobre el nivel del mar
Nivel mínimo de embalse	212 metros sobre el nivel del mar
Capacidad de las Turbinas	33.5 MW cada una
Generador Eléctrico	2 generadores con capacidad de 36 MVA cada uno
Penstock	2 conductos de presión, 130 metros de longitud
Fecha de Inicio de Construcción	2008
Fecha de Inauguración	19 de octubre de 2023
Coste Total del Proyecto	Aproximadamente \$1000 millones
Producción Anual de Energía	232 GWh
Propietario	Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL)

Dicho proyecto es un hito cargado de incertidumbres que ha representado un desgaste económico de casi 760 millones de dólares contados hasta el 2023, viéndose aún financiada en el presupuesto de 2024 a pesar de estar inaugurada aún con pendientes, y representando un gasto administrativo extravagante para la nación [6]. En el año 2023, la generación hidroeléctrica representó aproximadamente el 15.8% de la energía producida en el país [7].

Un análisis del embalse representa relevancia para diversos sectores, destacando áreas como utilización, generación y rentabilidad del proyecto en las condiciones actuales de funcionamiento. Uno de los principales factores de interés para el estudio de estas infraestructuras será analizado a continuación mediante una descripción de los factores y las características que conlleva el registro de los niveles de embalse de las presas hidroeléctricas en el país.

Niveles de embalse de presas hidroeléctricas

Los embalses de presas hidroeléctricas son cuerpos de agua artificiales creados mediante la construcción de presas en ríos y otras corrientes de agua. Su propósito principal es almacenar agua

para generar electricidad mediante centrales hidroeléctricas. Sin embargo, los embalses también cumplen otras funciones importantes, como la gestión del suministro de agua, el control de inundaciones, el riego agrícola y la recreación.

El nivel de embalse se refiere a la altura del agua almacenada en un embalse, medida generalmente en relación con una referencia fija, como el nivel del mar. El monitoreo y la gestión del nivel del embalse son críticos para la operación eficiente de las presas hidroeléctricas y la gestión de los recursos hídricos. La variación del nivel del embalse afecta directamente la capacidad de generación de energía, la disponibilidad de agua para diferentes usos y el manejo de inundaciones [8].

El nivel del embalse de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero es un indicador crucial para la operación eficiente y sostenible de esta infraestructura en El Salvador. Mantener un nivel de embalse adecuado permite maximizar la generación de energía hidroeléctrica, asegurar el suministro de agua para usos múltiples y gestionar los riesgos de inundación, todos ellos factores vitales para el desarrollo socioeconómico y la seguridad hídrica del país.

Según la presidencia de CEL, el llenado del embalse de la presa comenzó en octubre de 2022 y la generación de energía daría inicio a finales del mismo año. Lo cual no fue así, sino hasta el segundo trimestre del año 2023 es cuando da inicio a la inyección de energía la Central Hidroeléctrica 3 de Febrero. Consultando al sitio web de la Unidad de Transacciones [7]. Se han obtenido datos del nivel de embalse del Embalse 3 de Febrero, el registro de estos datos nos permite contrastar la información que la serie de tiempo proporciona de forma gráfica y fundamentar que las correcciones necesarias que busca dar este estudio, son producto de los fenómenos climáticos que afectaron la región en esas fechas específicas [9].

La gestión del nivel del embalse de la presa antes mencionada es un proceso complejo pero esencial, que requiere un enfoque integrado y adaptativo; Sin embargo no es el único factor a tomar en cuenta para la realización de este estudio dado que se considera que las puntos dispersos y la tendencia difusa que presenta la serie de tiempo a corregir es producto de los efectos climáticos que influyen directamente en los datos que se obtienen a partir de imágenes SAR, es sumamente importante redactar un segmento que permita conocer las condiciones climáticas que enfrenta la región de estudio y una descripción de los fenómenos que se pretende son responsables de las deformaciones erráticas que presenta la serie de tiempo.

II.3. Influencia climática de El Salvador

Ubicado en la región de Centroamérica, posee un clima con temperaturas constantes, también denominado Ecuatorial húmedo [10]. Dicho clima se puede ver influenciado en la zona costera por diversas situaciones climáticas y de forma directa por huracanes, ondas tropicales o tormentas generadas dentro del océano Pacífico. Estos fenómenos climáticos afectan a la región completa en muchas ocasiones debido a su extensión geográfica bastante reducida, permitiendo así que las condiciones climáticas sean similares en la mayoría de la región.

El Salvador únicamente posee dos estaciones la temporada seca (noviembre-abril) y temporada lluviosa (mayo-octubre), en consecuencia del cambio climático a nivel global estas estaciones, no son tan precisas y representa una mayor dificultad, esto es un factor importante a considerar en este estudio debido a que un clima fluctuante, representa un mayor esfuerzo para fijar conductas o establecer patrones precisos dentro de la región y consecuentemente afecta la precisión o exactitud de una serie de tiempo basada en un área situada dentro de dicha región, considerando lo anterior se evidencia la utilidad de establecer un método que permita mitigar efectos adversos dentro del patrón

de comportamiento de una serie de tiempo; un método que nos permita obtener una serie de tiempo que establezca patrones mejor detallados para futuros estudios dentro del perímetro geográfico.

La obtención de curvas suavizadas y tendencias menos abruptas permitirá diversos usos dentro de la región a la hora de administrar y sostener áreas de cultivo o de prepararse para mitigar zonas de riesgo. Dentro de las razones principales o los fenómenos más preocupantes para la región se viven durante la temporada de huracanes dentro de la región (junio - noviembre), dado que, al estar ubicado en el caribe, El Salvador se ve influenciado por dichos fenómenos de forma cíclica cada año [11].

Es precisamente esta época del año en donde se presenta el fenómeno que este estudio pretende corregir mediante la experimentación y el desarrollo de un método. Previo a esta secuencia de pruebas se dio la tarea de investigar y delimitar el evento climático que se asume, dio origen a las variantes y tendencias erráticas de una serie de tiempo que necesita correcciones para proporcionar información viable para análisis e interpretación correcta en este y futuros estudios.

II.4. Eventos Climáticos Específicos

Con base en la información adquirida a través de los reportes de la entidad encargada de las evaluaciones e informes de eventos climatológicos dentro del país, se realizó una investigación en pro de obtener datos puntuales dentro de fechas significativas para los registros temporales evaluados dentro de la serie de tiempo generada a través de imágenes SAR en este documento [12].

Producto de esta investigación, según el informe especial número 1 [12]. Dentro del periodo de evaluación el día 28 de julio del 2023, se emite información sobre el ingreso de una onda tropical proveniente de la costa Caribe de Nicaragua con porcentaje ciclónico del 10% en las siguientes 48 horas posteriores a la emisión del informe, producto de la baja presión que este género en la región.

Haciendo uso del radar meteorológico de la región, como se observa en la Figura 3, se puede obtener evidencia gráfica de la afección de las tormentas y nubosidad en el área de interés.



Figura 3. Radar meteorológico 28 de julio 2023 [13].

Además, en busca de cuantificar los efectos de este evento en la región de estudio se consultó con el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y se obtuvo la siguiente información proveniente de pluviómetros ubicados en las zonas de Santiago de María (Usulután) y Osicala (Morazán) registrada en el transcurso del año 2023.

Los datos registrados han sido graficados, respectivamente en la Figura 4 y Figura 5.

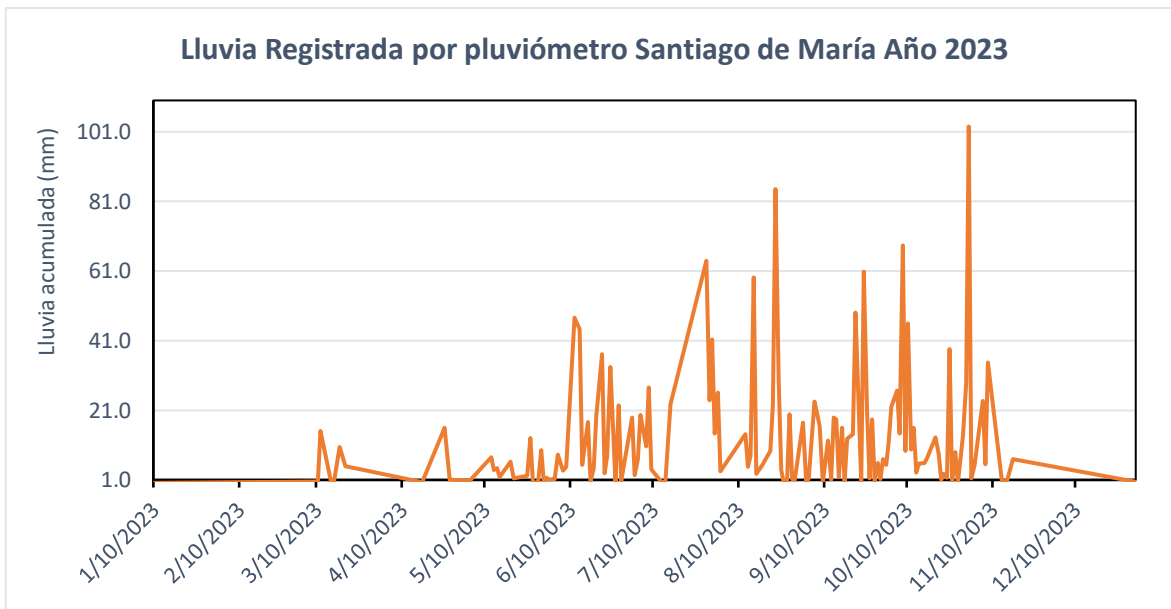


Figura 4. Lluvia en mm, registrada por pluviómetro Santiago de María.

Ambas ubicaciones geográficas circundantes de la región de estudio, siendo la primera de estas la que se encuentra a una mayor distancia situada a unos 43 km al sur del área de interés, mientras que la estación de Osicala cuenta con una distancia de alrededor de 22 km al este del punto de interés.

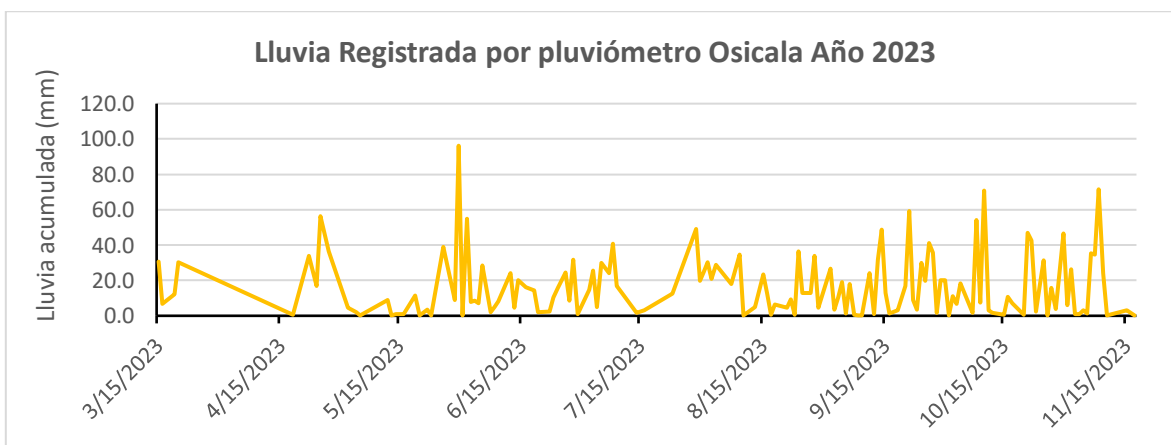


Figura 5. Lluvia en mm, registrada por pluviómetro Osicala.

La información provista por esta entidad lleva un proceso de medición diaria, las especificaciones del sistema que se utiliza para realizar esta medición no se encuentran disponible en la información pública; sin embargo, al ser datos provenientes de una institución oficial, se consideran apropiados para evidenciar la presencia de este evento en la región y verificar la implicación de la época lluviosa en la región oriental del país. Se observa que la mayor concentración de lluvia se encuentra entre los

meses de marzo y noviembre, respaldando los registros teóricos que se tienen sobre la influencia climática en El Salvador.

Siendo el municipio de Osicala el más cercano al embalse 3 de Febrero, según la Figura 5, se observa que su mayor pico registrado con 96.2 mm de lluvia fue el 30 de mayo 2023, pero para intereses de este estudio el evento a analizar como responsable de las fluctuaciones de la serie de tiempo, transcurre en la semana del 28 de julio 2023 fecha en la cual se hace reporte de la entidad, hasta el día 5 de agosto de 2023, mostrando así que existe un periodo prolongado en el cual la región presenta una situación climática adversa tal como lo evidencia el registro pluviométrico del MARN en la Figura 6, dando como resultado que el parámetro atmosférico y geográfico de la región tienda a presentar cambios que afecten la serie de tiempo, tomando en cuenta que ese es un periodo prudente para generar una captura de imagen SAR [15].

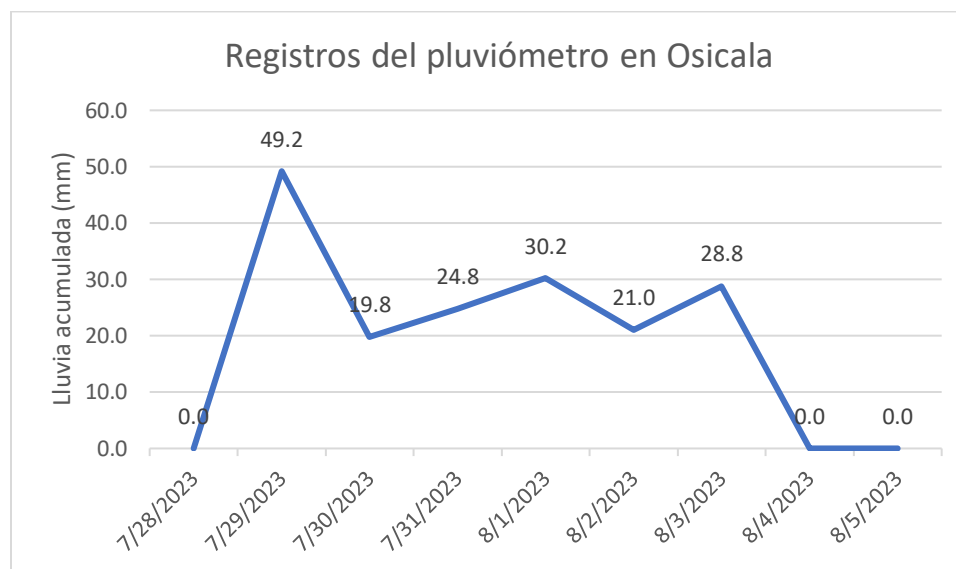


Figura 6. Milímetros de lluvia registrados por pluviómetro MARN 2023.

Habiendo delimitado de forma temporal, el evento que repercute de forma negativa en la generación de la serie de tiempo, cuantificado la magnitud del mismo en la región circundante del área de estudio y contando con el registro de datos, se procede a presentar información generalizada para la generación de series de tiempo en GEE que son de indispensable conocimiento para la interpretación, creación y reconstrucción de una serie de tiempo, siendo este nuestro objetivo principal.

II.5. Sentinel-1

Sentinel-1 es una misión de radar de apertura sintética (SAR) desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) que proporciona imágenes de alta resolución para diversas aplicaciones, incluyendo la vigilancia ambiental, el monitoreo de desastres naturales, y la gestión de recursos [14]. Una de sus características distintivas es el uso de diferentes polarizaciones de radar, específicamente las polarizaciones VV (Vertical-Vertical) y VH (Vertical-Horizontal).

Polarización VV

La polarización VV significa que la onda de radar emitida y la onda recibida están ambas polarizadas verticalmente. En términos prácticos, esto implica que la antena del radar emite pulsos de microondas con una orientación vertical y también recibe los ecos que retornan en la misma orientación vertical

[15]. Esta polarización es particularmente útil para aplicaciones como la detección de cuerpos de agua, la observación de superficies lisas, y el monitoreo de cambios en la cobertura terrestre, ya que tiende a proporcionar una buena relación señal-ruido y una alta sensibilidad a las superficies planas.

Polarización VH

La polarización VH implica que la onda de radar emitida está polarizada verticalmente, pero la onda recibida está polarizada horizontalmente. Este tipo de polarización es útil para detectar características estructurales y vegetación, ya que la dispersión cruzada (cross-polarization) puede resaltar las estructuras tridimensionales y los objetos dispersos [15]. La polarización VH es particularmente valiosa para la discriminación de tipos de vegetación y la evaluación de la biomasa, ya que las plantas y los árboles causan una dispersión múltiple que se detecta eficazmente en esta polarización.

En la Figura 7 se describe de forma general sobre de que trata, aplicaciones, usos y beneficios de la misión Sentinel-1 del Programa Copernicus.

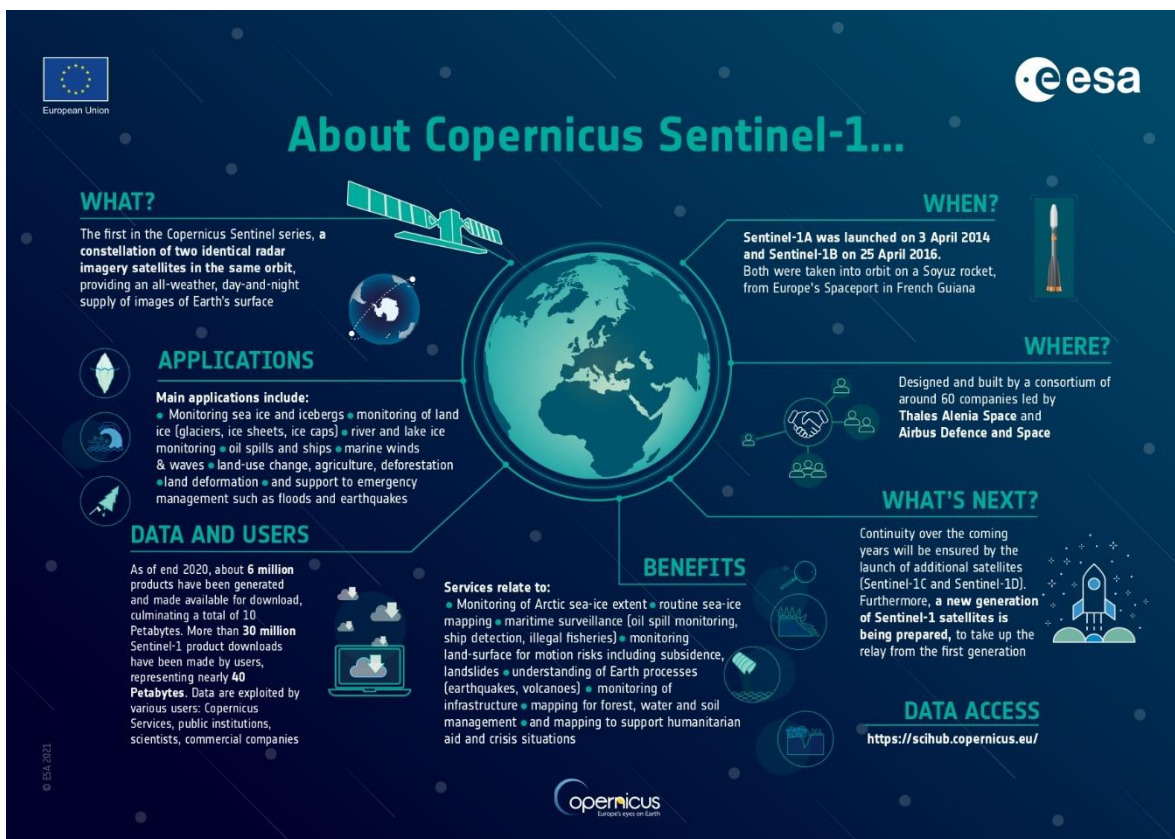


Figura 7. Infografía de misión Sentinel-1 [16].

Bandas de Frecuencia

Sentinel-1 opera en la banda C, que tiene una longitud de onda de aproximadamente 5.6 centímetros. Las imágenes SAR obtenidas en esta banda son sensibles a la humedad del suelo y a la estructura de la vegetación, entre otros factores [17]. La banda C es una elección adecuada para aplicaciones como la monitorización de la deformación del terreno, la cartografía de inundaciones y el seguimiento de los cambios en el uso del suelo.

Decibelios (dB) en imágenes de Google Earth Engine

Habitualmente los dB se implementan para medir intensidad ya sea a nivel de radar o de filtros con sus respectivas respuestas en frecuencia, en el desarrollo de esta investigación la unidad de dB implementa como la unidad de intensidad con la que se produce el coeficiente de retrodispersión de la señal del sistema SAR.

El coeficiente de retrodispersión a nivel de imágenes SAR y la teledetección para la cual se implementan en este estudio, se refiere a la potencia con la cual regresa la señal radar al receptor, luego de haber sido reflejada por superficies [18]. Siendo importante para la investigación, considerando que el tipo de superficie afecta directamente al coeficiente de retrodispersión.

Para el caso de estudio esta superficie reflectante será el agua que en los análisis de coeficientes de retrodispersión se presenta en valores bajos rondando los -20 dB, debido a que se considera una superficie lisa. Haciendo uso de esta característica procede a considerar aquellos pixeles que tengan los valores más bajos de intensidad como pixeles que representan el agua [19].

Para presentar de una forma óptima la clasificación y comparación de las superficies realizadas en este estudio y determinar aquellas que representan agua dentro de las imágenes evaluadas es que se seleccionan los dB como las unidades de medida más apropiadas para este estudio. Dado que las diferencias de intensidades son mucho más fáciles de interpretar a nivel de dB.

Teniendo clara la unidad de medida bajo la cual se filtrarán las imágenes, el uso y la importancia que esta tiene a nivel del estudio, se pretende sentar la base teórica de una variable igualmente indispensable en esta investigación, como lo son las órbitas disponibles para la obtención de imágenes a través de Sentinel 1.

Influencia de la Órbita del Satélite

La órbita de Sentinel-1, es una órbita polar sincrónica al sol, lo que significa que el satélite pasa sobre la misma área de la Tierra a la misma hora local en cada ciclo. Esta consistencia temporal es crucial para la detección de cambios a lo largo del tiempo en el cual se propone hacer la investigación. Sentinel-1 sigue una órbita descendente (de norte a sur) y ascendente (de sur a norte), permitiendo obtener datos en diferentes geometrías de iluminación.

