

DOI: 10.35319/acta-nova.20232

ACTA NOVA Revista de Ciencias y Tecnología

¹Universidad Mayor de San Simón -
Facultad de Ciencias y Tecnología -
Laboratorio de Hidráulica,
Cochabamba, Bolivia.

²Universidad Católica Boliviana "San
Pablo", Carrera de Ingeniería Civil,
Cochabamba, Bolivia.

Correspondencia:

Fernando Arturo Ledezma Perizza
fernandoledezma.p@fcyt.umss.edu.bo

Monitoreo de Niveles de Agua en Embalses Utilizando Altimetría Satelital: Estudio de Caso en Cochabamba, Bolivia

*Monitoring Water Levels in Reservoirs Using Satellite
Altimetry:
Case Study in Cochabamba, Bolivia*

Fernando Arturo Ledezma Perizza¹, Mauricio Ledezma Perizza²

Resumen: Este artículo es el resultado de uno de los subproyectos del proyecto "Mejora de la conservación y gestión de la biodiversidad mediante el monitoreo de los impactos ecológicos y sociales de los megaproyectos hidroeléctricos en Bolivia", llevado a cabo en los años 2020 a 2023 por la Universidad Mayor de San Simón, la Universidad Católica Boliviana y la Universidad de Bonn en Alemania.

En este estudio, se destaca la importancia de utilizar imágenes de la misión satelital Sentinel-1, que emplea tecnología de radar de apertura sintética (SAR) para la observación de la Tierra. Esta tecnología permite obtener información continua de los cuerpos de agua durante el día y la noche, así como bajo diversas condiciones ambientales, como la presencia de nubes. Para analizar y mejorar los resultados, se utiliza la diferencia de fase entre las señales de radar, proporcionando información topográfica y de deformación en diferentes modos de polarización (VV y HH). También se utilizan técnicas de correlación y visualización de datos, como mapas y gráficos en color, para facilitar la interpretación de los resultados.

El monitoreo de los niveles de agua en embalses se realiza mediante la interferometría de radar (InSAR), una técnica utilizada por Sentinel-1 para medir los cambios en la superficie de la Tierra. Esta técnica combina imágenes SAR tomadas en diferentes momentos sobre la misma área para crear un interferograma, el cual proporciona mediciones precisas de los cambios en el nivel del lago. Al analizar las series temporales de estos datos, se pueden identificar tendencias a largo plazo y variaciones estacionales, lo que ayuda a comprender la dinámica espacial y temporal de los embalses.

En este artículo se presentan dos casos de estudio de embalses: Corani y Misicuni en Cochabamba, Bolivia. Se dispone de información de monitoreo de niveles de embalses obtenida en el sitio, la cual se correlaciona con los resultados obtenidos mediante la interferometría por radar, mostrando buenos resultados en la comparación de estos datos.

Palabras Clave: Sentinel 1, Monitoreo niveles de agua, InSAR, Corani, Misicuni, Cochabamba

Abstract: This article is the result of one of the sub-projects of the project "Improving the conservation and management of biodiversity by monitoring the ecological and social impacts of hydroelectric megaprojects in Bolivia", carried out in the years 2020 to 2023 by the Universidad Mayor de San Simón, the Bolivian Catholic University, and the University of Bonn in Germany.

In this study, the importance of using images from the Sentinel-1 satellite mission, which employs Synthetic Aperture Radar (SAR) technology for Earth observation, is highlighted. This technology allows continuous information to be obtained from bodies of water during the day and night, as well as under various environmental conditions, such as the presence of clouds. To analyze and improve the results, the phase difference between the radar signals is used, providing topographic and deformation information in different polarization modes (VV and HH). Data correlation and visualization techniques, such as maps and color graphs, are also used to facilitate interpretation of the results.

Monitoring of water levels in reservoirs is done using radar interferometry (InSAR), a technique used by Sentinel-1 to measure changes in the Earth's surface. This technique combines SAR images taken at different times over the same area to create an interferogram, which provides precise measurements of lake level changes. By analyzing the time series of these data, long-term trends and seasonal variations can be identified, helping to understand the spatial and temporal dynamics of reservoirs.