En modo IW, que es el modo predeterminado para el monitoreo terrestre, el satélite puede cubrir una franja de 250 km de ancho por aproximadamente 10,000 km de longitud (la circunferencia terrestre es de aproximadamente 40,075 km, por lo que el satélite cubre alrededor de una cuarta parte de la circunferencia en una órbita).

Sentinel-1 recoge un gran número de imágenes en cada órbita, la frecuencia con la que se obtiene en la órbita ascendente es de 12 días ya que el Sentinel 1-A y Sentinel 1-B funcionan en conjunto, en cambio, cuando la órbita se encuentra en descendente solamente se obtienen las imágenes tomadas por uno de los satélites. La frecuencia de adquisición y la cantidad exacta de imágenes dependen de las prioridades de observación y los modos de operación. Con ambos satélites operativos, la revisita de cada área de interés es de 6 días y con el funcionamiento de uno es de 12 días, lo que permite un monitoreo frecuente y detallado de la superficie terrestre [15].

En la Tabla 2 se detallan algunos datos técnicos del Sentinel -1.

Tabla 2. Resumen Datos técnicos Sentinel-1.

Característica	Detalle
Nombre	Sentinel-1
Componentes	Sentinel-1A, Sentinel-1B
Lanzamiento	Sentinel-1A: 3 de abril de 2014, Sentinel-1B: 25 de abril de 2016
Instrumento Principal	Radar de Apertura Sintética (SAR) de banda C
Modos de Operación SAR	Stripmap (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra-Wide Swath (EW), Wave Mode (WV)
Resolución Espacial	Stripmap: Hasta 5 m, IW: 5-20 m, EW: 20-40 m
Ancho de Franja	Stripmap: 80 km, IW: 250 km, EW: 400 km
Frecuencia de Radar	5.405 GHz (banda C)
Órbita	Polar sincrónica al sol
Altitud Orbital	693 km
Periodo Orbital	98.6 minutos
Repetición de Ciclo	12 días (1 satélite), 6 días (2 satélites)
Aplicaciones Principales	Monitoreo ambiental, gestión de emergencias, vigilancia marítima, geodesia y cartografía

La obtención de imágenes en Google Earth Engine y el análisis de datos satelitales pueden verse afectados por la órbita del satélite, específicamente si se encuentra en una órbita ascendente o descendente. Estos cambios pueden causar variaciones en la calidad y la precisión de las imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) y, por ende, en la detección de píxeles de agua.

La combinación de las órbitas y las diferentes polarizaciones permite a los usuarios observar y analizar una amplia variedad de fenómenos geofísicos y biológicos. La capacidad de Sentinel-1 para capturar datos en múltiples polarizaciones y en diferentes configuraciones orbitales lo hace una herramienta extremadamente versátil para el monitoreo ambiental y la gestión de desastres.

En el enfoque de este estudio se pretende implementar una serie de tiempo afectada por fenómenos climáticos que ocurren durante el periodo de octubre de 2022 a mayo de 2024 en la región del embalse 3 de Febrero. Con el estudio de esta región se obtendrá información que podría establecer un comportamiento que nos permita constatar la información proveída de las instituciones sobre ciclos de llenado y la entrada en funcionamiento de la presa 3 de Febrero [7]. Además, el estudio se centra en anomalías sin justificación dentro de la serie de tiempo que se sospecha es debido a la ocurrencia de un fenómeno climático que afectó a la región en ese momento específico. Para poder ejemplificar eso, se hará uso de imágenes SAR de la colección 'COPERNICUS/S1_GRD' la cual nos permite generar una serie de tiempo que visualiza y evidencia la anomalía en cuestión, entre otros efectos que un mal clima podría tener sobre el uso de imágenes SAR para el diseño de series de tiempo.

Las diferencias en la obtención de imágenes en Google Earth Engine debido a la órbita del satélite (ascendente o descendente) se deben principalmente a variaciones en el ángulo de incidencia, la geometría de visión y las condiciones atmosféricas. Para obtener resultados precisos y consistentes, es crucial filtrar, analizar y ajustar los parámetros de detección de agua específicamente para cada tipo de órbita y combinar los resultados adecuadamente. Esto mejora la precisión del análisis y proporciona una comprensión más completa de los cuerpos de agua en áreas de interés como el embalse de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero en El Salvador.

En la Figura 8, se observa la revisita y cobertura que tiene el Sentinel-1, dando información sobre la cobertura y el paso de polarización.

Sentinel-1 Constellation Observation Scenario: Revisit & Coverage Frequency

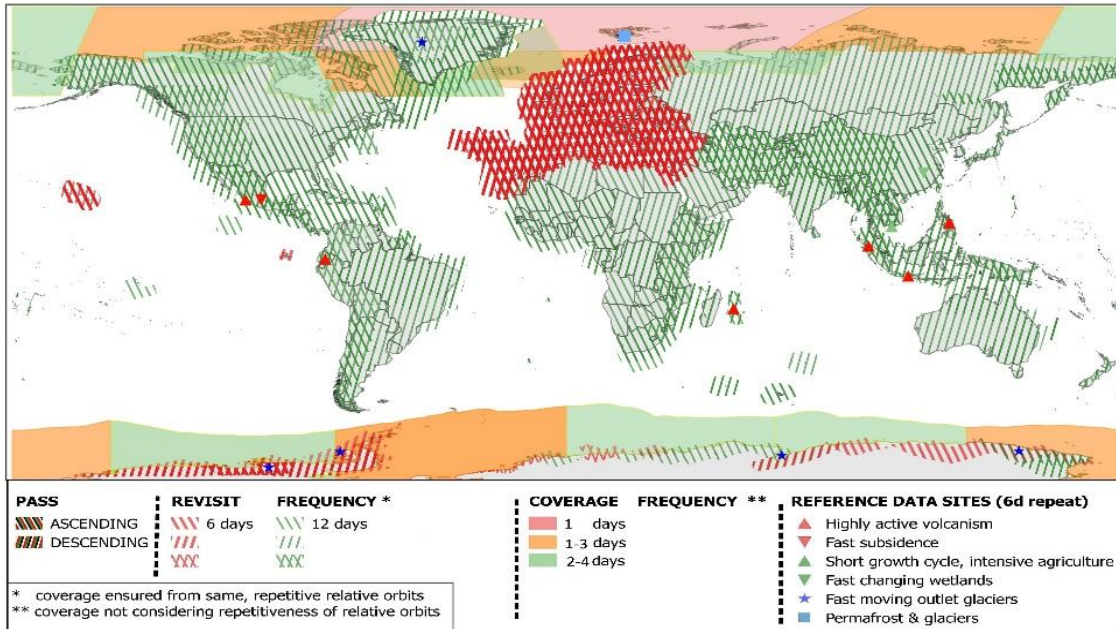


Figura 8. Frecuencia de revisita y cobertura de la constelación de Sentinel-1 [20].

Teniendo una descripción de las variantes, características y productos disponibles a través de Sentinel-1, se hace el planteamiento de una descripción en forma técnica y sustancial sobre el satélite Sentinel 2 el cual será importante en la prueba que requiere la obtención de imágenes ópticas para el desarrollo de la investigación.

II.6. Sentinel-2

El Sentinel-2 es una misión de observación de la Tierra del Programa Copernicus que adquiere imágenes ópticas de alta resolución espacial (de 10 m a 60 m) sobre la tierra y las aguas costeras. La misión consta de dos satélites, Sentinel-2A y Sentinel-2B, que se encuentran en órbita polar y están posicionados en la misma órbita heliosincrónica con una diferencia de fase de 180°. Su objetivo principal es monitorear los cambios en las condiciones de la superficie terrestre [21].

Las imágenes ópticas del Sentinel-2 son especialmente útiles debido a su capacidad para capturar una amplia gama de longitudes de onda, lo que permite la identificación de diferentes tipos de cobertura terrestre, como vegetación, agua y suelo desnudo, con gran detalle. Esto hace que estas imágenes sean ideales para el seguimiento de cambios en el uso del suelo, la detección de incendios forestales, la evaluación de la salud de los cultivos y mucho más.

Las bandas espectrales corresponden a rangos específicos de longitudes de onda que transmiten información sobre características particulares. Por ejemplo, en imágenes multispectrales, la banda de infrarrojo cercano (NIR) se utiliza para extraer información sobre la vegetación. El Sentinel-2 opera en 13 bandas espectrales que cubren un amplio rango de longitudes de onda, desde el visible hasta el infrarrojo cercano y medio. Las Bandas se detallan a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Bandas de Sentinel-2.

Banda	Longitud de Onda (nm)	Resolución Espacial (m)
B1	443.9	60
B2	496.6	10
B3	560	10
B4	664.5	10
B5	704	20
B6	740.5	20
B7	782	20
B8	832.8	10
B8A	864.7	20
B9	945	60
B10	1373.5	60 o 20
B11	1613.7	20
B12	2202.4	20

Las imágenes ópticas del Sentinel-2 se capturan utilizando un conjunto de sensores ópticos a bordo del satélite. Estos sensores registran la luz solar reflejada por la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. En la Tabla 4 se presenta una descripción general de las características de las imágenes ópticas del Sentinel-2:

Tabla 4. Resumen de características Sentinel-2.

Característica	Descripción
Tipo de Sensor	Sensores ópticos de barrido multiespectral (MSI - Multispectral Instrument)
Resolución Espacial	Varía según la banda: 10 metros (bandas B2, B3, B4, B8), 20 metros (bandas B5, B6, B7, B8A, B11, B12), 60 metros (bandas B1, B9, B10)
Bandas Espectrales	13 bandas desde el visible hasta el infrarrojo cercano y medio
Longitudes de Onda (nm)	Varían según la banda, desde aproximadamente 443.9 nm hasta 2202.4 nm
Modos de Adquisición	Modo de Observación Nominal (NOM), Modo de Alta Resolución (HRM)
Frecuencia de Revisita	Globalmente, cada 5 días
Cobertura Espacial	Global
Proyección de Coordenadas	Universal Transversal de Mercator (UTM)
Niveles de Procesamiento	Datos de Nivel 1C (correcciones radiométricas y geométricas), Datos de Nivel 2A (incluye corrección atmosférica)

Índice de agua Normalizado

El Índice de Agua Normalizado Diferencial (NDWI, por sus siglas en inglés) es utilizado para detectar la presencia y cambios en el contenido de agua en superficies terrestres utilizando datos de satélites. Es específicamente útil para imágenes obtenidas por Sentinel-2, un sistema de satélites desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) que captura datos en múltiples bandas espectrales [22].

El NDWI se calcula utilizando la fórmula:

$$NDWI = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)}$$

Donde:

- NIR (Near Infrared) es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.
- SWIR (Shortwave Infrared) es la reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta.

Para los datos del Sentinel-2:

$$NDWI = \frac{(Band\ 3-Band\ 8)}{(Band\ 3+Band\ 8)}$$

El NDWI es especialmente sensible a los cambios en la cantidad de agua presente en una escena, ya que el agua absorbe la luz en la banda del infrarrojo cercano, pero refleja la luz en la banda del infrarrojo de onda corta. Por lo tanto, zonas con mayor contenido de agua tendrán valores de NDWI más altos, mientras que áreas sin agua o con menor contenido mostrarán valores más bajos.

Según se describe en la Tabla 5, el resultado de la fórmula son valores positivos para los elementos de agua y negativos (o cero) para el suelo y la vegetación terrestre.

Tabla 5. Interpretación de valores NDWI [22].

Rangos NDWI	
0.2 hasta 1.0	Superficie de agua
0.0 hasta 0.2	Inundación, humedad
-0.3 hasta 0.0	Sequía moderada, superficie sin agua
-1.0 hasta -0.3	Sequía, superficie sin agua

En aplicaciones prácticas, el NDWI se utiliza para monitorear cuerpos de agua, la humedad del suelo, ecosistemas acuáticos y cambios en la cobertura vegetal, entre otros usos. La capacidad de Sentinel-2 para captar datos en múltiples bandas espectrales permite una evaluación detallada y precisa de estos parámetros, facilitando el monitoreo ambiental y la gestión de recursos naturales a escala global.

Una vez detallados los satélites que brindan las imágenes que son la materia prima para este estudio, se pretende analizar, interpretar y presentar de forma teórica los usos y las condiciones necesarias para crear y ejecutar una serie de tiempo a través de la plataforma Google Earth Engine.

II.7. Series de tiempo con GEE

La implementación de Google Earth Engine (GEE) en el análisis de inundaciones y niveles de agua representa un avance en la capacidad de monitoreo y evaluación de eventos hidro climáticos. Mediante la infraestructura robusta de GEE, que facilita el acceso a servidores con una capacidad de procesamiento considerable, los análisis en paralelo pueden llevarse a cabo con eficiencia, permitiendo una respuesta más rápida y precisa a fenómenos como inundaciones [23].

La obtención de datos almacenado en la plataforma desempeña un papel crucial en este contexto. La plataforma recopila y actualiza constantemente imágenes de diversos sensores, como Landsat y Sentinel, generando un extenso catálogo de datos geospaciales. Esta abundancia de información facilita la detección y seguimiento de cambios en los niveles de agua, así como la identificación de áreas propensas a inundaciones. La consulta de estas bases de datos a través de criterios como calidad, localización y fechas se convierte en una herramienta valiosa para el análisis de eventos hidrológicos.

Google Earth Engine permite crear gráficas, para nuestro estudio series de tiempo, para visualizar un patrón en un lapso de tiempo determinado, estableciendo cierto comportamiento, tendencias y recurrencia de fenómenos ocurridos en regiones geográficas específicas, un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 9. La implementación de esta herramienta brinda la oportunidad de determinar causas o fijar patrones de comportamiento, considerar la propensión de ciertas regiones o efectos post eventos climáticos como inundaciones, o como es el caso de este ejemplar, evidenciar eventos relevantes a nivel atmosférico a partir de la comparación de los datos obtenidos de una serie temporal.

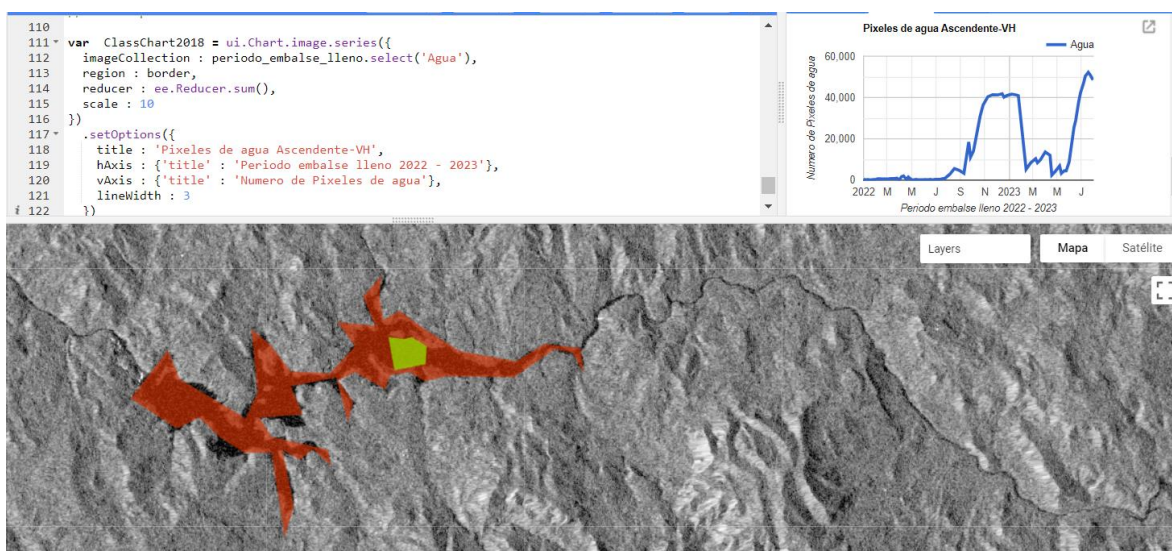


Figura 9. Ejemplo de obtención de una serie de tiempo.

El agua, al tener una superficie generalmente lisa, refleja las ondas de radar de manera especular, lo que provoca que la mayoría de la señal se aleje del sensor. Como resultado, las áreas de agua abierta suelen aparecer oscuras en las imágenes SAR, ya que la señal no regresa al radar.

Las imágenes SAR, hacen uso de un umbral de retrodispersión para distinguir los píxeles de agua de otros tipos de superficie. Los píxeles con valores de retrodispersión por debajo o sobre cierto umbral se consideran píxeles de agua.

El análisis de series de tiempo a través de la clasificación de píxeles de agua proporciona información valiosa para el registro del comportamiento del embalse de la Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero en El Salvador, permite monitorear cambios, optimizar algunas operaciones, detectar eventos extremos como caídas en los niveles o vaciados de emergencia.

Los picos de caída abruptos en las series de tiempo para el volumen de embalses o cuerpo de aguas pueden deberse a múltiples factores, desde errores en los datos satelitales hasta cambios reales en el embalse. Condiciones atmosféricas adversas, como nubes densas, lluvia intensa o neblina, pueden afectar la calidad de las imágenes satelitales y resultar en datos inexactos.

Estableciendo las bases estructurales, las variables y los fenómenos que podrían afectar una serie de tiempo, es importante dar a conocer la forma en la que nuestro estudio hace el planteamiento para medir los registros que la serie de tiempo nos brinda, dado que el filtrado de imágenes para selección y la clasificación está basado en la intensidad de píxeles medida en dB, es importante destacar que las series de tiempo que nuestro estudio presenta, da el registro del embalse en base al área de agua, esta área calculada de su equivalente en píxeles.

II.8. Píxeles de agua como área de agua

Los "píxeles de agua" se refieren a los píxeles identificados en imágenes satelitales que han sido clasificados como cuerpos de agua mediante análisis remoto, especialmente en el contexto de datos obtenidos por Sentinel-1, que utiliza el radar de apertura sintética (SAR). En estas imágenes, los píxeles de agua se distinguen por su baja retrodispersión, debido a que la señal en agua abierta no vuelve al radar. Las superficies de agua, particularmente las calmas, actúan como espejos que reflejan la señal del radar lejos del satélite, resultando en valores oscuros de retrodispersión. Esta característica se contrasta con superficies terrestres rugosas o vegetación, que generan mayor ruido en la señal [15]

La conversión de píxeles de agua a metros cuadrados se realiza considerando la resolución espacial típica de Sentinel-1, que es de 10 metros por píxel. Por lo tanto, cada píxel en estas imágenes representa un área de 100 metros cuadrados (10 metros x 10 metros). Para calcular el área total de agua en kilómetros cuadrados, se utiliza `ee.Image.pixelArea()`, una función de Google Earth Engine que asigna a cada píxel su correspondiente área física en metros cuadrados. Posteriormente, dividiendo cada valor de píxel por 1,000,000 (usando `.divide(1e6)`), se convierte el área de metros cuadrados a kilómetros cuadrados. Esto simplifica la interpretación de grandes extensiones de agua en términos más manejables y facilita el análisis de series temporales para monitoreo ambiental y gestión de recursos hídricos [23].

```
30 //Clasificacion
31 var dataset = dataset.map(clasificAgua);
32 //series de tiempo (ST)
33 var ST = ui.Chart.image.series({imageCollection : dataset.select('Agua'),
34   region : roi,
35   reducer : ee.Reducer.sum(),
36   scale:10 //
37 })
```

Figura 10. Parámetro `scale` para definir resolución de metros por píxel.

El parámetro `scale` en Earth Engine juega un papel crucial al definir la resolución espacial de los píxeles utilizados en las operaciones de análisis. En el contexto de Sentinel-1, este parámetro influye cómo se interpretan los datos de radar, determinados por el modo de adquisición (como el modo IW) y la polarización utilizada. La capacidad de establecer esta escala permite ajustar la sensibilidad y la precisión del análisis según las necesidades específicas del estudio, garantizando resultados más precisos y aplicables a diferentes escenarios ambientales y climáticos.

Este enfoque beneficia especialmente la visualización y análisis de series de tiempo en GEE, ya que permite generar representaciones visuales claras y comparables de la expansión o contracción del embalse 3 de Febrero. Utilizando datos reales de área y volumen, se pueden crear gráficos y modelos que hagan una comparativa de cómo han cambiado las características del agua con el tiempo, facilitando la identificación de tendencias, patrones estacionales y anomalías.

II.9. Resumen de Capítulo.

La Presa Hidroeléctrica 3 de Febrero en El Salvador comenzó su construcción en 2008 durante la presidencia de Elías Antonio Saca y fue inaugurada bajo el nombre "Central Hidroeléctrica 3 de Febrero" durante el mandato del presidente Nayib Bukele. Este proyecto, que inicialmente tenía un presupuesto estimado, experimentó incrementos significativos superando los \$1000 millones debido a problemas de negligencia y corrupción a lo largo de sus casi 15 años de desarrollo, desde la planificación hasta su finalización en 2023.

El clima de El Salvador, caracterizado como tropical ecuatorial húmedo, se ve influenciado por dos estaciones principales: la seca, que abarca de noviembre a abril, y la lluviosa, que ocurre entre mayo y octubre. Este entorno climático es susceptible a fenómenos naturales como huracanes, ondas tropicales y tormentas del Pacífico, que afectan significativamente las condiciones climáticas y la gestión de recursos hídricos en la región.

Entre los eventos climáticos específicos documentados, se destaca la incidencia de una onda tropical el 28 de julio de 2023, que provocó una situación adversa en la región. Esta onda tropical fue monitoreada a través de datos de radar meteorológico y registros de lluvia, destacando la importancia de la tecnología para la evaluación y respuesta ante eventos climáticos extremos.

La importancia de este evento en específico se evidenciará en el Capítulo de Resultados, de este documento, en el cual se pretende demostrar los efectos negativos en las series de tiempo generadas a partir de imágenes SAR, así como el producto concebido por medio de la utilización del método desarrollado en esta investigación para la reducción de puntos dispersos dentro de la gráfica de la serie de tiempo generada a partir de los datos obtenidos de las imágenes SAR en un periodo comprendido entre junio de 2022 hasta abril de 2024, donde se encuentra la fecha de este evento climatológico puntual.

El uso de Google Earth Engine (GEE) para analizar inundaciones y niveles de agua representa un avance significativo en el monitoreo de eventos hidroclimáticos. GEE facilita el acceso eficiente a datos satelitales como Landsat y Sentinel, permitiendo análisis detallados y la creación de series de tiempo para visualizar patrones y tendencias a lo largo del tiempo. Este enfoque es crucial para detectar cambios en los niveles de agua y áreas propensas a inundaciones, optimizando así la respuesta y la planificación ambiental. Las series de tiempo en GEE permiten identificar patrones y tendencias hidrológicas, y las imágenes SAR, que utilizan umbrales de retrodispersión, ayudan a monitorear embalses y detectar eventos extremos.

Los "píxeles de agua" en imágenes satelitales, especialmente de Sentinel-1, son identificados por su baja retrodispersión en datos SAR, reflejando la señal del radar de manera especular. Cada píxel representa 100 metros cuadrados, y Google Earth Engine convierte estas áreas a kilómetros cuadrados para facilitar el análisis. El parámetro "scale" en GEE define la resolución espacial, influenciando la precisión del análisis. Este enfoque permite generar series de tiempo que visualizan cambios en cuerpos de agua como el embalse 3 de Febrero, ayudando a identificar tendencias y anomalías en la gestión de recursos hídricos.

Sentinel-1, una misión de radar de apertura sintética de la Agencia Espacial Europea (ESA), desempeña un papel clave en este contexto. Operando en polarizaciones VV y VH en la banda C, Sentinel-1 detecta cuerpos de agua con precisión y es sensible a condiciones climáticas adversas. La consistencia temporal de su órbita polar sincrónica al sol permite un monitoreo frecuente y detallado de la superficie terrestre, esencial para la gestión de desastres naturales y la planificación de recursos.

Por otro lado, Sentinel-2, otra misión del Programa Copernicus, utiliza imágenes ópticas para monitorear cambios en la cobertura terrestre con alta resolución espacial. Sus 13 bandas espectrales capturan información detallada sobre vegetación, suelos y cuerpos de agua, siendo ideal para evaluar la salud de los cultivos y la detección de incendios forestales.

En el siguiente Capítulo se tomará como base la información teórica anteriormente analizada y se dará uso para el desarrollo de pruebas y métodos que puedan mitigar los efectos que los fenómenos climáticos ocasionan en las series tiempo, esto se realizara primeramente definiendo en la plataforma de CEE el área de interés, el embalse de la Presa 3 de Febrero, se hará la limitación del periodo de tiempo en el código y se aplicaran diversos cambios o pruebas, ya sean de polarización, órbitas y umbrales. Se buscará tener el algoritmo más acertado que pueda producir una serie de tiempo que tenga la menor caída posible, debido a los efectos climáticos.

CAPITULO III. DESARROLLO

III.1. Delimitación del área de interés ROI

Para generar cualquier serie de tiempo o análisis a través de GEE, existen diversos métodos para establecer perímetros o regiones, en este estudio se emplean dos: trazar un polígono o dibujar un rectángulo y fijar el área a base de coordenadas específicas de la región de interés.

En la realización de este trabajo de investigación, se implementó el método de coordenadas específicas dentro del código primario. Siendo un ejemplo de esto las siguientes coordenadas escritas para seleccionar el área de interés, Figura 11.

```
//Coordenadas expresas, "EL CHAPARRAL"  
var roi = ee.Geometry.Polygon(  
  [[ [-88.35640447108402, 13.839280572702501],  
    [-88.28044431178226, 13.839280572702501],  
    [-88.28044431178226, 13.880279776604954],  
    [-88.35640447108402, 13.880279776604954]]], null, false)
```

Figura 11. Coordenadas de la Presa 3 de Febrero ROI.

A través de este método, se escriben en el código 4 coordenadas que fijan 4 puntos dentro del mapa, marcando la región de interés para el análisis. Cada coordenada par hace referencia a un punto, resultando un rectángulo. Así es como se estableció el perímetro de análisis, considerando que lo que se utiliza para la serie de tiempo son los datos contenidos dentro de las imágenes de la colección, capturadas sobre la región de interés. Este método es totalmente viable para su uso en este capítulo del trabajo; aporta y cumple con los requerimientos de extracción de imágenes SAR de esa región.

El siguiente método de selección usado en el desarrollo de esta investigación, pretende obtener mayor precisión del área de interés, a través de un polígono conformado por una serie de puntos colocados da tal forma que puedan formar una figura similar al área anegada dentro de la región del embalse.

III.2. Dibujar un polígono

El proceso de análisis y selección de umbral dentro de la región de interés hace uso de otra herramienta que nos brinda GEE para el análisis de áreas, optando por la que nos permite dibujar un polígono con la cantidad de puntos necesarios para realizar un trazo basado en la forma y tamaño del área de interés, tomando como referencia una imagen promediada de la colección, que permite un mejor ajuste del polígono. Considerando que el proceso para la selección de umbral requiere un análisis íntegro para fijar la diferencia entre píxeles y clasificarlos.

El área establecida por el polígono dentro de la interfaz es la referencia del área de interés para esta fase del estudio; para una selección más precisa, este polígono se traza en base a una imagen SAR promedio del periodo de estudio, en las coordenadas geográficas de la represa.

El uso de esta imagen satelital para generar el polígono nos permite obtener un margen mayor de precisión sobre el área que ocupa el embalse, permitiendo que los datos que se obtienen a través del

código para un umbral sean más precisos, mejorando los resultados en la posterior creación de una función que permita clasificar los píxeles de agua y los que no son agua en la región de estudio.

Habiendo explicado los dos métodos de selección de área usados en este estudio y dejando claras las ventajas, recursos y forma de emplear cada proceso. Se procede a evidenciar de forma visual la influencia que tienen las polarizaciones y órbitas en las imágenes SAR, dado que se usarán posteriormente para experimentar en la reconstrucción de la serie de tiempo.

III.3. Influencia de las órbitas en la generación de series de tiempo

El proceso de generación de una serie de tiempo en GEE requirió de la utilización de imágenes SAR y los datos que estas brindan, a través de los píxeles que la componen. Para ello se estructura una función que define y clasifica los píxeles de agua.

Antes de recorrer la función, los usos y las implicaciones que esta tiene en el proceso de generación de una serie de tiempo, es importante destacar aspectos o datos indispensables a considerar a la hora de usar una imagen SAR como materia prima para series temporales.

Esta investigación hace énfasis en el uso de imágenes SAR como la base de datos; sin embargo, no se refiere a la visualización de esta. Es por ello por lo que no se realizó un enfoque o descripción sobre la mejora o desarrollo en la presentación o visualización de la imagen SAR, pero en este apartado del documento, considerando que la imagen SAR es el cimiento de la investigación, se visualizan los efectos, cambios o alteraciones que genera modificar las variables de interés y que repercuten de manera gráfica en la forma que se visualiza una imagen SAR.

Las imágenes presentadas están situadas dentro de la región de interés, brindando así una perspectiva espacial del estado de la Presa 3 de Febrero.

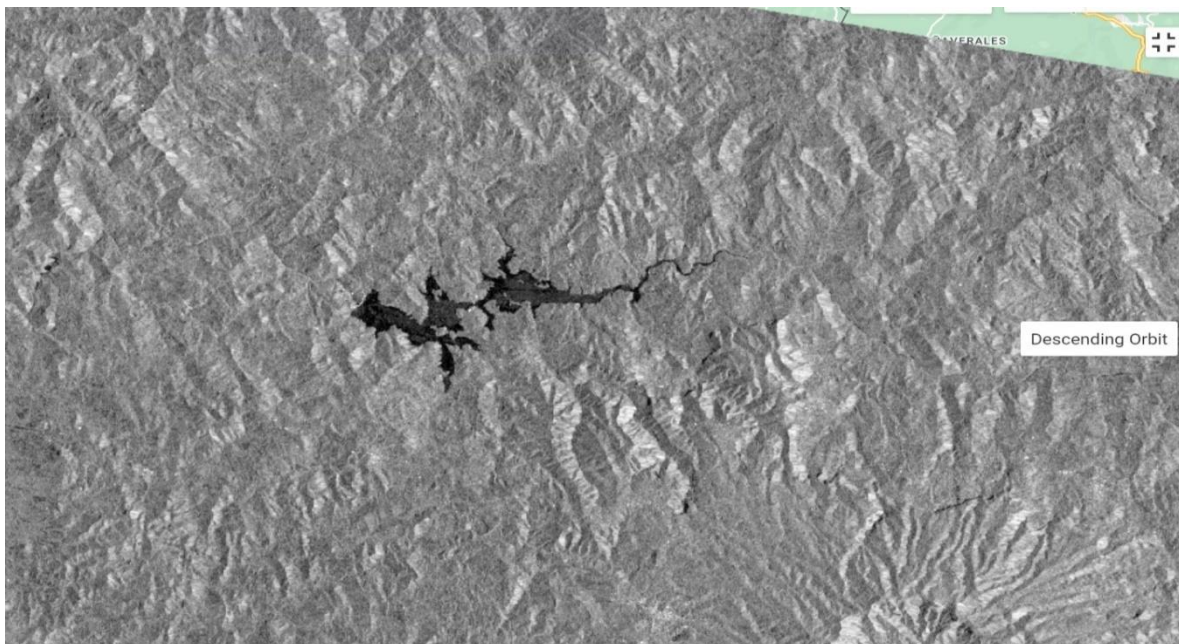


Figura 12. Imagen SAR 20/10/22 del embalse 3 de Febrero, Órbita Descendente, polarización VV.

La Figura 12 es capturada en órbita descendente y nos permite visualizar el área anegada de agua dentro del embalse de la Presa 3 de Febrero. Es apreciable la presencia de ciertas sombras grises que hacen un tanto más difícil la clasificación de píxeles oscuros en la mayor parte de la región de interés.

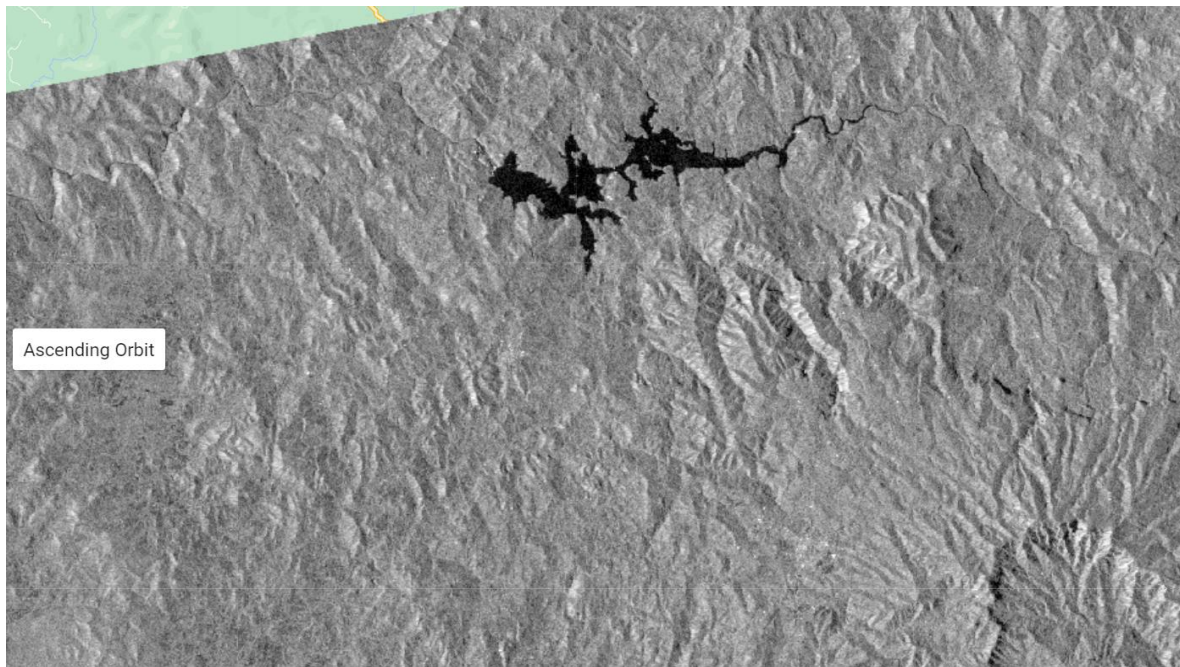


Figura 13. Imagen SAR 04/10/22, del embalse 3 de Febrero, Órbita Ascendente, polarización VV.

La visualización de la Figura 13 nos permite apreciar cambios significativos en la calidad de imagen y las diferencias en la tonalidad que posee cada una de ellas. Estos cambios son producto esencialmente de la reducción del ángulo de incidencia en la superficie del área de estudio, considerando que un ángulo de incidencia más pequeño da como resultado una retrodispersión más alta, generando imagen mucho más clara. Este cambio también repercute en los datos contenidos en la imagen, los cuales son usados para graficar las series de tiempo a través de imágenes SAR.

Este ejercicio permite comprobar la magnitud de la influencia de una órbita en los datos de una imagen SAR. Plantea la base para implementar y hacer modificaciones significativas dentro del código principal [24]; tomando en cuenta que el código utiliza únicamente los datos contenidos en las imágenes, sin presentar visualizaciones de la imagen SAR al usuario, se considera pertinente ejemplificar cambios dentro del método que serán imperceptibles, pero de gran influencia.

Considerando que la siguiente variable de interés para este estudio es la polarización que mejores resultados arroja al realizar una serie de tiempo, se pretende visualizar los cambios que las polarizaciones VH y VV representan en una imagen SAR.

III.4. Influencia de las polarizaciones en las imágenes SAR

Habiendo evidenciado los efectos de un cambio de órbita en una imagen SAR, se desarrolla el siguiente ejemplo que muestra una visualización de la influencia que tienen las polarizaciones VV y VH. Dado que este es un parámetro de suma importancia en la generación de series de tiempo, ya que al igual que la órbita, un cambio en la selección de polarización, repercute directamente en los datos, proporcionando resultados con menos utilidad técnica o una alteración de resultados.

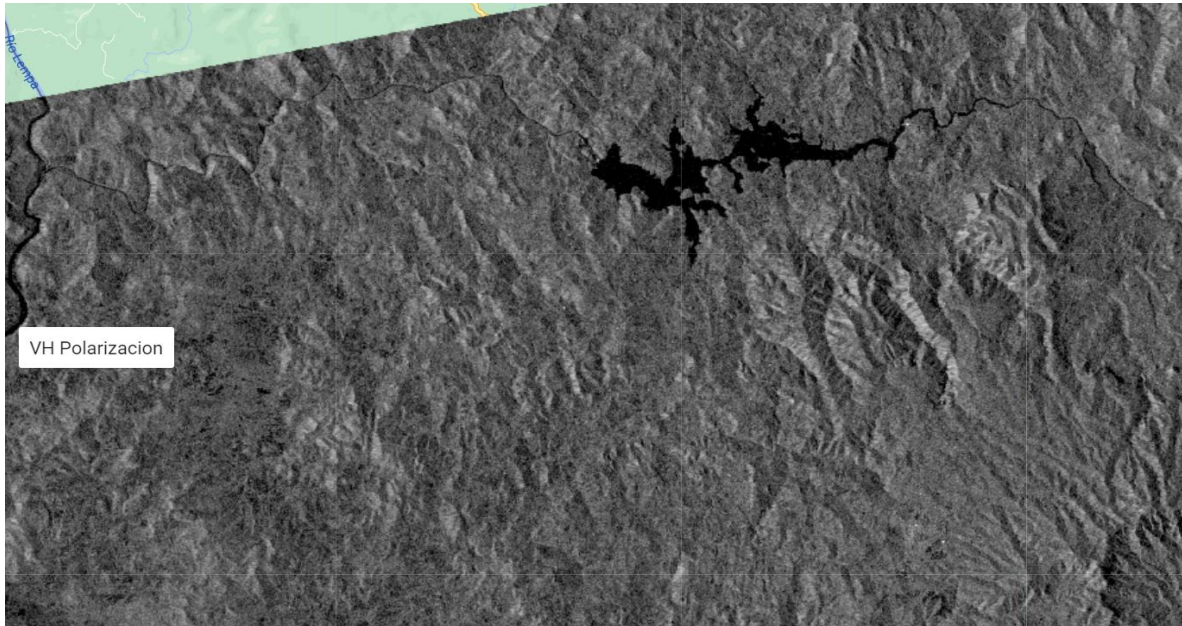


Figura 14. Imagen SAR 20/10/22, del embalse 3 de Febrero polarización VH.

La Figura 14, es mostrada con polarización VH nos brinda la clara percepción de oscurecer la imagen respecto a su homónima en polarización VV, Figura 14. Esto es una pauta para considerar y justificar que un umbral en VH llegaría presentar valores menores que un umbral en VV.

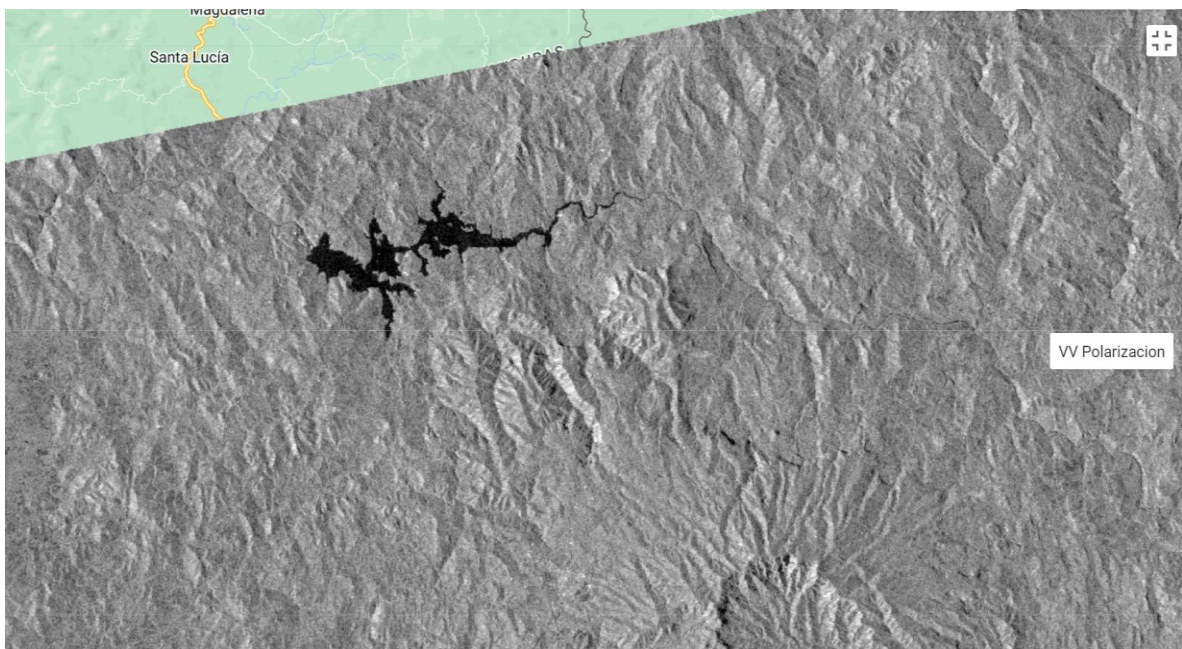


Figura 15. Imagen SAR 20/10/22, embalse 3 de Febrero polarización VV.

Como evidencia la Figura 15, estas imágenes o la colección de estas en polarización VV, presentan una clara diferencia en la atenuación o colores perceptibles en cada caso. Considerando esta variable, se puede notar el evidente cambio en la tonalidad de la imagen en polarización VV, respecto a la visualización de la imagen bajo las mismas condiciones, pero con una polarización VH.

Justificando que la polarización repercute de forma significativa en la visualización de una misma colección con parámetros similares y considerando que estos cambios o variaciones destacan por el efecto que generan a nivel visual, es importante considerar que estos cambios o diferencias se ven igualmente reflejadas a nivel de datos, tomando en cuenta que estos datos son los que se implementan para la generación de una serie de tiempo a partir de imágenes SAR, se puede prever que una polarización diferente generaría como resultado una serie de tiempo con características diferentes.

Es importante resaltar que ambas imágenes han sido mostradas en órbita ascendente, las imágenes con las mismas polarizaciones presentarán resultados diferentes, si en su lugar se plantean obtener los datos a través de una órbita descendente [Ver Anexo 4].

Con base a los resultados obtenidos a través de la visualización de imágenes SAR, contrastando las órbitas y polarizaciones, así como las combinaciones posibles entre ellas, y ejemplificando de forma visual los cambios que generan cada una. Este estudio pretende presentar la clasificación de píxeles de cada imagen para tener una base matemática para el proceso de corrección de la serie de tiempo.

III.5. Clasificación de píxeles

El proceso de clasificación de píxeles dentro del trabajo de investigación es una parte esencial para determinar lo que llamamos umbral de selección, este umbral se encarga de fijar un filtro dentro de la función agua, la cual será declarada en el código base para obtener nuestra serie de tiempo.

Para poder clasificar los píxeles se hace uso de un Script en Google Earth Engine, el cual nos permite obtener un histograma de la cantidad de píxeles contenidos en una imagen que se genera a través de la media de las imágenes capturadas por el satélite dentro del periodo de estudio de este trabajo de investigación [15]. Tomando en cuenta estos parámetros como condicionantes para el Script, obtenemos un histograma por cada polarización, respectivamente VV y VH.