In this article, two case studies of reservoirs are presented: Corani and Misicuni in Cochabamba, Bolivia. Reservoir level monitoring information obtained at the site is available, which is correlated with the results obtained by radar interferometry, showing good results in the comparison of these data.

Keywords: Sentinel 1, Water Level Monitoring, InSAR, Corani, Misicuni, Cochabamba

1 Introducción

Los lagos son fuentes cruciales de agua dulce, y controlar sus niveles permite gestionar de manera efectiva este recurso. En Bolivia, los embalses son fundamentales para el suministro de agua potable y la generación de energía hidroeléctrica. La medición precisa de los niveles de agua en estos embalses es esencial para la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales.

En este contexto, la altimetría satelital se ha convertido en una herramienta valiosa para el monitoreo de los niveles de agua en embalses, especialmente en regiones con dificultades de acceso. La misión Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) ofrece imágenes de radar de apertura sintética (SAR) de alta resolución que son ideales para este propósito.

El monitoreo de los niveles de los lagos mediante imágenes de Sentinel-1 proporciona información crucial para diversos sectores, contribuyendo a la gestión sostenible de los recursos hídricos, la evaluación de riesgos, la conservación ambiental, la gestión y planificación de los recursos hídricos, el monitoreo de inundaciones y sequías, la evaluación del impacto ambiental, la investigación y el modelado del cambio climático.

Los datos precisos sobre los niveles de los lagos son esenciales para el modelado hidrológico, mejorando la predicción de inundaciones, estimación de caudales y evaluación de la disponibilidad de agua (Mason, Schumann, Neal, García-Pintado, & Bates, 2012) (Medina, Gómez-Enri, Alonso, & Villares, 2010)

Además, los niveles de los lagos influyen en la salud y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, afectando la calidad del agua, la disponibilidad de hábitats y la distribución de especies. El monitoreo de los niveles de los lagos contribuye a la conservación y gestión de la biodiversidad acuática (Zeiger et al., 2021).

Los embalses desempeñan un papel crucial en la producción de energía hidroeléctrica, ya que actúan como grandes reservorios de agua que alimentan las turbinas para generar electricidad. La importancia de los niveles de agua en estos embalses radica en su capacidad para regular el flujo hídrico y mantener una producción constante y confiable de energía. Cuando los embalses están en niveles óptimos, es decir, con un volumen adecuado de agua almacenada, se asegura una mayor estabilidad en la generación de energía hidroeléctrica. Además, los embalses permiten aprovechar la energía potencial acumulada en el agua almacenada, liberándola de manera controlada para generar electricidad en

momentos de alta demanda. Sin embargo, es fundamental mantener un equilibrio adecuado en los niveles de agua para evitar tanto situaciones de escasez como inundaciones, lo que implica una gestión cuidadosa y planificada de los recursos hídricos. De esta manera, los embalses desempeñan un papel vital en el suministro de energía limpia y renovable, aportando estabilidad al sistema eléctrico y contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Peng, Feng, Larson, & Hill, 2021) (Qiao, Chu, Tissot, Ali, & Ahmed, 2023) (Zoysa et al., 2023).

Finalmente, los gobiernos, las autoridades del agua y los responsables de formular políticas confían en los datos de nivel del lago para tomar decisiones informadas, permitiendo la asignación óptima de recursos hídricos, la formulación de estrategias de gestión del agua y la implementación de políticas para garantizar un uso sostenible del agua y la conservación del ecosistema (Mission, 2023)

2 Metodología

Para monitorear los niveles de agua en los embalses Corani y Misicuni en Cochabamba, Bolivia, se utilizó la técnica de interferometría de radar (InSAR) con datos de la misión Sentinel-1. A continuación, se describen los pasos clave de la metodología:

2.1 Adquisición de datos

Se adquirieron imágenes SAR de Sentinel-1 en diferentes modos de polarización (VV y HH) para abarcar diversas condiciones de superficie. Estas imágenes fueron obtenidas en intervalos regulares para permitir un monitoreo temporal preciso.