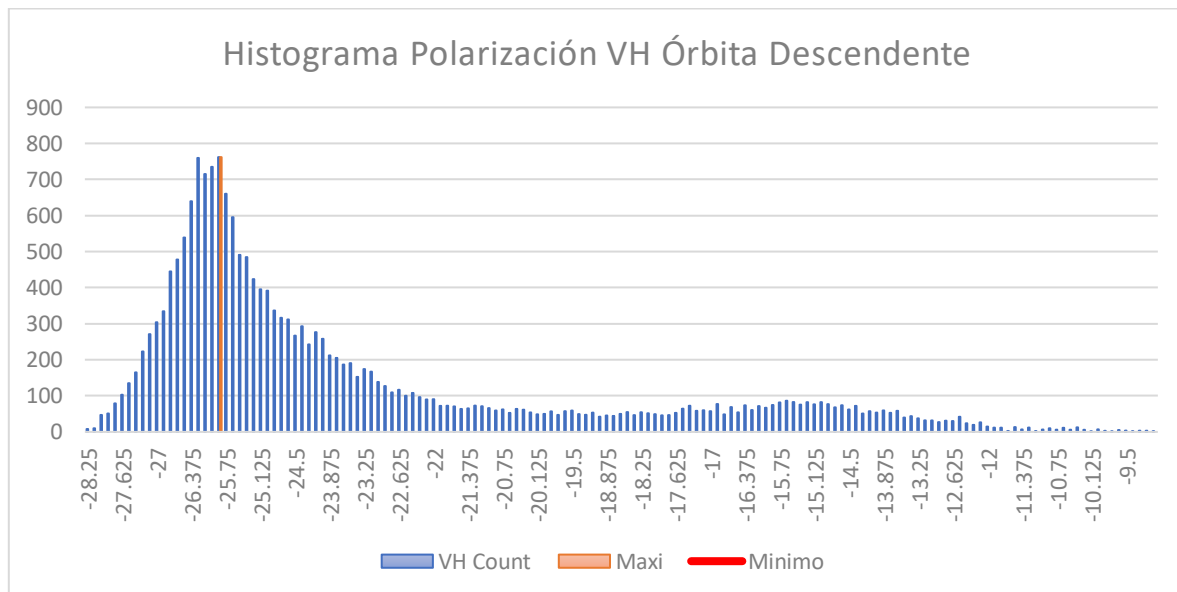


Figura 16. Histograma polarización VH, órbita descendente.

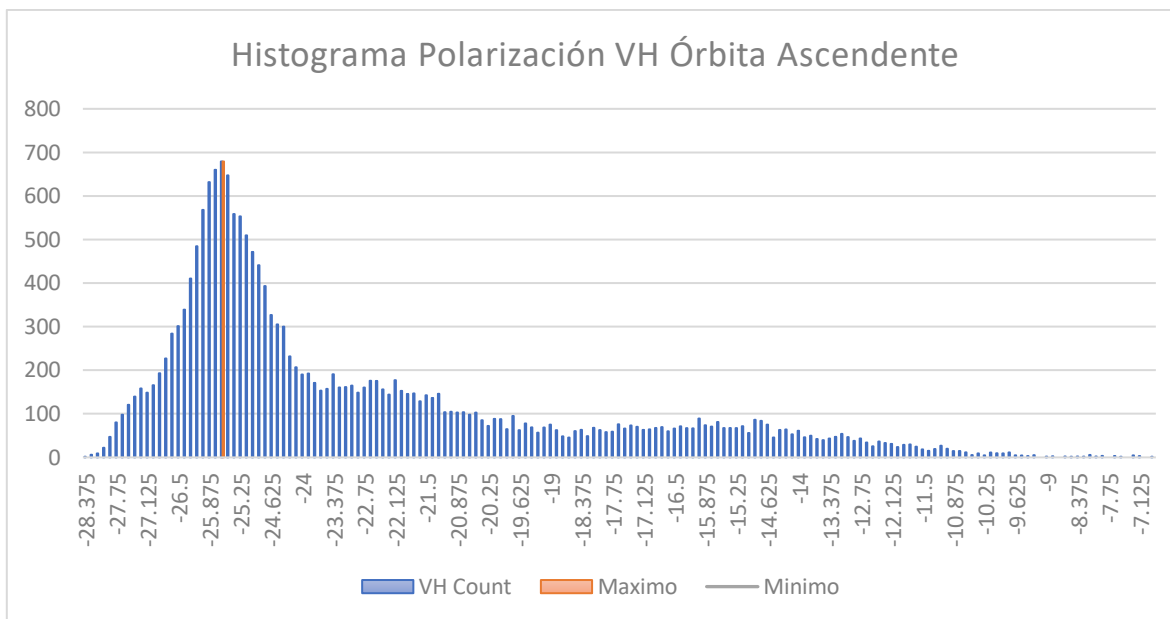


Figura 17. Histograma polarización VH, órbita Ascendente.

Los histogramas permiten visualizar la diferencia de concentración de píxeles por imagen respecto a cada parámetro con el que es generada, considerando la Figura 16 que tiene una órbita descendente y marca su máximo valor en -25.875 dB con un total de 761.973 píxeles que se ven afectados bajo ese valor de coeficiente de retrodispersión, dejando en evidencia un cambio en la concentración de píxeles oscuros, estando situados en un dominio inferior respecto a la Figura 17 que representa una órbita ascendente y permite ver una concentración de píxeles en un rango más negativo, teniendo su valor máximo en -25.625 dB con 679.2 píxeles, también evidencia una distribución más equitativa respecto a la cantidad de las píxeles por cada valor de coeficiente de retrodispersión.

Sin embargo, el análisis de estas imágenes no es respecto a un valor máximo, sino a un umbral que es calculado en base a clases y segmentación de esta imagen promedio, para obtener así un valor apropiado, que permita evaluar los niveles de agua en la región. Es por esto por lo que también cabe destacar que máximos y mínimos de estos gráficos se encuentran entre -28.250 dB a -22.625 dB Figura 16, -27.625 dB y -23.875 dB Figura 17. Evidenciando un sesgo significativo para la cantidad de píxeles, confirmando así las cantidades de agua bajo las cuales siempre están cubiertas las áreas de interés a nivel geográfico, estos valores indican numéricamente lo que visualmente se aprecia como una división más equitativa del total de píxeles contenidos en la imagen, por lo cual esta información queda sustentada numérica y gráficamente a través de los histogramas. Reafirmando lo que se percibe a través de la visualización de ambas órbitas en las imágenes SAR.

Considerando que los píxeles cuantificados son producto de la imagen promedio de las imágenes contenidas en la colección dentro del periodo de estudio de este trabajo de investigación [24]. Este factor evidencia la influencia del hecho que para una órbita ascendente existe una cantidad determinada de 49 imágenes y para la órbita descendente el número es de 36 imágenes. Es por ello por lo que varían de forma clara dependiendo de la órbita o la polarización a utilizar.

En base a este análisis, es consecuente considerar que el umbral de selección para una polarización VH debe situarse en un rango menor que su homónima VV.

Considerando la información gráfica que ha aportado el estudio se puede deducir que la cantidad de píxeles oscuros tienden a sesgarse mayormente en la polarización VH, mientras que en polarización VV, los píxeles contenidos en la imagen rondan valores de intensidad mayor y las imágenes más claras fundamentan esta información de forma visual.

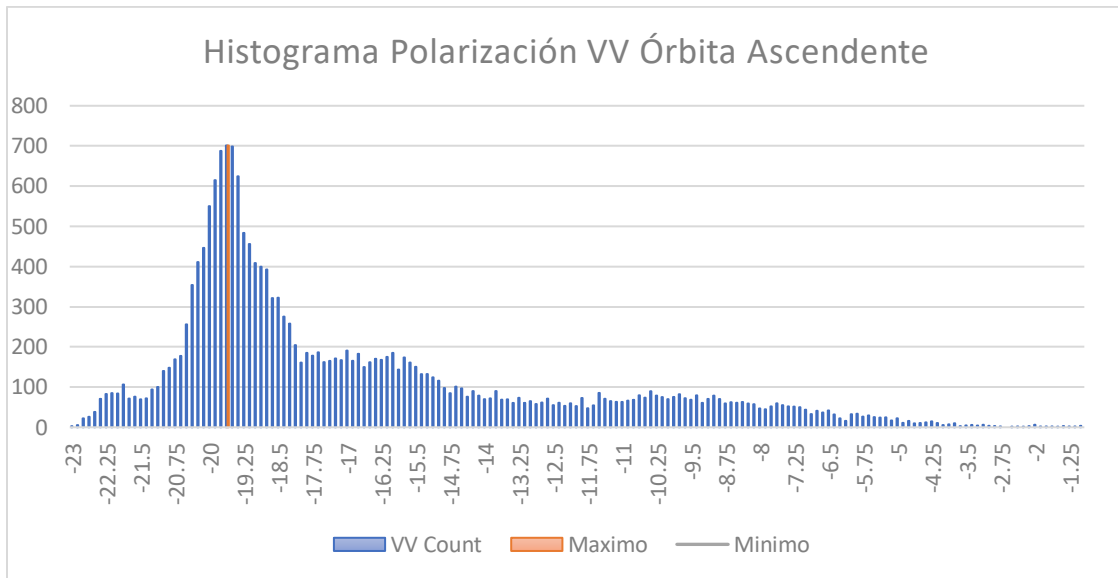


Figura 18. Histograma polarización VV Órbita Ascendente

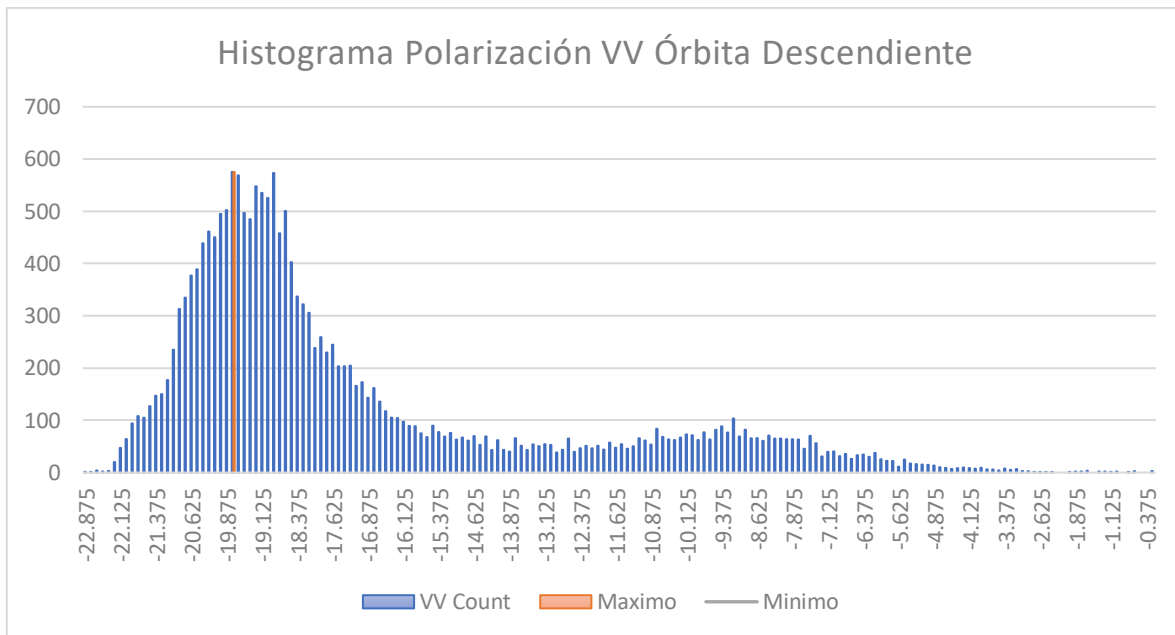


Figura 19. Histograma Polarización VV Órbita descendente.

El histograma de polarización VV presenta una distribución diferente respecto a la concentración de píxeles, aunque en cada histograma se aprecia la influencia del cambio de órbita ascendente o descendente respectivamente realizado a través del código.

Considerando que la concentración de píxeles en cada imagen es diferente según cada variable que se modifica, el punto máximo en la Figura 18 tiene un valor de -19.625 dB con una cantidad de 701.227 píxeles, estableciendo que la mayor cantidad de píxeles se centra en el rango de los -20.750 dB hasta -18.525 dB, esta concentración nos da una idea del sesgo que presentan los píxeles respecto a su coeficiente de retrodispersión evaluado en dB.

La Figura 19 en la cual se mantiene la polarización, pero cambiamos la órbita podemos notar que el máximo es -19.750 dB con un valor de 573.361 píxeles, dado que el rango de mayor concentración de píxeles oscila dentro de -21.650 dB y -16.625 dB es contundente considerar esto como parte de los cambios y la influencia que representan estas variables en el análisis de imágenes SAR.

Según los resultados de las pruebas y la cuantificación de píxeles, así como el respectivo valor de coeficiente de retrodispersión en cada imagen, ya es posible dimensionar las repercusiones que tendrá cambiar una órbita o escoger una polarización diferente, este es un factor determinante para la implementación de imágenes SAR en la generación de series de tiempo.

Este proceso sienta las bases para establecer un método de análisis con mayor precisión dentro de la región de estudio. El resultado de los histogramas presentados en polarización VV continúa siendo un producto de la imagen promediada de las imágenes contenidas en la colección.

Considerando los resultados visuales y matemáticos del análisis, en conjunto con la experimentación con variables y combinaciones de las imágenes SAR, disponibles en la colección se sientan las bases para un método que permita corregir las tendencias abruptas de la serie de tiempo que este estudio pretende mejorar. Es importante, de igual, forma dejar constancia de otras variables que han sido consideradas determinantes en la realización de este estudio, para corregir la serie de tiempo.

III.6. Variables que influyen en la generación de series de tiempo

Determinación de umbral en base a imagen promediada

Para determinar el umbral mediante el código generado en este estudio se hace uso de una imagen promedio de las imágenes en la colección del periodo de estudio, esto es indispensable para obtener un umbral que arroje resultados apropiados a toda la colección no a una imagen en particular, dado que si se analizan las imágenes de manera individual se podría notar que cada uno de los umbrales varía respecto al estado del embalse en la época en la que la captura de la imagen SAR fue realizada, dicho proceso haría que el umbral no funcione como filtro de la colección sino de una sola imagen.

Es por ello por lo que lo que ocurre dentro de la generación de la serie de tiempo es un filtrado en base al valor en dB fijado por el umbral de selección que es capaz de identificar la cantidad de agua de la región en la totalidad de imágenes contenidas en la colección, dado que el umbral de selección es resultado del análisis de la imagen promedio de estas.

Influencia de la selección apropiada de un polígono en GEE

La selección apropiada de un polígono que represente de forma más aproximada el área de estudio brinda la oportunidad de obtener resultados más precisos respecto al análisis. Dado que GEE usa este polígono como el área de estudio para obtener los datos necesarios, a través del filtrado de las imágenes en la región de estudio. Es por ello por lo que en el cálculo de un umbral implementa este método en busca de proporcionar datos más precisos.

Contando con las facilidades que nos brinda GEE, este estudio hace uso de una imagen promediada Figura 20, la cual es necesaria para mostrar un resultado que sea adecuado para la colección total adquirida durante el periodo de estudio, para que identifique el área que se pretende anegada de agua.

La Figura 21, muestra como Google Earth Engine nos permite generar polígonos a través de puntos, estos polígonos no deben tener una forma geométrica específica, sino que se ven ajustados a la forma que muestra el área de estudio a través de las capturas de imágenes SAR.

Tomando en cuenta que para generar la serie de tiempo se analizan las imágenes en diversas estaciones climáticas o épocas del año, la influencia de estos eventos o circunstancias repercuten directamente en la gráfica que obtenemos. Es así como la utilidad del método es evidente y muestra sus resultados, minimizando cada uno de estos efectos.

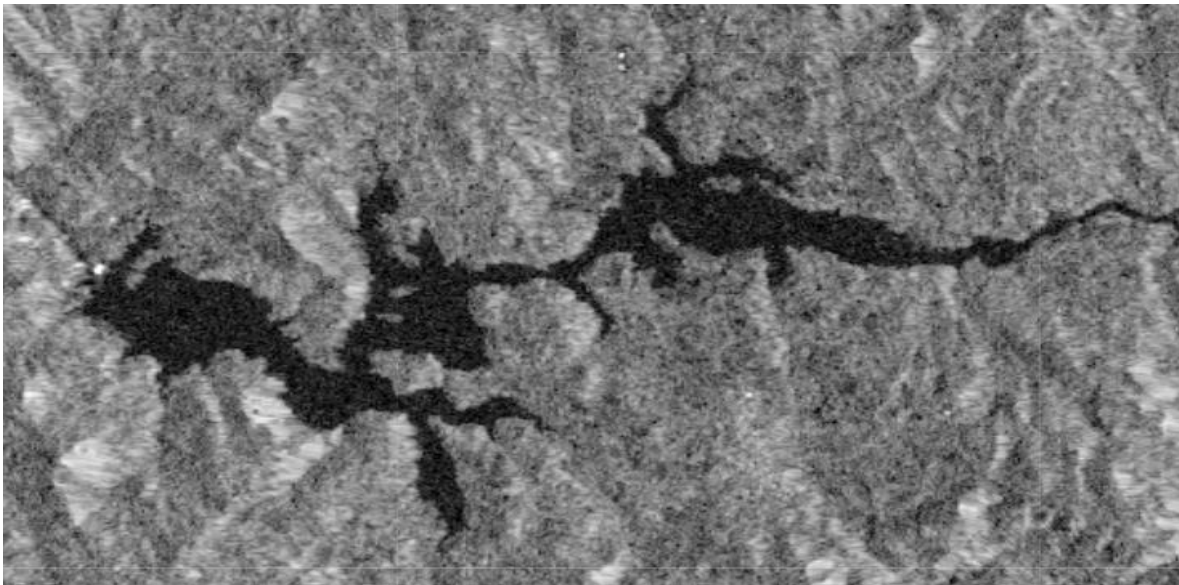


Figura 20. Imagen promediada del área de estudio del embalse de la Presa 3 de Febrero.

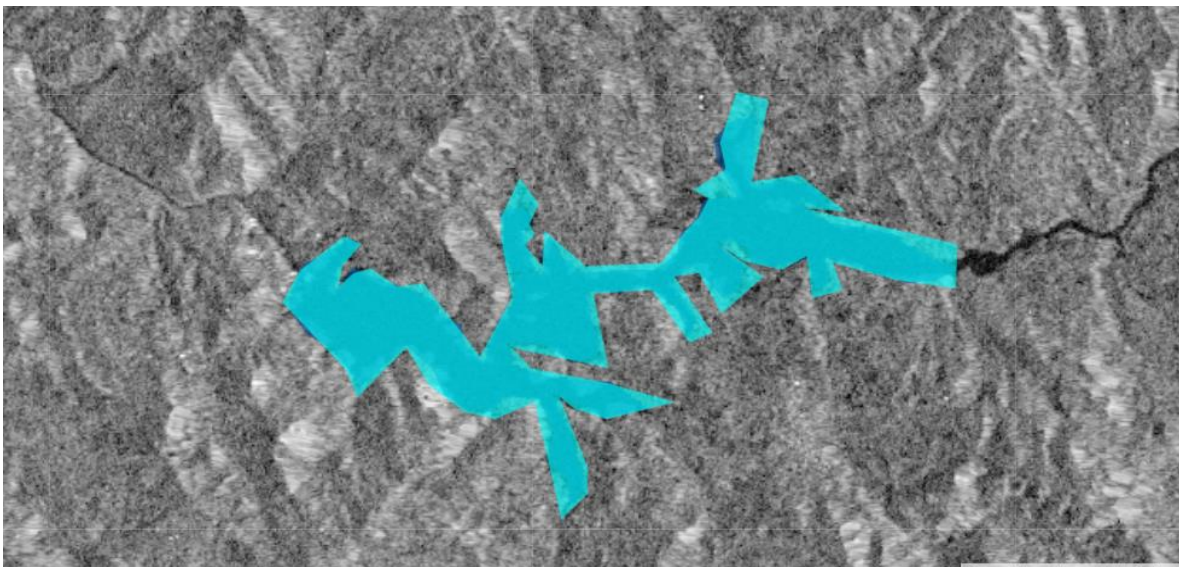


Figura 21. Polígono de selección del Área de estudio del embalse de la Presa 3 de Febrero.

Dejando constancia de la relevancia que tiene el hecho de usar una imagen promedio para una umbralización adecuada, así como de las variantes que representa un cambio en los puntos que componen el polígono y consecuentemente las dimensiones del área, mostrando así que esta variable es capaz influir en los datos que procesara GEE. También se plantea una opción que al igual que los histogramas se usa como base para justificar los rangos entre los cuales se experimenta con la función de clasificación de píxeles, presentando una gráfica que muestra la variación en la concentración de píxeles de una imagen promedio de la colección para cada polarización.

III.7. Variaciones de la cantidad de dB con respecto a la polarización

Este capítulo del estudio pretende plantear otro tipo de método que sienta bases numéricas para experimentar con un rango de valores de intensidad de dB para el coeficiente de retrodispersión, al igual que los histogramas el uso de estos datos establecen el rango promedio en el cual oscilan los píxeles, fijando el intervalos en los que podemos experimentar con valores entre los -15 dB y -20 dB para polarización VV y entre los -20 dB y -25 dB para polarización VH, y así evaluar diversos resultados y mostrar los cambios que la combinación de variables produce en una serie de tiempo.

Para poder visualizar esta grafica se requirió de los datos de dos colecciones filtradas, una para cada polarización VH y VV respectivamente, este grafico representa los valores medios de la intensidad del coeficiente de retrodispersión en dB, por cada imagen en cada fecha en la que fue capturada por el satélite, este proceso se lleva a cabo mediante un Script de GEE [24].

Este Script se encarga de generar una gráfica con los valores promedio de la cantidad de píxeles contenidos en cada imagen, por cada polarización VH y VV de forma individual, de esta forma se pudo obtener una serie de tiempo que permite identificar, los eventos y las épocas durante el ciclo de llenado en las que el embalse se ha visto afectado por algún evento específico.

Estos valores se ven modificados de forma abrupta en lapsos de tiempo de los cuales se tiene registro que el embalse estaba vacío, como es el caso del periodo entre enero de 2023 hasta inicios de junio de 2023, durante este lapso se informó a través de medios oficiales que el embalse tuvo que ser vaciado de emergencia [25]. De esta forma se pueden contrastar los valores reales de los que se tiene registro con la información obtenida a través de las pruebas realizadas en esta investigación.

Si bien es útil conocer la intensidad promedio de las imágenes para identificar aquellas épocas en las que el embalse se encuentra lleno o vacío. No puede ser concluyente, debido a que no se está filtrando el agua en específico sino solo promediando los elementos contenidos en la imagen.

Esta grafica se implementa como un medio para identificar los rangos de variación que presentan la intensidad de píxeles en cada polarización. Esta es la base para sustentar por qué los umbrales para la polarización VV y VH, presentaran valores diferentes entre sí, dado a que la tonalidad y la intensidad de los píxeles contenidos dentro de las imágenes oscilan en rangos de intensidad en dB diferentes.

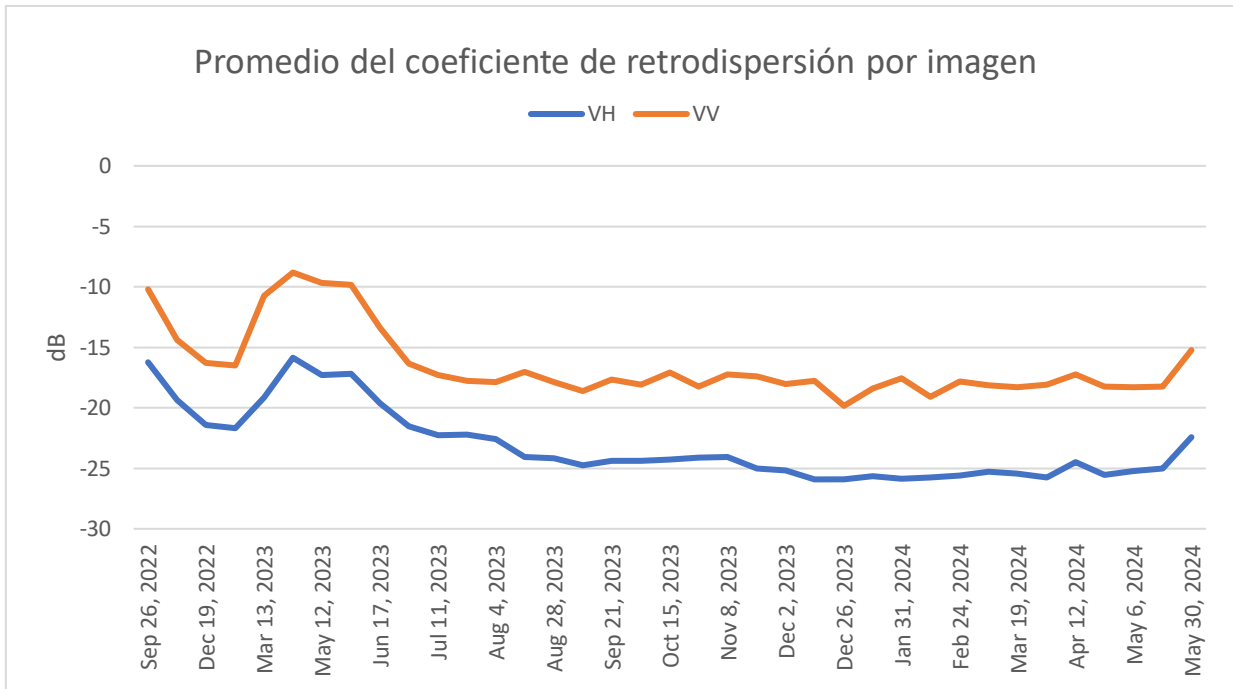


Figura 22. Promedio del coeficiente de retrodispersión.

Una vez establecido dos métodos similares que dan la oportunidad de establecer un rango de valores, dentro de los cuales se puede encontrar el umbral de selección que requiere la función para clasificar el agua dentro de las imágenes SAR, que en conjunto con la combinación de variables pretende establecer, el método que mejores resultados brinde para la corrección de la serie de tiempo.

III.8. Función para crear la serie de tiempo

La función nos permite clasificar la cantidad de píxeles fijando como filtro un umbral de selección, el cual es utilizado como discriminante en la evaluación de cada imagen de forma independiente. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso del coeficiente de retrodispersión que está en cada imagen capturada por el satélite y se mide en dB siendo esta la unidad de medida, en la que se encuentra el valor que se atribuye como umbral de selección en esta función para filtrar cada imagen. Se puede observar un ejemplo de la función en la Figura 23.

La forma en la que la función clasifica cada imagen consiste en que aquellos píxeles cuyo valor de coeficiente de retrodispersión en dB esté por debajo del valor fijado como umbral de selección representan agua, mientras que los que no serán identificados como tierra o regiones no anegadas de agua dentro del área de estudio. Una vez fijado el umbral, este es el encargado de filtrar. La función establece la cantidad de agua en la región en cada fecha evaluada dentro del periodo de estudio. La Figura 23, presente la estructura de la función la cual consiste en establecer el tipo de polarización, aplicar el umbral que funciona como un filtro de clasificación, para que todos aquellos píxeles por encima de ese valor sean considerados como píxeles de agua dentro de la región de estudio.

Función de clasificación de píxeles

```
//Definición de la función para clasificar píxeles
var clasificAgua = function(img){
  var vv =img.select('VH') //Define la polarización a utilizar
  var agua = vv.lt(-22.0).rename('Agua') //Umbral duro; VH= -22; VV=-15
  agua = agua.updateMask(agua)
  return img.addBands(agua)
}
```

Figura 23. Definición de la función en el código.

Con el fin de probar la influencia de las variables de interés en la función y la importancia de un umbral que contenga mayor precisión. Se procede a realizar pruebas:

Pruebas con la función

1. Órbita Ascendente, polarización VH y umbral de -18 dB

La implementación de un umbral de -18 dB, es debido a que es un valor por el cual se empieza tener registros de la acumulación de píxeles con un coeficiente de retrodispersión alto, tal como evidencia la Figura 22, nos da como resultado una gráfica que no permite visualizar una tendencia o comportamiento que pueda ser conclusivo sobre el estado de la Presa 3 de Febrero.

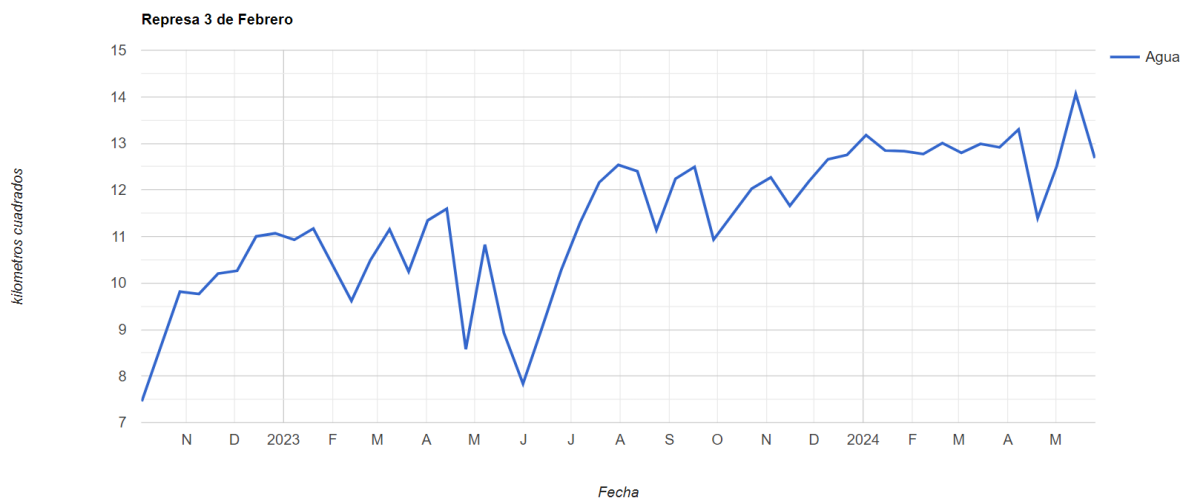


Figura 24. Serie de tiempo con umbral de -18 dB en VH, Órbita Ascendente.

Analizando la Figura 24, se puede notar que este umbral de -18 dB genera una conducta incongruente en la gráfica y no permite comprobar el comportamiento del embalse con respecto a los datos que brindaron las autoridades encargadas de registrar los niveles del embalse [7]. Una prueba, que de igual forma se considera pertinente para el estudio, es evaluar el otro extremo de concentración de píxeles, como lo es la consideración de las condiciones plasmadas en la Figura 25.

2. Órbita Ascendente, polarización VH y umbral de -26 dB

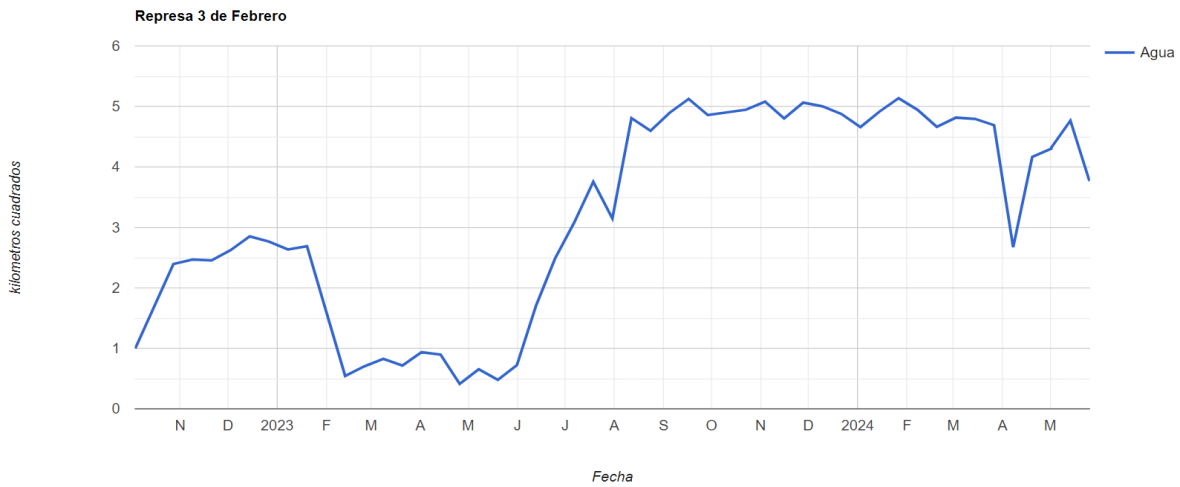


Figura 25. Serie de tiempo con umbral de -26dB en VH.

Manteniendo la polarización de VH, debido a que todos los estudios y las pruebas visuales como matemáticas, previamente realizadas, coinciden en que es la órbita que mejores resultados arroja para la utilización de imágenes SAR en el área y periodo de estudio de esta investigación. Considerando lo anterior y basándonos en la Figura 25, se puede determinar que un umbral de selección con valor de -26 dB no es apropiado, a pesar de cumplir relativamente con una tendencia similar al comportamiento del embalse, no permite corregir las alteraciones injustificadas de la serie de tiempo.

Esta prueba implicó una variación en el umbral utilizando un valor de -26 dB, el cual según la Figura 16 es un valor aproximado del valor máximo de la concentración de píxeles en la imagen promedio de la colección, arrojando resultados bastante satisfactorios respecto a la tendencia que fija la problemática de la investigación, pero sin solventar los puntos de caída en la gráfica, los cuales se presume son producidos por situaciones climáticas adversas en la región.

3. Órbita Ascendente, polarización VV y umbral de -15 dB

En base a las dos anteriores pruebas realizadas para encontrar el método óptimo para la corrección de series de tiempo a partir de imágenes SAR. Se nota que la Figura 26 es la gráfica cuya tendencia temporal se apega más a las condiciones reales que presento el embalse en el periodo de interés de este estudio [7]. Sin embargo, es aquí donde surge el principal motivo de la investigación, dado que, pese a su similitud o congruencia con datos reales, existen aquellos puntos dispersos o picos dentro de la gráfica sin justificación, sino que se consideran resultantes de los efectos climáticos de la región.

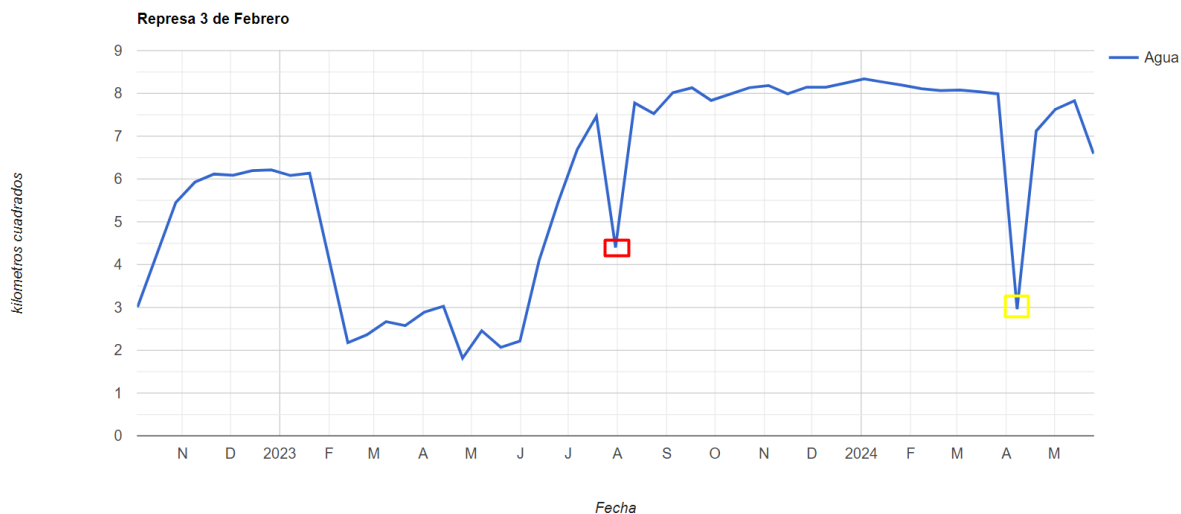


Figura 26. Serie de tiempo con umbral de -15dB en VV.

La Figura 26, evidencia estos eventos marcados con colores rojo y amarillo en la gráfica de la serie de tiempo, cada uno de los recuadros marca un punto que no tiene justificación, sino que podría representar un efecto de los fenómenos climáticos que afectaron a la región en el periodo de estudio. Es por ello que la investigación cita un evento puntual, el cual transcurre en una de las fechas donde se citan estas caídas en la gráfica y se considera fenómeno climático significativo en la región [13].

Estos eventos climáticos generan modificaciones en la serie de tiempo como lo es el punto situado a finales de julio, marcado por el recuadro rojo el cual coincide con datos encontrados durante la investigación sobre una tormenta que afecto la región oriental del país, cuya mayor repercusión se sitúa en específico en la zona geográfica donde se encuentra el embalse de la Presa 3 de Febrero.

Habiendo establecido las condiciones que mejor congruencia poseen respecto a los registros del embalse, y que se pueden contrastar con registros públicos durante el transcurso del periodo de estudio, no está demás hacer otra prueba con un valor que se encuentra en el límite superior de concentración de pixeles para la órbita VV, como lo evidencia la Figura 22.

4. Órbita Ascendente, polarización VV y umbral de -20 dB

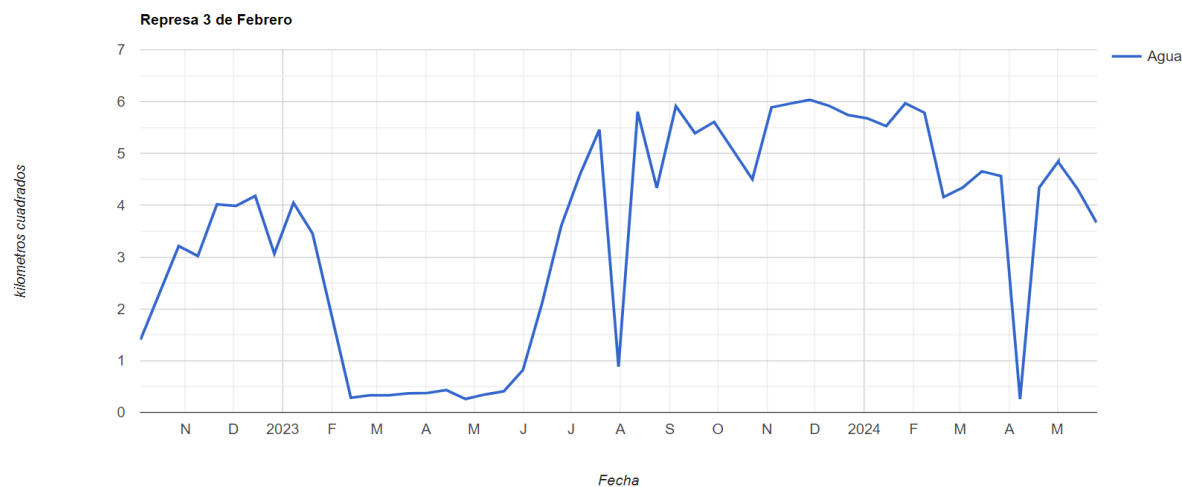


Figura 27. Serie de tiempo con umbral de -20 dB en VV, Órbita Ascendente.

Los efectos de la implementación de un umbral de selección demasiado alto distorsionan por completo los resultados que arroja una serie de tiempo. Tal como deja ver la Figura 27, este valor de umbral genera que la serie de tiempo muestre una conducta errática y poco concluyente, dado que intensifica aún más los defectos generados por las condiciones climáticas adversas y no permite fijar una tendencia o ciclo sobre el llenado del embalse.

Esta prueba destaca el efecto y la importancia que juega un umbral de selección apropiado para la creación de una serie de tiempo. El uso de este umbral sería totalmente inapropiado para los propósitos de este estudio.

Hasta este punto la realización de pruebas conlleva variaciones en el umbral y polarizaciones, pero se ha mantenido la órbita que mejores resultados arrojaba; sin embargo, es pertinente evaluar los cambios o influencia que tiene la selección de una órbita en la creación de la serie de tiempo.

5. Uso de la órbita DESCENDENTE

Aplicando este cambio dentro de la función es importante destacar que para la generación de esta serie la colección de imágenes se reduce de 36 imágenes en total seleccionadas dentro del periodo de estudio, lo cual marca una gran diferencia respecto a las 49 imágenes con las que cuenta la órbita ASCENDENTE que se ha utilizado en las pruebas anteriores.

Para esta prueba se implementa la polarización VV y el umbral de -15 dB que habían sido los que mejores resultados han arrojado en cuestión de aproximación de la serie de tiempo, Figura 26; sin embargo, los resultados obtenidos carecen de puntos específicos y presentan una tendencia más forzada y dispersa respecto a la misma gráfica con una órbita ascendente que es la que se pretende corregir. Es por ello que, aunque los efectos climáticos se vean disminuidos, una órbita que cuente con menos datos no sería la opción debido a que en lugar de corregir, suprime información de registro.

La reducción en la cantidad de imágenes se ve directamente reflejada en la trayectoria de la serie de tiempo que intenta compensar la falta de información y que genera puntos dispersos y uniones que alteran la tendencia y generan una gráfica forzada.

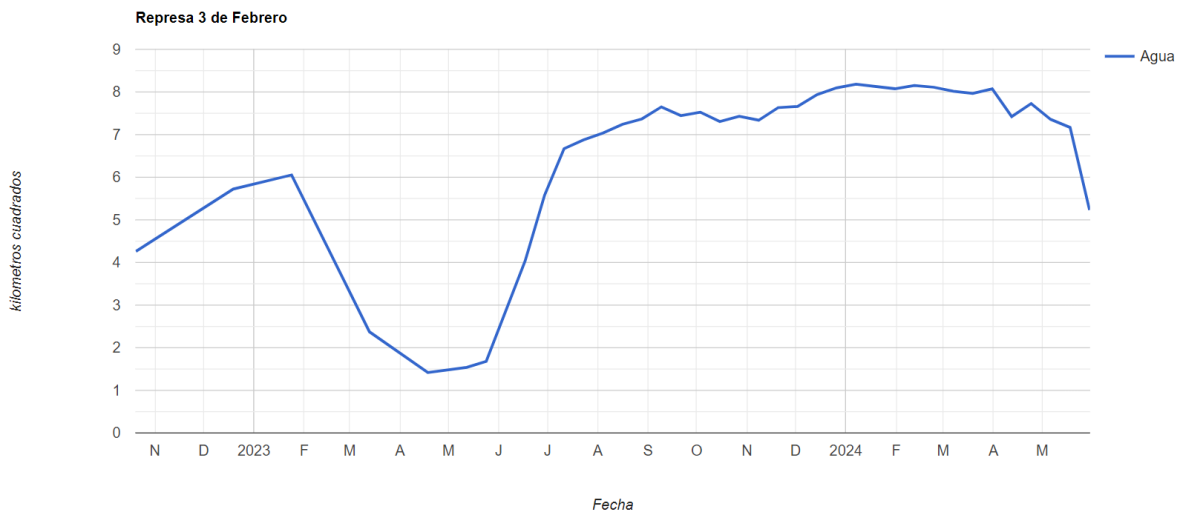


Figura 28. Serie de tiempo con umbral de -15dB en VV, Órbita Descendente.

La gráfica de la Figura 28, pierde la tendencia que arrojó los mejores resultados en la órbita ascendente de la Figura 26, presenta una tendencia forzada y dispersa, que no permite evaluar el estado del embalse, por lo cual se puede desestimar el uso de esta órbita en este análisis o investigaciones futuras que se pretendan realizar del área geográfica o la Presa 3 de Febrero.

La ejecución de esta prueba, además de evidenciar los efectos de la carencia de imágenes en la órbita descendente y los efectos que esta carencia de datos representa a nivel gráfico para las series de tiempo, destaca que los umbrales están estrictamente relacionados con las variables analizadas en el proceso de prueba; es por ello por lo que el valor de umbral de -15 dB si bien arroja resultados positivos para una serie de tiempo en órbita ascendente. Utilizando el mismo umbral, pero en órbita descendente, no es nada concluyente o productivo.

Con base en las pruebas realizadas y el análisis de los datos, se pretende plantear combinaciones de datos o mezcla de variables con el objetivo de evidenciar las consecuencias y efectos de las variables en la realización de series de tiempo, para encontrar el método que logre corregir la serie de tiempo.

6. Promedio de datos obtenidos en órbita ASCENDENTE Y DESCENDENTE

Es importante destacar que previo a este trabajo de graduación no encontramos un registro donde se haya combinado ambas órbitas Ascendente y Descendente de forma conjunta para generar series de tiempo, debido a inconvenientes con los periodos de revisita o la periodicidad que pueden tener las imágenes en cada orbita, dado que la ausencia de algunas capturas en órbita descendente, genera puntos ambiguos y en algunos casos estos puntos se ubican de tal forma que chocan o se unen y obteniendo puntos que hacen imposible realizar un análisis conductual a través de una gráfica, evitando que se puede leer el comportamiento de llenado del embalse y corregir los efectos que los fenómenos climáticos le causan, siendo esta la problemática a resolver en este estudio.