La misión Sentinel-1, parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), tiene como objetivo proporcionar datos de observación de la Tierra para diversas aplicaciones. Consiste en una constelación de dos satélites en órbita polar, Sentinel-1A y Sentinel-1B, que capturan imágenes de radar continuas de alta resolución del terreno (ESA, 2023) (Mission, 2023).

Las características clave de la misión Sentinel-1 son las siguientes:

Los satélites Sentinel-1 están equipados con un instrumento avanzado de radar denominado apertura sintética de radar (SAR) en la banda C, que ilumina la superficie de la Tierra y registra las señales retrodispersadas para obtener imágenes de radar de alta resolución.

Una ventaja destacada de Sentinel-1 es su capacidad para adquirir datos en cualquier condición climática,

incluyendo la penetración de nubes, lluvia y oscuridad, lo que permite un monitoreo continuo.

Sentinel-1 captura datos SAR en diferentes modos de polarización, como transmisión vertical-recepción vertical (VV) y transmisión horizontal-recepción horizontal (HH), lo que mejora la información capturada y permite una mejor discriminación de las características de la superficie.

Los satélites Sentinel-1 siguen una órbita sincronizada con el sol, lo que les permite cubrir sistemáticamente todo el globo y proporcionar cobertura global con una alta frecuencia de revisitas.

Los datos de Sentinel-1 son especialmente útiles para el análisis SAR interferométrico (InSAR), que mide las diferencias de fase entre imágenes para medir deformaciones superficiales, realizar mapeos topográficos y detectar cambios (Engine);, 2023) (Frappart et al., 2021).

Los datos de Sentinel-1 están disponibles de forma gratuita y abierta al público, lo que promueve su acceso y

utilización por parte de la comunidad científica, agencias gubernamentales y entidades comerciales, fomentando la innovación y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Los objetivos principales de la misión Sentinel-1 son proporcionar datos confiables y oportunos para aplicaciones operativas y monitoreo ambiental a largo plazo, contribuyendo a los esfuerzos globales para comprender y gestionar los recursos, el clima y los peligros naturales de nuestro planeta.

En resumen, la misión Sentinel-1 es un valioso activo para el monitoreo y análisis de la superficie terrestre a escala global, gracias a su capacidad de generación de imágenes SAR, su cobertura para todo clima, su frecuencia de revisita global y su política de datos abiertos.

La Figura 1 muestra las características de adquisición del sistema de satélites Sentinel 1.