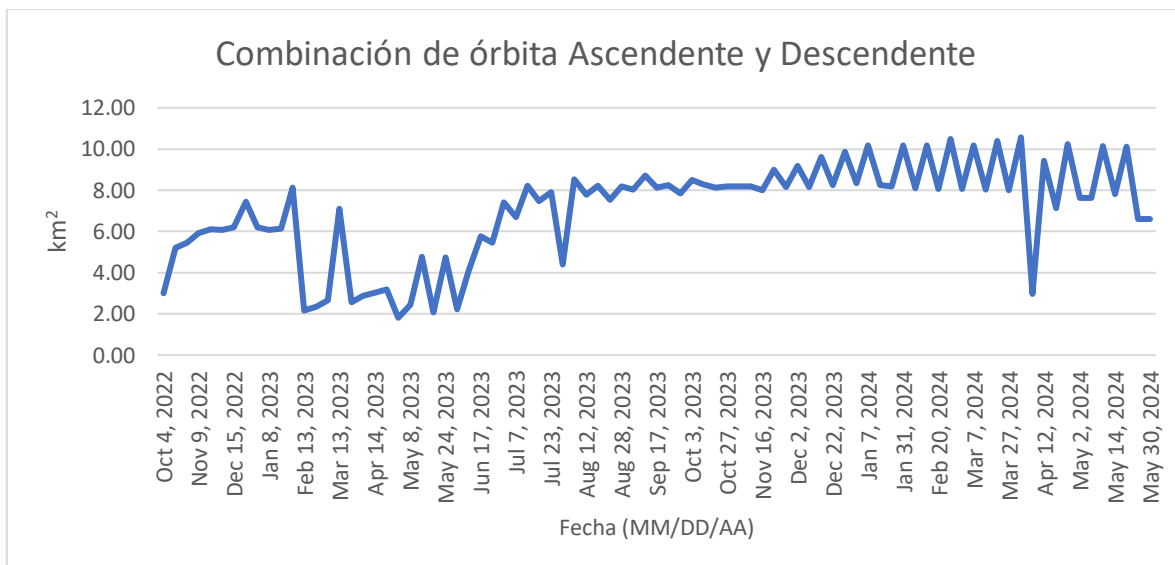


Figura 29. Serie de tiempo producto del promedio de órbita Ascendente y Descendente.

Como evidencia la Figura 29, al unir los datos contenidos en las imágenes de las órbitas descendente y ascendente, se obtiene como resultado una serie de tiempo con mayor cantidad de puntos que en consecuencia podrían significar mayor precisión, pero esta cantidad de información en masa brinda un sinfín de puntos dispersos y variantes en la serie de tiempo, obteniendo una tendencia que posee

un conjuntos de datos que hacen imposible la obtención de un trazo suavizado y que sea visualmente fácil de comprender para este estudio o procesos en futuras investigaciones.

Esta fase de la experimentación es importante para evidenciar que la información que llega a proveer el satélite nos permite mostrar sus datos en diversas circunstancias. Para obtener el mejor método se ha experimentado con la mayoría de estas combinaciones, desde la más detallada hasta la menos precisa; sin embargo, el propósito de este estudio es mejorar la presentación de las series de tiempo de la Presa 3 de Febrero es por eso que esta combinación no aporta en beneficio de suavizar o minimizar los efectos de eventos climáticos dentro de la generación de esta serie de tiempo.

Por lo tanto, esta combinación de datos lo que brinda es una serie de tiempo sobrecargada de información que aporta menos precisión y genera mayor cantidad de puntos sin justificación o argumentos que respalden su existencia, así que esta combinación no es apropiada para el objetivo de este estudio, con el mismo objetivo se emplea una combinación de polarizaciones en la siguiente prueba para ver resultados de esta combinación y las variaciones que podría generar.

7. Promedio de gráficas en polarización VV y VH

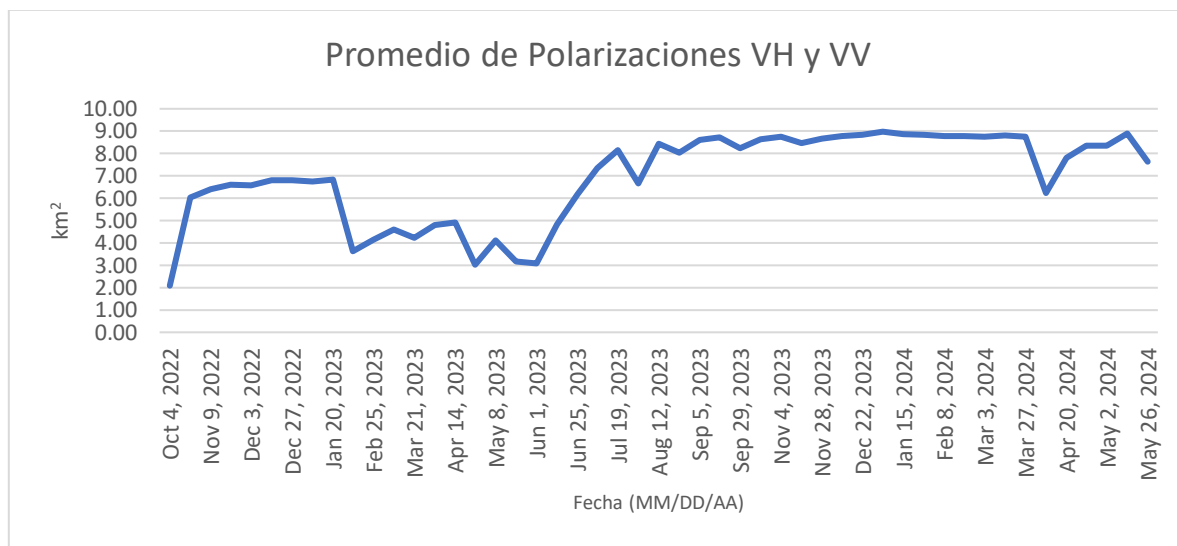


Figura 30. Serie de tiempo producto del promedio VH y VV.

El promedio de las imágenes contenidas en la colección con las diferentes polarizaciones VH y VV, con un umbral de -15 dB, nos permite un trazo más suave acorde a la información de la cual se tiene registro del embalse y presentando cambios sutiles en los puntos a corregir, Figura 30. Aunque sigue manteniendo de forma evidente los efectos del evento climático en el que se centra este estudio [13].

El resultado de esta prueba, que hace uso de un promedio de ambas polarizaciones, no nos brinda la solución respecto a tendencias o eventos climáticos como los mencionados en este estudio, que generan puntos dispersos e incoherentes dentro de una serie de tiempo. Es por ello por lo que destaca la necesidad de implementar un método que logre graficar un mejor resultado visual y uno que permita minimizar el efecto de las circunstancias y fenómenos climáticos adversos en las regiones de estudio, brindando así series de tiempo que den facilidad de interpretación y análisis.

Habiendo experimentado con la función y las variables que influyen directamente en la creación de una serie de tiempo con imágenes SAR, interactuando con combinaciones de órbitas y polarizaciones, en el transcurso de la investigación y en pro de agotar las posibles variables u opciones con que se

nos permite trabajar en GEE, se realiza una prueba con imágenes ópticas, cambiando por completo el tipo de imagen e incluso el satélite, pero considerando que es un área de la investigación que vale la pena analizar, debido a que estas imágenes son de gran uso en eventos climáticos o estudios relevantes en los cuales se implementa la teledetección a nivel global.

III.9. Uso de imágenes ópticas en la generación de series de tiempo

En búsqueda de métodos que permitan optimizar la realización de series de tiempo dentro de este estudio, se busca optar por medios que nos permitan encontrar las mejores opciones para la solución de problemas producto de los fenómenos climáticos que evidentemente se ha mostrado que afectan la gráfica de una serie de tiempo generada con imágenes SAR en la región de estudio.

Considerando las necesidades anteriormente descritas, este capítulo del trabajo de investigación hará uso de Sentinel-2. Como se describió en el capítulo dedicado a este satélite, la principal característica de este satélite es la obtención de imágenes ópticas mediante las múltiples bandas con las que esté cuenta para la visualización de imágenes que son capaces de brindarnos una perspectiva más real del área de estudio. Si bien la visualización continua sin ser una prioridad para esta investigación se plantea con el objetivo de interpretación del estudio, y experimentar con los resultados que arroja el uso de los datos contenidos dentro de las imágenes ópticas para generar una serie de tiempo [21].

Visualización de imágenes Ópticas en Sentinel 2

El proceso de visualización realizado en este experimento sigue un algoritmo similar al implementado con la obtención de imágenes SAR, requiriendo una colección y una serie de filtrados de área de interés y las fechas fijadas para esta investigación, denominado periodo de estudio.

Para la ejecución de esta prueba se ha creado una colección de imágenes bajo el mismo mecanismo de selección de coordenadas explícitas, tal como se describió que para las imágenes SAR, solo que en este caso se hace uso del modo RGB, el cual implica hacer uso de las bandas B4, B3 y B2 que contiene Sentinel-2, necesarias para una visualización del área de interés, que es mucho más fácil de interpretar sin muchos conocimientos de la teledetección.



Figura 31. Visualización RGB de la región de interés 03/10/2022.

Función para clasificación de agua en Sentinel 2

La Figura 32, muestra la función en el código, cuyo principio de ejecución conlleva el uso de una imagen promedio de la colección que contiene las bandas B4, B3, B2 y B8, siendo B3 y B8 las bandas de las necesarias para calcular el NDWI [22], que es encargado de filtrar pixeles de agua en la imagen.

En síntesis, esta función clasifica el agua bajo el principio de que valores de NDWI mayores o iguales a 0.0 indican la presencia de agua, mientras que valores menores indican tierra u otras superficies. Considerando este parámetro, filtramos las imágenes y mostramos la cantidad de pixeles de agua.

```
39
40 // Funcion
41 var ndwi_f = function(img){
42     var ndwi = img.normalizedDifference(['B3', 'B8'])
43     var agua = ndwi.gte(0.0).rename('NDWI')
44     agua     = agua.updateMask(agua)
45     return img.addBands(agua)
46 }
47 //
48 var ndwi = sentinelImageCollection.map(ndwi_f);
49 print(ndwi);
50
```

Figura 32. Función NDWI para grafica serie de tiempo.

Generación de serie de tiempo con imágenes ópticas de Sentinel 2

Haciendo uso de la función anterior, se procede a retomar los datos de la selección del índice NDWI y graficar los puntos por cada imagen contenida dentro del periodo de selección. Cabe destacar que entre las diferencias más relevantes en este proceso se encuentra el hecho de que se utiliza un total de 106 imágenes, las cuales permiten una cantidad de puntos mucho mayor que los puntos que se podían obtener mediante la órbita Ascendente con 49 imágenes. Siendo una diferencia considerable a la hora de comparar el uso de imágenes SAR y este método que implementa imágenes ópticas.

En la Figura 33 es evidente que una mayor cantidad de imágenes nos permite graficar mayor cantidad de puntos, pero para obtener una tendencia temporal que permita un estudio apropiado, no se debe enfocar directamente en el método que mayor cantidad de puntos procese, como se vio en la combinación de órbitas y polarizaciones en los experimentos anteriores. Sino en que las tendencias y gráficas permitan obtener información visual que ayude a predecir comportamientos y analizar situaciones que se viven en la región de estudio.

CAPITULO IV. ALTERNATIVAS PARA SOLVENTAR LA INFLUENCIA CLIMÁTICA EN LAS SERIES DE TIEMPO

IV.1. Determinación de umbral

Para el proceso de determinación de un umbral mediante GEE hacemos uso de todos los elementos anteriores, desde la selección de una colección hasta el uso de un histograma. Considerando siempre las variables que se han venido utilizando a lo largo de este estudio. Como el cambio de órbita o la implementación de las diferentes polarizaciones. Este capítulo pretende explicar la forma en la que se obtiene un valor más preciso para el umbral de selección, que permita clasificar de forma más efectiva aquellos píxeles que son agua y los que no lo son.

Determinar este umbral implica un análisis de la colección, dentro del intervalo de tiempo de octubre de 2022 hasta mayo de 2024, lo cual conocemos como periodo de estudio. Usando la imagen promedio para capturar la información que mejor se ajuste al estado del embalse y tomando como base la información obtenida a través de los histogramas previos, los cuales aportan los datos requeridos respecto a la cantidad de píxeles y donde se concentran para aplicar el Método Otsu [26].

Se lleva a cabo el análisis de estos datos desde la perspectiva matemática y aplicando la fórmula del algoritmo Otsu en una función diseñada en GEE, que analiza y aplica esta fórmula mediante un barrido de los datos contenidos en las imágenes, aportando un valor específico, el cual es denominado para intereses de esta investigación como umbral de selección.

Este umbral será el valor fijado en la función base para la generación de la serie de tiempo; este valor será el que clasificará los píxeles contenidos dentro de cada imagen, por el periodo de estudio evaluado en esta investigación. En base a esta información se hace la selección de aquellas regiones que contienen agua, y las que no. Según criterio del umbral calculado en base al método presentado.

El uso de un umbral que es calculado en base a los datos contenidos en las imágenes SAR, sumado con la experimentación realizada con las diversas combinaciones de órbitas y polarizaciones, se acopla en conjunto con las pruebas y ejemplos anteriores para establecer el método que mejores resultados arroje para la generación de una serie de tiempo, donde la zona de interés presente afecciones climáticas que repercutan en la gráfica. Con el propósito de corregir y mejorar la serie de tiempo para que facilite un mejor análisis del estudio en el embalse de la Presa 3 de febrero.

Para cada una de las tablas presentadas a continuación es necesario evidenciar que los datos son obtenidos a través de una imagen promediada, la cual aporta los datos de la colección para una función que simula el algoritmo de umbralización Otsu, arrojando así un umbral fundamentado matemáticamente para cada polarización.

La técnica de clasificación se puede explicar como un algoritmo que evalúa la imagen de forma binomial caracterizando píxeles de forma concisa, como agua o no agua siendo la base para este discriminante el valor seleccionado mediante la técnica de segmentación. En síntesis, este algoritmo nos permite conocer un valor que pueda separar aquellos píxeles de agua y de aquellos que no lo son.

Con el fin de ejemplificar el proceso que se usa para obtener ese umbral de forma automática y fundamentado en datos de la imagen promediada, se muestran Tabla 6 y Tabla 7, que son generadas a partir de la cantidad de píxeles, la Figura 34 y Figura 35, muestran una gráfica que plantea la concentración de píxeles acorde a cada valor de coeficiente de retrodispersión en las unidades de dB.

Tabla 6. Varianza entre clases VH.

dB	Píxeles
-28.103	493.488
-26.655	67,000.92
-25.184	221,280.23
-23.015	265,376.84
-21.111	274,460.51
-19.047	255,529.84
-16.98	199,857.46
-15.063	111,524.30
-13.099	44,518.83
-11.23	8,512.07
-9.388	1,708.81
-7.689	163.337
-5.241	0

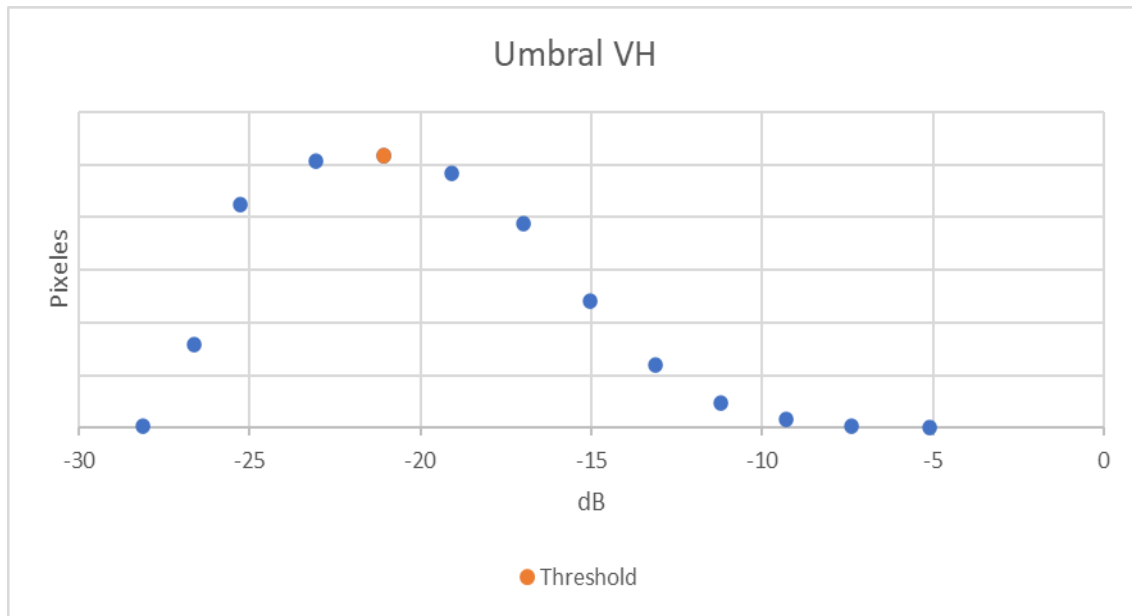


Figura 34. Varianza respecto al índice del umbral en polarización VH.

Umbral = -21 dB

Tabla 7. Varianza entre clases en polarización VV.

dB	Px
-22.244	7,813.68
-20.647	64,626.18
-19.237	206,114.20
-17.078	250,653.87
-15.122	258,730.93
-13.055	243,309.79
-10.954	194,790.66
-9.052	127,456.04
-7.138	66,402.69
-5.161	23,291.42
-3.196	9,788.23
-1.392	1,892.87
0.937	0

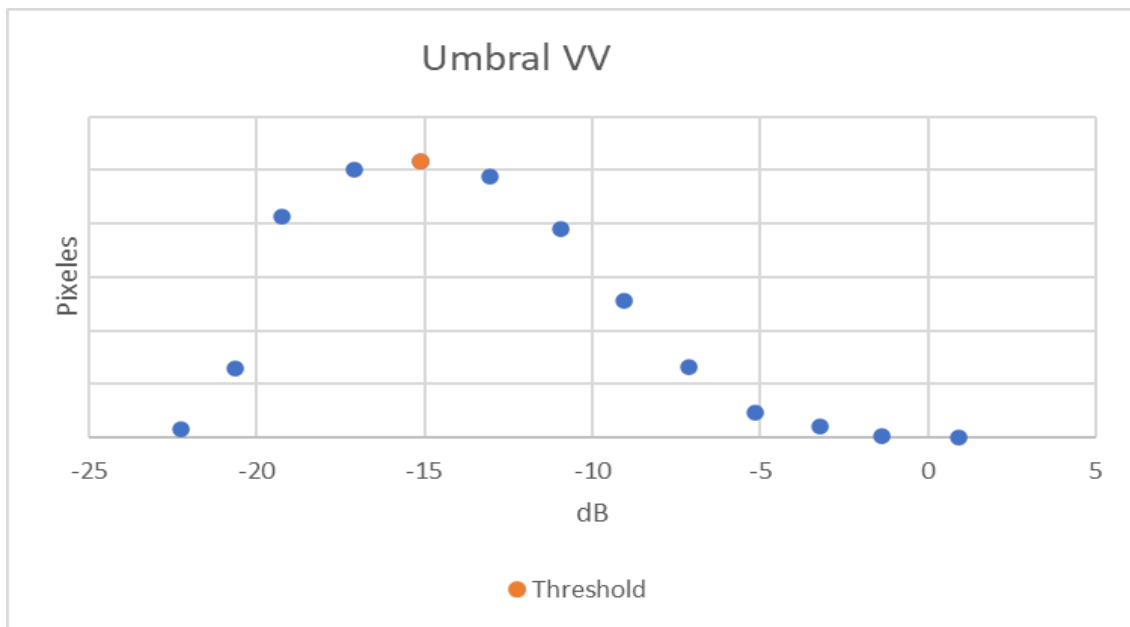


Figura 35. Varianza respecto al índice del umbral VV.

Umbral = -15 dB

IV.2. Presentación del método

1. Establecer área geográfica, mediante un polígono de puntos específicos de la región.
2. Selección de la colección dentro del código 'COPERNICUS/S1_RD'.
3. Filtrar las imágenes por las fechas del periodo de estudio.
4. Se establece la órbita "ASCENDING".
5. Se hace uso de la polarización "VH" permitiendo así la detallada selección de imágenes.
6. Fijar umbral establecido en el estudio, para la función *agua* con un valor de -21 dB.
7. Generar la serie de tiempo a través de las imágenes SAR.

Siguiendo cada uno de los pasos establecidos en el método a través del estudio presentado en esta investigación, procedemos a mostrar resultados de una serie de tiempo dentro del área de interés durante el periodo de estudio fijado previamente en el desarrollo del trabajo, obteniendo resultados satisfactorios que permiten constatar que los eventos climatológicos puntuales retratados en esta investigación sí tienen influencia en los datos aportados por las imágenes SAR, pero que la implementación de este método solventa y mitiga los efectos causados por estos eventos climáticos.

La Figura 36 evidencia los resultados del método logrando minimizar los efectos que estos eventos climáticos tienen en la generación de una serie de tiempo, se presenta una gráfica que muestra una tendencia acorde a los datos que disponibles de forma pública, sobre el estado y los cambios que sufrió el embalse de la Presa 3 de Febrero, además que esta tendencia se presenta de forma suavizada y reduce en gran manera aquellos puntos dispersos, eliminando los puntos de caída en específico el punto generado por la tormenta analizada en esta investigación.

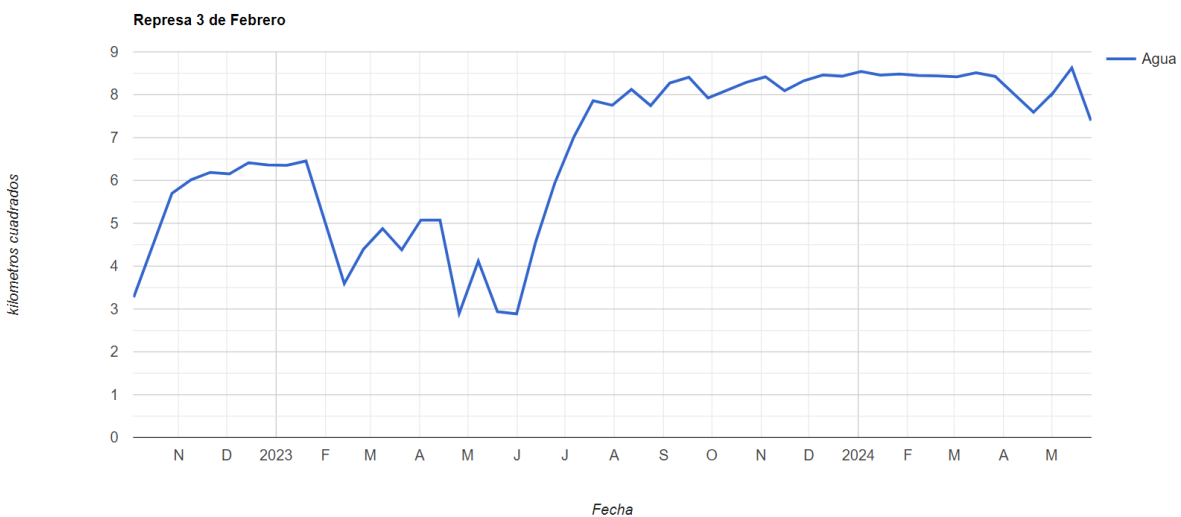


Figura 36. Gráfica de serie de tiempo con el método deducido en el estudio.

La Figura 37, deja en evidencia la eficacia del método, permitiendo hacer una comparación con el trazo a corregir en la problemática de estudio, dado que se pueden comprobar las correcciones que genera, con respecto a los resultados obtenidos previo a la implementación del método y las mejoras que conlleva cada una de las variables que este utiliza.

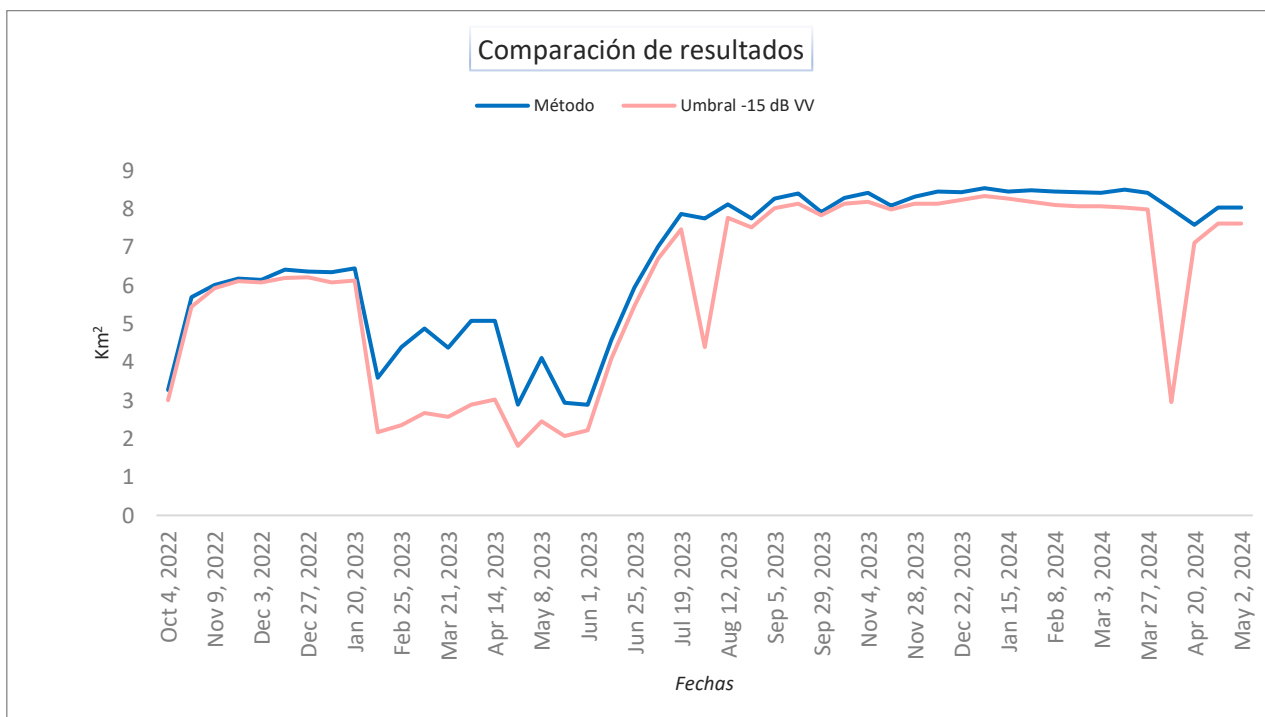


Figura 37. Comparación de series de tiempo.

Con base en las pruebas gráficas Figura 37, puede constatar que el evento climático que afecto a la serie de tiempo original se ve reducido dentro de la gráfica de la serie de tiempo corregida, eliminando los puntos de caída sin justificación, solventando así la problemática de estudio.

Este método permite que tenga un patrón más concreto sin puntos dispersos y da la oportunidad a ejecutar análisis o fijar tendencias sobre la zona, sin la incógnita de los puntos erróneos que daban pie a interrogantes y generaban pérdida de credibilidad en la serie de tiempo con respecto a los datos que esta planteaba, solventando eficaz y contundentemente la problemática de estudio.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

- Posterior a las pruebas con polarizaciones para la obtención de series de tiempo, se puede inferir que la polarización Vertical-Horizontal (VH) arroja mejores resultados para la demostración de datos de forma estadística. El histograma generado por esta polarización muestra su punto máximo en -25.875 dB, con un total de 761,973 píxeles. Esto establece una base sólida para determinar un rango de oscilación adecuado del umbral para esta polarización debido a que la discriminación de píxeles de agua es más efectiva.
- Considerando que el satélite Sentinel-1 de la misión Copernicus cuenta únicamente con dos órbitas, Ascendente y Descendente, se concluye que el uso de la órbita Ascendente en este estudio arroja los mejores resultados. Esto se evidencia tanto a nivel estadístico como visual y especialmente en series de tiempo con una mayor cantidad de datos. La órbita Ascendente proporciona 49 imágenes, en comparación con las 36 imágenes de la órbita Descendente, resultando en una diferencia de 13 imágenes. Esta diferencia implica un lapso más prolongado entre las imágenes y con ello puntos más dispersos y una tendencia forzada en la gráfica con la órbita Descendente, evidenciando claramente que la órbita Ascendente es la que mejores resultados aporta.
- La implementación de diversos umbrales en las pruebas realizadas permite concluir que estos umbrales están directamente relacionados con las órbitas y las polarizaciones. El análisis matemático de las polarizaciones proporciona datos relevantes sobre los valores en los que se concentra la mayor cantidad de píxeles: entre -15 dB y -20 dB para VV, y entre -20 dB y -25 dB para VH. Al tomar como referencia la prueba con un umbral de -15 dB en la polarización VV en la órbita Ascendente, se obtiene un resultado razonable, aunque no solventa completamente los defectos causados por eventos climáticos en el estudio. Sin embargo, el mismo umbral aplicado en la órbita Descendente con la misma polarización resulta en una serie de tiempo dispersa y forzada.
- El uso de histogramas permite clasificar los píxeles y segmentar la imagen analizada mediante un proceso matemático indispensable para calcular un umbral, que oscila alrededor del promedio de las intensidades. Este gráfico revela que los máximos de los histogramas en la polarización Vertical-Horizontal (VH) son más consistentes que en la polarización Vertical-Vertical (VV), a pesar de las variaciones entre las órbitas Ascendente y Descendente. En particular, los rangos en la órbita Descendente son de -28.25 dB a -22.625 dB, y en la órbita Ascendente son de -27.625 dB a -23.875 dB, donde se encuentra la mayor concentración de píxeles. En contraste, los histogramas en VV presentan una mayor variación al cambiar de órbita. Esta información permite una mejor comprensión de la estabilidad y consistencia de las polarizaciones en diferentes condiciones orbitales.
- El uso de imágenes ópticas en este estudio para generar series de tiempo no proporciona mejores resultados que el uso de imágenes SAR, al menos en cuanto al registro y procesamiento de datos en series temporales. Sin embargo, las imágenes ópticas ofrecen una calidad visual superior, lo que permite una mejor interpretación del estado de la región. Esto se debe a la capacidad de las imágenes ópticas para capturar detalles visuales que son

fácilmente comprensibles para el ojo humano, a diferencia de las imágenes SAR, que requieren un análisis más especializado para interpretar correctamente los datos obtenidos.

- La demostración visual de imágenes SAR no es un fuerte en el desarrollo de este estudio; sin embargo, al ser estas imágenes la materia prima para la generación de series de tiempo, su visualización es un aspecto del cual se inicia para identificar la influencia que las variables como la órbita y polarización jugaron en la selección del método que mejor resultado brindo en la corrección de la serie de tiempo.
- La ejecución de las pruebas ha permitido obtener la gráfica más aceptable utilizando un umbral de -15 dB en la polarización Vertical-Vertical con órbita Ascendente. Sin embargo, estos resultados también destacan la necesidad de determinar el umbral de forma metódica y algorítmica, haciendo uso de un proceso matemático que utilice la información recolectada en el estudio para proporcionar resultados más precisos y fundamentados. Además, la prueba resalta que el evento climatológico analizado en esta investigación afecta negativamente la estructura de la serie de tiempo, subrayando la importancia de un método efectivo que pueda mitigar estas influencias.
- La gráfica generada a partir del método establecido en este estudio permite al usuario visualizar una serie de tiempo que mitiga en gran medida los efectos de los fenómenos climáticos. En particular, solventa la problemática observada durante la semana del 29 de julio al 4 de agosto de 2023, cuando la captura del 31 de julio de 2023 provocó una caída en la serie de tiempo analizada. Este método demuestra ser efectivo al corregir la serie de tiempo afectada.
- A través del desarrollo de este experimento, se concluye que el método deducido es la mejor alternativa para corregir la influencia de los efectos climáticos en una serie de tiempo. Aunque gran parte de la literatura destaca que las imágenes SAR individuales no se ven directamente afectadas por estos fenómenos, las series de tiempo sí evidencian cambios significativos. Este método, por lo tanto, demuestra ser efectivo en mitigar dichos efectos y mantener la integridad de los datos en el análisis temporal.

Como recomendación de mejoras para líneas futuras se presenta:

- Uso de imágenes Ópticas para reconstrucción de un periodo temporal a través de secuencias visuales como Gif o videos secuenciados del conjunto de imágenes que se pueden obtener del periodo de estudio, dado que, si bien la parte de datos de una imagen óptica presenta inconvenientes para graficar puntos, es notorio la precisión y ayuda visual que representaría una reconstrucción temporal de un periodo a través de imágenes en la banda RGB u otras que están disponibles a través de Sentinel 2.
- Implementación del método en futuros eventos climáticos o atmosféricos como el evento marcado en recuadro amarillo de la Figura 26, dado que presento buenos resultados en la vista superficial y numérica que se le da en el desarrollo de esta investigación, se podría comprobar y ratificar, a través de pruebas y experimentación que el uso de este método presentaría buenos resultados ante eventos climáticos y eventos astronómicos como tormentas solares o eclipses como se asume fue el caso de ese evento puntual.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. O. J. Rivera, «Determinación de áreas y volúmenes en embalses de presas hidroeléctricas a partir de imágenes satelitales,» [En línea]. Available: <https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/c0dc5e00-afaa-46a8-a2ea-39c6aa3c1e65/content>.
- [2] A. Danklmayer y M. Chandra, «Precipitation Induced Signatures in SAR Images,» [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/11085015.pdf>.
- [3] A. Danklmayer, B. J. Döring, M. Schwerdt y M. Chandra, «Assessment of Atmospheric Propagation,» [En línea]. Available: <https://elib.dlr.de/54790/1/getPDF-Danklmayer-TGRS2009.pdf>.
- [4] E. Lemus, C. Dada y G. Labrador, «CEL pagó \$28 millones a constructora sin aclarar quién falló en presa El Chaparral,» El Faro, [En línea]. Available: <https://acortar.link/w3rajB>.
- [5] E. S. Power plant profile: El Chaparral, «Power Technology,» [En línea]. Available: <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-el-chaparral-el-salvador/?cf-view>.
- [6] «Portal de Transparencia Fiscal,» Gobierno de El Salvador, [En línea]. Available: <https://acortar.link/5DXqip>.
- [7] «Unidad de Transacciones,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/LekMiM>.
- [8] E. G. Power, «Embalse,» [En línea]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/embalse>.
- [9] C. E. H. D. R. Lempa, «Futura Hidroeléctrica 3 de Febrero inició el llenado de su embalse,» [En línea]. Available: <https://www.cel.gob.sv/futura-hidroelectrica-3-de-febrero-inicio-el-llenado-de-su-embalse/>.
- [10] «Clima ecuatorial lluvioso,» Wikipedia, [En línea]. Available: <https://acortar.link/K5tB7h>.
- [11] «Temporada de huracanes en el Atlántico,» Wikipedia, [En línea]. Available: <https://acortar.link/AbNtdP>.
- [12] «Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales,» Ministerio de Medio Ambiente, [En línea]. Available: <https://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/informes+espe>.
- [13] «Radar Meteorológico El Salvador,» Ministerio de Medio Ambiente, [En línea]. Available: <https://www.snet.gob.sv/googlemaps/radares/radaresSV8.php>.
- [14] «Sentinel-1,» European Space Agency, [En línea]. Available: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>.
- [15] «S1 Handbook,» Copernicus ESA, [En línea]. Available: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-1>.
- [16] «Copernicus Sentinel-1,» [En línea]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4603794/Sentinel-1-infographic.pdf>.
- [17] E. Podest y S. McCartney, «SAR para el Mapeo de Inundaciones Utilizando,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/xaWVhn>.
- [18] A. Bannari, A. El-Battay, A. Saquaque y A. Miri, «PALSAR-FBS L-HH Mode and Landsat-TM Data Fusion for Geological Mapping,» 2016. [En línea]. Available: <https://scirp.org/journal/paperinformation?paperid=72143>.
- [19] S. W. McCandless y C. R. Jackson, «Principles of Synthetic Aperture Radar,» [En línea]. Available: https://www.sarusersmanual.com/ManualPDF/NOAASARManual_CH01_pg001-024.pdf.
- [20] «Adquisición de datos Sentinel-1,» European Space Agency, [En línea]. Available: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/copernicus/sentinel-1/acquisition-plans>.
- [21] C. -. ESA, «Sentinel-2,» [En línea]. Available: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>.
- [22] E. D. ANALYTICS, «Índice De Agua De Diferencia Normalizada,» [En línea]. Available: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>.
- [23] «Code Earth Engine,» Google, [En línea]. Available: <https://code.earthengine.google.com/>.

- [24] J. Alas y P. Hernández, «Código para serie de tiempo El Chaparral,» GEE, [En línea]. Available: <https://code.earthengine.google.com/4abfbcdaa6708366ff111278df1cb4c5>.
- [25] J. B. Luna, «Presa El Chaparral está vacía por grave filtración de agua en casa de máquinas,» 21 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://acortar.link/rHDg17>.
- [26] «Otsu's method for image thresholding explained and implemented,» [En línea]. Available: <https://muthu.co/otsus-method-for-image-thresholding-explained-and-implemented/>.
- [27] E. G. Power, «Embalse,» [En línea]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/embalse>.

ANEXOS.

ANEXO 1. Niveles de Embalse dados por la Unidad de Transacciones.

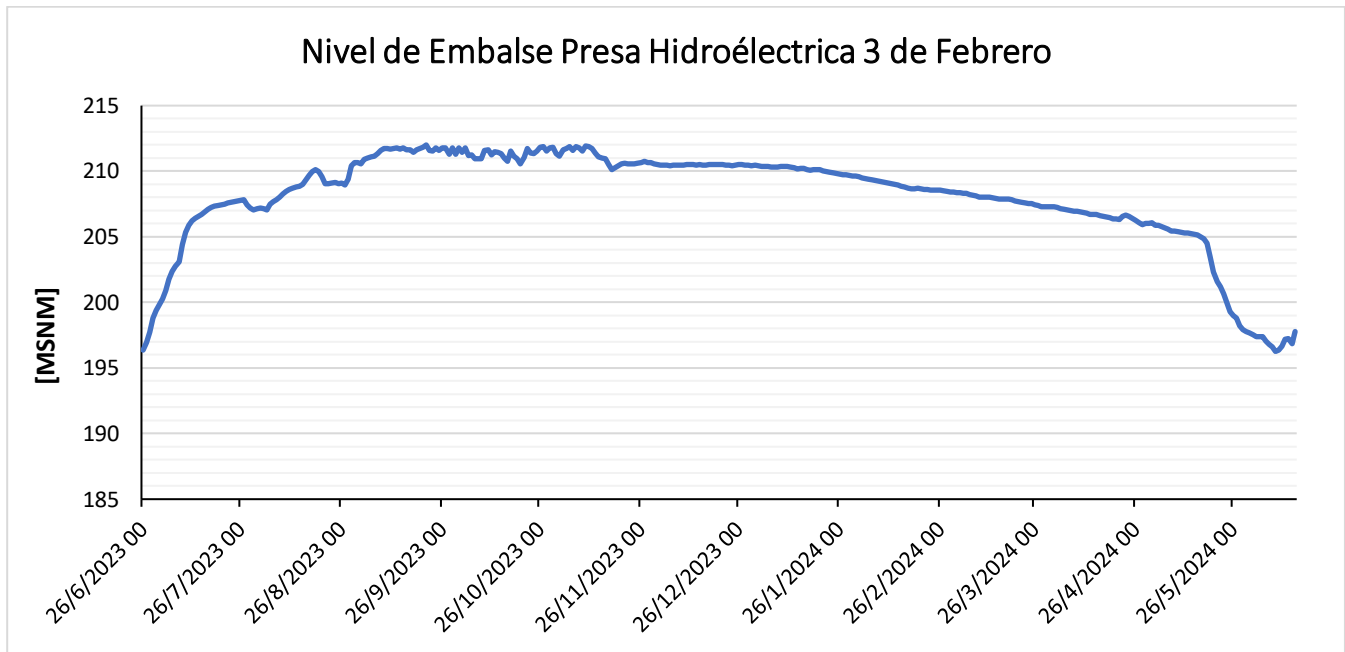


Figura 38. Nivel de embalse Presa 3 de Febrero en msnm.

Tabla 8. Promediado de cada mes a las 00:00 horas del nivel de embalse 3 de Febrero.

Promediado nivel de embalse por mes a las 00:00 horas	
Mes/Año/Hora	Nivel embalse [msnm]
junio/2023 00:00	197.85
julio/2023 00:00	205.82
agosto/2023 00:00	208.92
septiembre/2023 00:00	211.55
octubre/2023 00:00	211.34
noviembre/2023 00:00	211.07
diciembre/2023 00:00	210.49
enero/2024 00:00	210.12
febrero/2024 00:00	208.89
marzo/2024 00:00	207.86
abril/2024 00:00	206.65
mayo/2024 00:00	203.14
junio/2024 00:00	197.01

ANEXO 2. Datos obtenidos de Pluviómetro Osicala y Santiago de María.

Tabla 9. Lluvia acumulada en mm Pluviómetro Santiago de María.

Santiago de María	
Fecha	Lluvia (mm)
10/1/2023	0.2
10/3/2023	0.5
11/3/2023	15.1
15/3/2023	0.1
16/3/2023	0.3
18/3/2023	10.5
20/3/2023	4.9
17/4/2023	0.4
25/4/2023	15.9
27/4/2023	1.0
4/5/2023	0.8
12/5/2023	7.5
13/5/2023	3.8
14/5/2023	4.4
15/5/2023	1.9
19/5/2023	6.2
20/5/2023	1.4
25/5/2023	2.2
26/5/2023	13.1
27/5/2023	0.4
29/5/2023	0.2
30/5/2023	9.6
31/5/2023	0.3
1/6/2023	1.6
2/6/2023	1.0
4/6/2023	1.2
5/6/2023	8.3
7/6/2023	3.7
8/6/2023	4.8
11/6/2023	47.6
13/6/2023	44.2
14/6/2023	5.4
16/6/2023	17.7
17/6/2023	0.7
18/6/2023	4.2
19/6/2023	19.2
21/6/2023	37.1

Santiago de María	
Fecha	Lluvia (mm)
22/6/2023	3.0
23/6/2023	7.9
24/6/2023	33.4
26/6/2023	0.2
27/6/2023	22.5
28/6/2023	0.8
2/7/2023	19.0
3/7/2023	2.3
4/7/2023	6.9
5/7/2023	19.6
7/7/2023	10.7
8/7/2023	27.5
9/7/2023	4.1
13/7/2023	0.2
14/7/2023	0.6
16/7/2023	22.8
29/7/2023	63.9
30/7/2023	23.8
31/7/2023	41.4
1/8/2023	14.4
2/8/2023	26.1
3/8/2023	3.4
12/8/2023	14.2
13/8/2023	4.8
14/8/2023	7.8
15/8/2023	59.2
16/8/2023	2.7
18/8/2023	5.2
21/8/2023	9.4
22/8/2023	22.7
23/8/2023	84.6
24/8/2023	29.6
25/8/2023	3.8
26/8/2023	0.1
27/8/2023	0.4
28/8/2023	19.9
29/8/2023	1.3

Santiago de María	
Fecha	Lluvia (mm)
30/8/2023	0.9
2/9/2023	17.5
3/9/2023	0.3
4/9/2023	1.4
6/9/2023	23.5
8/9/2023	16.6
9/9/2023	0.3
11/9/2023	12.3
12/9/2023	1.0
13/9/2023	19.0
14/9/2023	18.4
15/9/2023	1.8
16/9/2023	15.9
17/9/2023	0.6
18/9/2023	12.8
20/9/2023	14.2
21/9/2023	49.1
23/9/2023	0.4
24/9/2023	60.8
25/9/2023	21.3
26/9/2023	1.4
27/9/2023	18.4
28/9/2023	0.5
29/9/2023	5.8
30/9/2023	1.2
1/10/2023	6.9
2/10/2023	5.4
3/10/2023	12.2
4/10/2023	22.0
6/10/2023	26.7
7/10/2023	14.4

Santiago de María	
Fecha	Lluvia (mm)
8/10/2023	68.4
9/10/2023	9.3
10/10/2023	46.0
11/10/2023	9.7
12/10/2023	15.9
13/10/2023	3.1
14/10/2023	5.7
16/10/2023	5.9
17/10/2023	7.4
20/10/2023	13.2
21/10/2023	8.5
22/10/2023	1.0
23/10/2023	2.8
24/10/2023	1.6
25/10/2023	38.5
26/10/2023	0.2
27/10/2023	9.0
28/10/2023	0.2
30/10/2023	13.7
31/10/2023	28.8
1/11/2023	102.5
2/11/2023	1.5
3/11/2023	5.1
6/11/2023	23.7
7/11/2023	5.5
8/11/2023	34.8
9/11/2023	26.9
13/11/2023	0.3
15/11/2023	0.9
17/11/2023	6.9
31/12/2023	0.6

Tabla 10. Lluvia acumulada en mm Pluviómetro Osicala.