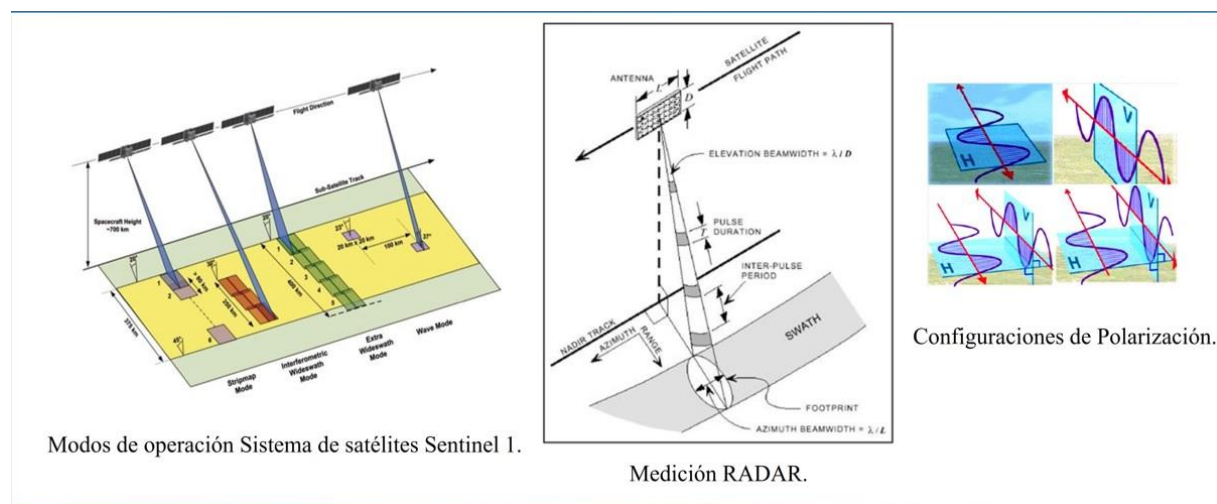


Figura 1: Características de adquisición del sistema de satélites Sentinel 1

2.2 Interferometría de radar

La interferometría de radar, también conocida como InSAR, es una técnica empleada en sistemas como Sentinel-1 para el monitoreo de niveles de agua en embalses. Esta técnica utiliza la coherencia de las ondas de radar para medir los cambios en la fase de las ondas a medida que se propagan desde el satélite hacia la superficie del agua y regresan (Nguyen et al., 2023; Raspini, 2020)

El proceso implica adquirir dos o más imágenes SAR de la misma área del embalse, tomadas en diferentes momentos o desde posiciones ligeramente diferentes.

Estas imágenes se comparan píxel por píxel para analizar la diferencia de fase y extraer información sobre los cambios en los niveles de agua.

La interferometría de radar permite una monitorización continua y precisa de los niveles de agua en el embalse, incluso en condiciones climáticas adversas o en áreas de difícil acceso. Es especialmente útil en la gestión de recursos hídricos y la planificación de la distribución del agua, proporcionando información crucial para evaluar la disponibilidad de agua, gestionar el riego agrícola, el suministro de agua potable y la generación de energía hidroeléctrica. (Abdalla et al., 2021) (Créaux & Birkett, 2006)

2.3 Procesamiento de Datos:

Se aplicó la técnica InSAR para crear interferogramas a partir de las imágenes SAR. Los interferogramas son representaciones de las diferencias en la fase de las señales de radar entre dos momentos en el tiempo. Estas diferencias de fase están relacionadas con cambios en la topografía y el nivel del agua.

El procesamiento de análisis InSAR se realizó utilizando el software SNAP para el monitoreo de los niveles de embalses.

Este proceso incluye los siguientes pasos:

Adquisición de imágenes SAR: Se utilizan imágenes SAR del área del embalse capturadas por el satélite Sentinel-1 en diferentes momentos, con un intervalo de tiempo adecuado para capturar los cambios en los niveles del embalse.

Preprocesamiento de los datos SAR: Las imágenes SAR se someten a preprocesamiento para corregir errores del sensor, distorsiones geométricas y efectos atmosféricos. Esto puede implicar la calibración radiométrica, la corrección del terreno y la eliminación de artefactos o ruido.

Registro conjunto: Se realiza un registro conjunto de las imágenes SAR adquiridas para garantizar una alineación precisa. Esto implica alinear geoméricamente las imágenes en un sistema de coordenadas común, teniendo en cuenta cualquier distorsión geométrica o movimiento entre las adquisiciones.

Generación de interferograma: Se genera un interferograma utilizando las imágenes SAR registradas conjuntamente. Esto se logra calculando la diferencia de fase entre las imágenes para cada píxel, lo cual representa los cambios en la distancia recorrida por las ondas de radar debido a los cambios en la altura de la superficie del embalse.

Desenvolvimiento de fase: Para obtener valores de fase absolutos y medir con precisión los cambios en los niveles del embalse, se realiza un proceso de desenvolvimiento de fase. Esto elimina las ambigüedades de 2π y reconstruye los valores de fase continuos.

Conversión de fase a altura: Los valores de fase desenvueltos se convierten en medidas de altura utilizando información de calibración y modelos de corrección atmosférica. Estas medidas representan los cambios en la elevación de la superficie del embalse.

Análisis e interpretación: Se analizan las medidas de altura derivadas para monitorear los cambios en los niveles del embalse. Los valores positivos indican un aumento en los niveles y los valores negativos indican un descenso. Estas mediciones se utilizan para evaluar la tasa de cambio,

identificar áreas de interés y comprender la dinámica del embalse.