Osicala	
Fecha	lluvia (mm)
15/3/2023	30.8
16/3/2023	6.6
19/3/2023	12.0
20/3/2023	30.4
18/4/2023	0.6
22/4/2023	34.0
24/4/2023	16.8
25/4/2023	56.4
27/4/2023	36.6
2/5/2023	4.6
4/5/2023	2.0
5/5/2023	0.2
12/5/2023	9.0
13/5/2023	0.2
14/5/2023	0.8
16/5/2023	1.0
19/5/2023	11.6
20/5/2023	0.2
22/5/2023	3.6
23/5/2023	0.2
26/5/2023	39.0
29/5/2023	8.8
30/5/2023	96.2
31/5/2023	0.2
1/6/2023	54.8
2/6/2023	8.0
3/6/2023	8.4
4/6/2023	7.0
5/6/2023	28.4
7/6/2023	2.2
8/6/2023	4.8
9/6/2023	8.2
12/6/2023	24.2
13/6/2023	4.6
14/6/2023	20.2
16/6/2023	16.2
18/6/2023	14.4
19/6/2023	2.0

Osicala	
Fecha	lluvia (mm)
22/6/2023	2.4
23/6/2023	10.2
24/6/2023	15.8
26/6/2023	24.6
27/6/2023	8.4
28/6/2023	31.6
29/6/2023	1.0
2/7/2023	14.8
3/7/2023	25.6
4/7/2023	4.8
5/7/2023	30.0
7/7/2023	24.2
8/7/2023	40.6
9/7/2023	16.8
14/7/2023	1.8
16/7/2023	3.2
23/7/2023	12.6
29/7/2023	49.2
30/7/2023	19.8
31/7/2023	24.8
1/8/2023	30.2
2/8/2023	21.0
3/8/2023	28.8
7/8/2023	17.8
9/8/2023	34.6
10/8/2023	0.2
13/8/2023	5.0
15/8/2023	23.4
16/8/2023	12.4
17/8/2023	0.6
18/8/2023	6.2
21/8/2023	4.6
22/8/2023	9.4
23/8/2023	0.6
24/8/2023	36.4
25/8/2023	13.0
27/8/2023	12.8
28/8/2023	34.0

Osicala	
Fecha	lluvia (mm)
29/8/2023	4.6
1/9/2023	26.6
2/9/2023	3.4
3/9/2023	10.2
4/9/2023	19.0
5/9/2023	1.4
6/9/2023	18.0
7/9/2023	0.6
8/9/2023	0.4
9/9/2023	0.2
11/9/2023	24.0
12/9/2023	0.8
13/9/2023	31.8
14/9/2023	48.8
15/9/2023	12.8
16/9/2023	1.4
18/9/2023	3.0
20/9/2023	16.8
21/9/2023	59.2
22/9/2023	9.0
23/9/2023	3.6
24/9/2023	30.0
25/9/2023	19.8
26/9/2023	41.2
27/9/2023	35.8
28/9/2023	1.6
29/9/2023	20.2
30/9/2023	20.0
1/10/2023	0.2
2/10/2023	11.0
3/10/2023	6.8
4/10/2023	18.4
7/10/2023	1.8
8/10/2023	54.0
9/10/2023	7.6
10/10/2023	70.8
11/10/2023	3.2
12/10/2023	1.8
15/10/2023	0.6
16/10/2023	10.8
17/10/2023	7.0

Osicala	
Fecha	lluvia (mm)
20/10/2023	0.6
21/10/2023	46.8
22/10/2023	42.4
23/10/2023	2.4
24/10/2023	17.2
25/10/2023	31.4
26/10/2023	0.2
27/10/2023	15.8
28/10/2023	4.0
30/10/2023	46.6
31/10/2023	6.0
1/11/2023	26.4
2/11/2023	1.0
3/11/2023	0.8
4/11/2023	3.0
5/11/2023	1.4
6/11/2023	35.2
7/11/2023	34.6
8/11/2023	71.6
9/11/2023	24.2
10/11/2023	0.2
15/11/2023	3.0
17/11/2023	0.4

ANEXO 3. Lectura Imágenes Sentinel-1

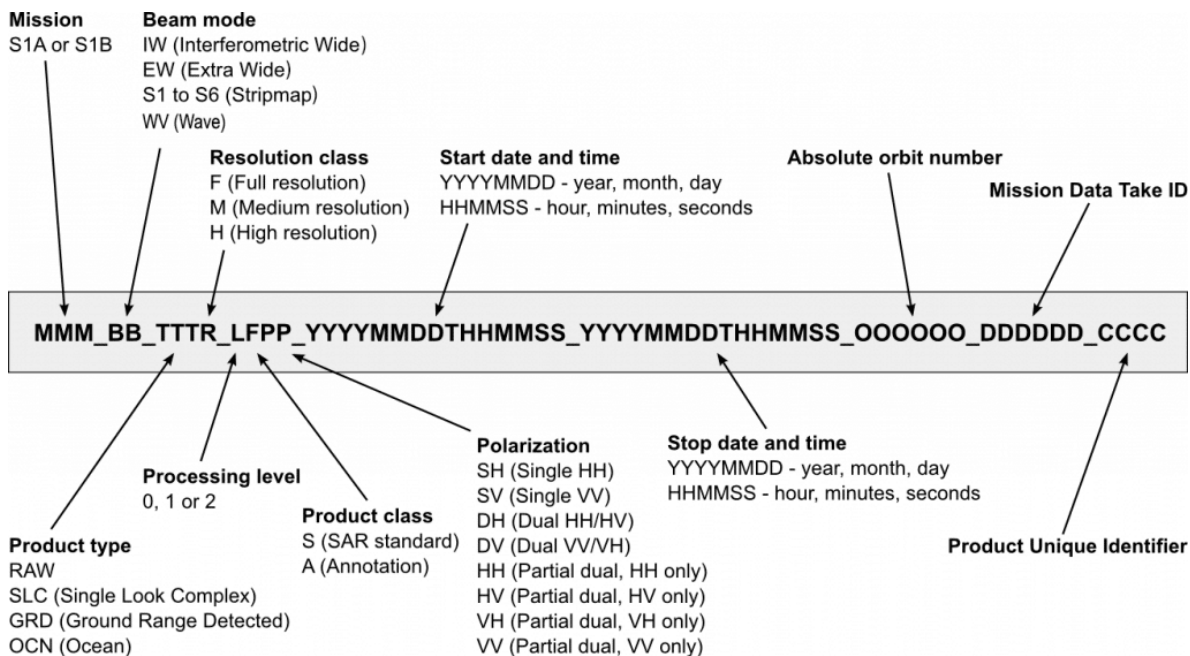


Figura 39. Infografía de lectura imagen SAR.

Tabla 11. Código de imágenes SAR Órbita Descendente.

ID	Fecha	Código
0	20221020	20221020T114649_20221020T114711_045525_05715D_4BB8
1	20221219	20221219T114648_20221219T114710_046400_058F02_076F
2	20230124	20230124T114646_20230124T114708_046925_05A0B8_A3E8
3	20230313	20230313T114645_20230313T114707_047625_05B84E_423B
4	20230418	20230418T114646_20230418T114708_048150_05CA04_3266
5	20230512	20230512T114647_20230512T114709_048500_05D589_FA6E
6	20230524	20230524T114648_20230524T114710_048675_05DAB9_7FCD
7	20230617	20230617T114649_20230617T114711_049025_05E545_3BE2
8	20230629	20230629T114649_20230629T114712_049200_05EA92_06ED
9	20230711	20230711T114651_20230711T114713_049375_05F001_E6BF
10	20230723	20230723T114651_20230723T114714_049550_05F554_D7F3
11	20230804	20230804T114653_20230804T114715_049725_05FABB_440B
12	20230816	20230816T114653_20230816T114715_049900_060098_9DOC
13	20230828	20230828T114653_20230828T114716_050075_060695_078B
14	20230909	20230909T114654_20230909T114716_050250_060C87_F927
15	20230921	20230921T114654_20230921T114716_050425_061279_6E2A
16	20231003	20231003T114655_20231003T114717_050600_061882_7D9C
17	20231015	20231015T114655_20231015T114717_050775_061E85_C709

ID	Fecha	Código
18	20231027	20231027T114655_20231027T114717_050950_062471_A91D
19	20231108	20231108T114654_20231108T114716_051125_062A79_46F7
20	20231120	20231120T114654_20231120T114716_051300_063088_7B3C
21	20231202	20231202T114653_20231202T114716_051475_063683_5094
22	20231214	20231214T114653_20231214T114715_051650_063CA6_E72C
23	20231226	20231226T114652_20231226T114714_051825_0642AF_846A
24	20240107	20240107T114652_20240107T114714_052000_0648B0_8BB6
25	20240131	20240131T114651_20240131T114713_052350_065487_A7B6
26	20240212	20240212T114650_20240212T114712_052525_065A6C_2B62
27	20240224	20240224T114647_20240224T114710_052700_06605E_9518
28	20240307	20240307T114647_20240307T114710_052875_066659_9646
29	20240319	20240319T114648_20240319T114710_053050_066C9D_104D
30	20240331	20240331T114648_20240331T114711_053225_067342_5DE3
31	20240412	20240412T114647_20240412T114709_053400_067A28_146A
32	20240424	20240424T114649_20240424T114711_053575_068104_7403
33	20240506	20240506T114649_20240506T114711_053750_0687ED_0F8C
34	20240518	20240518T114649_20240518T114711_053925_068E06_0EF5
35	20240530	20240530T114649_20240530T114711_054100_06941A_9B80

Tabla 12. Código de imágenes SAR Órbita Ascendente.

ID	Fecha	Código
0	20221004	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221004T000601_20221004T000626_045285_0569E6_EDDB
1	20221028	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221028T000601_20221028T000626_045635_0574EF_DEB2
2	20221109	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221109T000601_20221109T000626_045810_057AE0_3697
3	20221121	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221121T000601_20221121T000626_045985_0580C1_2939
4	20221203	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221203T000600_20221203T000625_046160_0586B8_15C6
5	20221215	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221215T000559_20221215T000624_046335_058CAD_1957
6	20221227	S1A_IW_GRDH_1SDV_20221227T000559_20221227T000624_046510_0592A8_C178
7	20230108	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230108T000558_20230108T000623_046685_059887_64D9
8	20230120	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230120T000558_20230120T000623_046860_059E70_CF73
9	20230213	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230213T000557_20230213T000622_047210_05AA29_569B
10	20230225	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230225T000557_20230225T000622_047385_05B01F_443D
11	20230309	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230309T000557_20230309T000622_047560_05B60C_B8AA
12	20230321	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230321T000557_20230321T000622_047735_05BBF8_8BB7
13	20230402	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230402T000558_20230402T000623_047910_05C1D3_0307
14	20230414	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230414T000558_20230414T000623_048085_05C7C2_9465
15	20230426	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230426T000558_20230426T000623_048260_05CDA0_71CC
16	20230508	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230508T000559_20230508T000624_048435_05D37D_7A16
17	20230520	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230520T000600_20230520T000625_048610_05D8B1_5917
18	20230601	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230601T000600_20230601T000625_048785_05DDEF_19E5
19	20230613	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230613T000601_20230613T000626_048960_05E33A_7F35
20	20230625	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230625T000602_20230625T000627_049135_05E88E_B68C

ID	Fecha	Código
21	20230707	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230707T000602_20230707T000627_049310_05EDEE_AC6E
22	20230719	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230719T000603_20230719T000628_049485_05F351_32D1
23	20230731	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230731T000604_20230731T000629_049660_05F8B8_F679
24	20230812	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230812T000604_20230812T000629_049835_05FE51_6D88
25	20230824	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230824T000605_20230824T000630_050010_060447_4FC9
26	20230905	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230905T000606_20230905T000631_050185_060A4C_5D85
27	20230917	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230917T000606_20230917T000631_050360_061036_6CF6
28	20230929	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230929T000606_20230929T000631_050535_061631_18F2
29	20231023	S1A_IW_GRDH_1SDV_20231023T000606_20231023T000631_050885_062229_C345
30	20231104	S1A_IW_GRDH_1SDV_20231104T000606_20231104T000631_051060_06282A_EE25
31	20231116	S1A_IW_GRDH_1SDV_20231116T000606_20231116T000631_051235_062E37_DD48
32	20231128	S1A_IW_GRDH_1SDV_20231128T000605_20231128T000630_051410_063440_A6C0
33	20231210	S1A_IW_GRDH_1SDV_20231210T000605_20231210T000630_051585_063A4E_AECE
34	20231222	S1A_IW_GRDH_1SDV_20231222T000604_20231222T000629_051760_064068_CAC2
35	20240103	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240103T000603_20240103T000628_051935_064664_0B52
36	20240115	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240115T000603_20240115T000628_052110_064C5C_B47F
37	20240127	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240127T000603_20240127T000628_052285_06523F_4A90
38	20240208	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240208T000602_20240208T000627_052460_065826_ADD3
39	20240220	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240220T000602_20240220T000627_052635_065E19_8DC8
40	20240303	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240303T000602_20240303T000627_052810_066410_9465
41	20240315	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240315T000602_20240315T000627_052985_066A09_A0E1
42	20240327	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240327T000602_20240327T000627_053160_0670C2_B9FF
43	20240408	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240408T000603_20240408T000628_053335_067782_D37C
44	20240420	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240420T000603_20240420T000628_053510_067E71_F186
45	20240502	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240502T000604_20240502T000629_053685_06854A_7495
46	20240502	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240502T000604_20240502T000629_053685_06854A_AA43
47	20240514	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240514T000603_20240514T000628_053860_068BCC_2011
48	20240526	S1A_IW_GRDH_1SDV_20240526T000604_20240526T000629_054035_0691CC_9C74

ANEXO 4. Imágenes SAR con distintas órbitas y polarizaciones

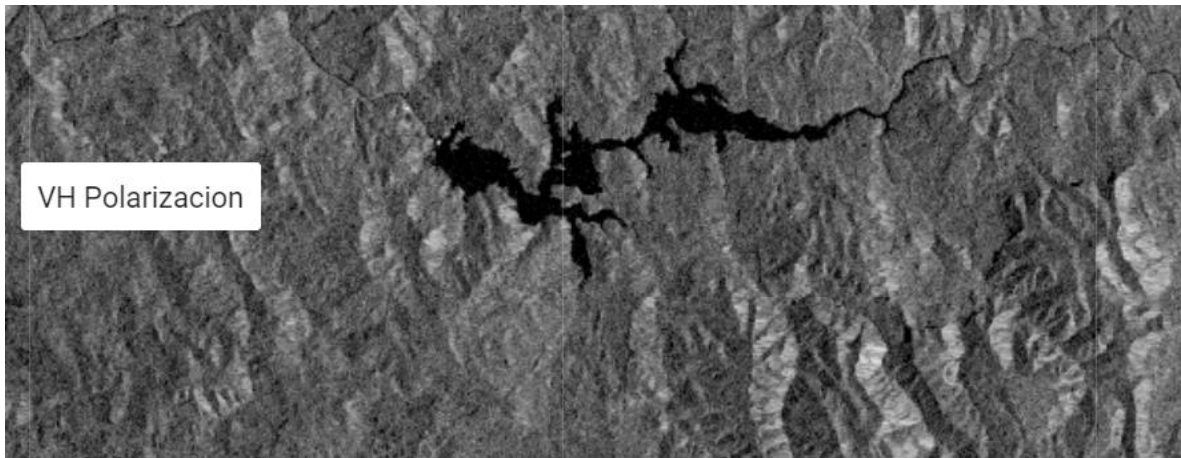


Figura 40. Polarización VH órbita descendente.

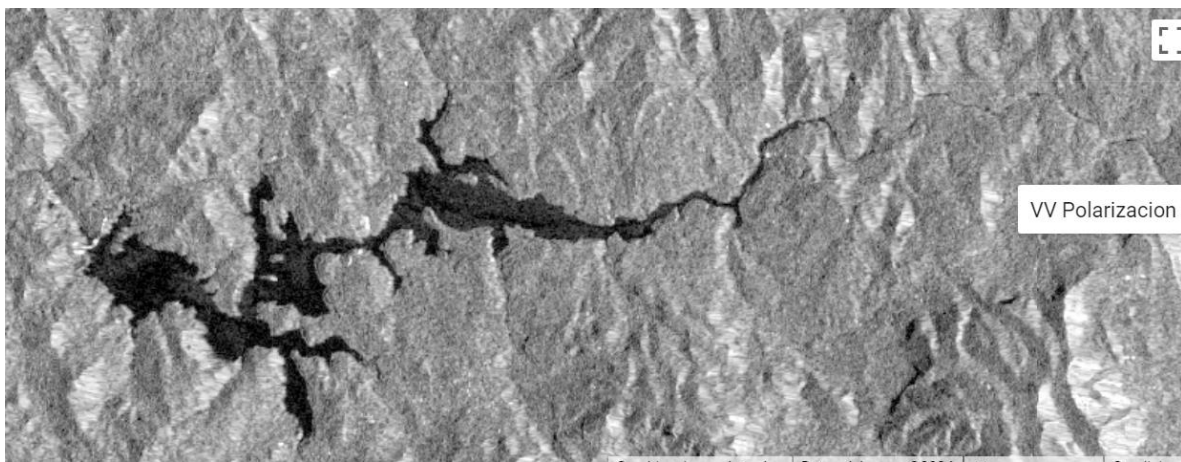


Figura 41. Polarización VV órbita descendente.

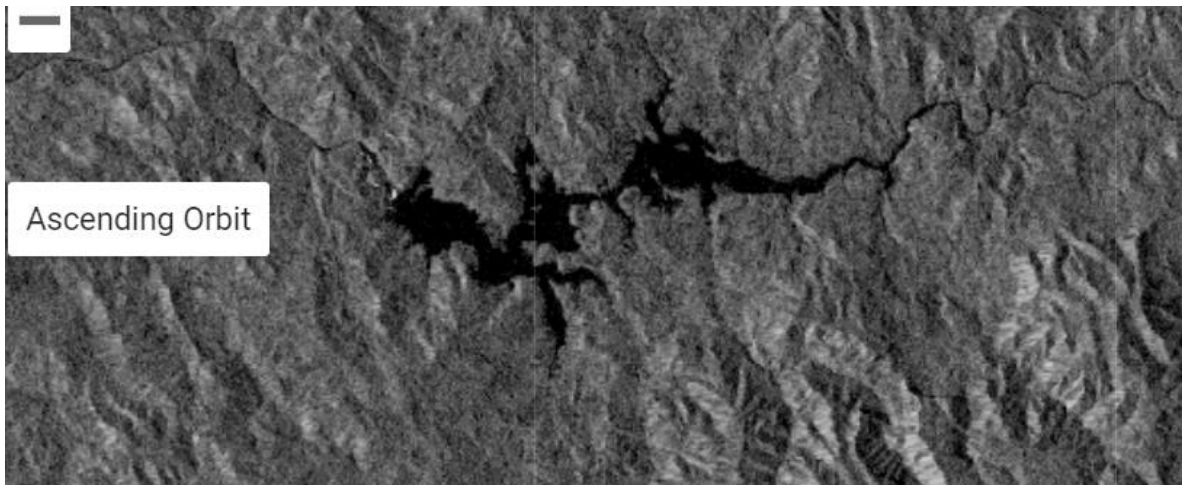


Figura 42. Imagen SAR 04/10/2022 órbita ascendente polarización VH.

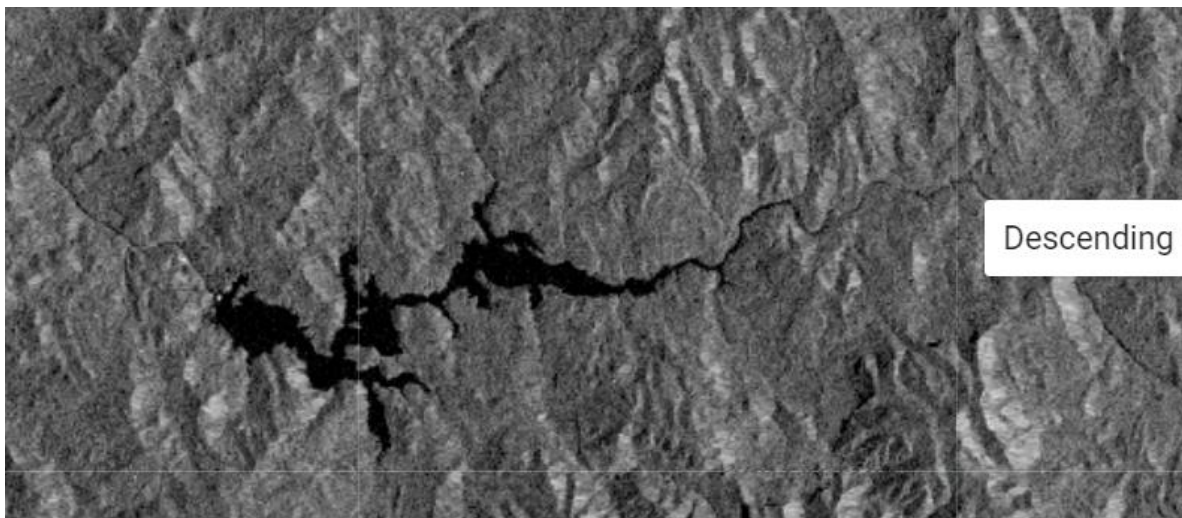


Figura 43. Imagen SAR 20/10/2022 órbita descendente polarización VH.