Además, al repetir el análisis InSAR en múltiples intervalos de tiempo, se puede generar una serie temporal de cambios en el nivel del embalse, lo que proporciona información valiosa sobre el comportamiento a largo plazo y las fluctuaciones.

La interpretación y visualización de los resultados incluyen la generación de mapas, el análisis de series temporales y el uso de diversas técnicas de visualización. Estos enfoques son esenciales para comprender la dinámica de los cambios en los niveles del embalse y comunicar los resultados de manera efectiva a las partes interesadas y responsables de la gestión de recursos hídricos (Enguehard et al., 2023).

2.4 Descripción general de los casos de estudio - Embalses Corani y Misicuni

2.4.1 Embalse Corani

La Central Hidroeléctrica Corani es la más antigua de Bolivia, ubicada en la provincia de Chapare, Cochabamba. Desde su puesta en operación en 1967, aprovecha la cascada del río Paracti, situado a unos 76 km de la ciudad de Cochabamba, a una altitud de 2600 m s. n. m. (Corani, 2023)

El funcionamiento de la Central Hidroeléctrica Corani, así como de otras centrales hidroeléctricas de la cuenca, como Santa Isabel, San José 1, San José 2 y futuras construcciones, depende del embalse artificial llamado Lago Corani. El lago recibe los caudales de los ríos Corani, Kanko, Candelaria, Tablas, Tholamayú y Kayarani, permitiendo regular el suministro de agua a las centrales hidroeléctricas.

En 1966, el lago Corani tenía una extensión de 1.200 ha y una capacidad de 82 millones de m³. En 1983, se realizó una ampliación que elevó la capacidad a 145 millones de m³, aumentando el nivel de vertedero en 5 m y expandiendo el área inundada a 1.550 ha. También se construyeron túneles y canales para captar las aguas de Pajchahuayco, Kentimayu, Rumichaca, Alisumayu y Cinturillas como parte del desarrollo del sistema Málaga. En 2017, se realizó una batimetría del lago Corani para verificar su capacidad y presencia de sedimentos, estableciendo un volumen de 145 millones de m³.

La Central Hidroeléctrica Corani, con su potencia instalada de 69,45 MW y sus cinco turbinas Pelton, junto con el Lago Corani y los sistemas de aducción, constituye una importante fuente de generación de energía hidroeléctrica en la región, contribuyendo al suministro eléctrico del país.

La Figura 2 presenta imágenes del Embalse Corani.



Figura 2: Embalse Corani

2.4.2 Embalse Misicuni

El Proyecto Múltiple Misicuni tiene como objetivo aprovechar el agua de las cuencas de los ríos Misicuni, Viscachas y Putucuni mediante la construcción de una presa y el trasvase de sus aguas en el Valle Central de Cochabamba. Su propósito principal es mejorar la disponibilidad de agua en la región para promover el desarrollo económico, social y cultural (Misicuni, 2023).

El proyecto ha sido llevado a cabo en distintas etapas, basándose en estudios de factibilidad, diseño y análisis de impacto ambiental realizados por empresas internacionales. También se han implementado programas de participación privada.

El Proyecto Múltiple Misicuni se divide en varias etapas, cada una con objetivos específicos y obras correspondientes. El Plan Inmediato se centra en la producción de 450 L s^{-1} de agua cruda para consumo humano. Las siguientes etapas se enfocan en la producción de agua potable, riego y generación de energía eléctrica.

Las principales obras del proyecto incluyen la construcción de una presa, un túnel principal, un conducto forzado, una casa de máquinas y subestación, un embalse de compensación, canales de riego, sistema de aducción, planta de tratamiento y conducción de agua potable, entre otros. Estas obras se ejecutan en diferentes etapas del proyecto.

La presa se construye en dos etapas, alcanzando una altura final de 120 m. Destaca el embalse de Misicuni, con un volumen útil de 31,5 millones de m^3 en la primera etapa y 154 millones de m^3 en la etapa final. Este embalse es

fundamental, ya que permite almacenar una cantidad significativa de agua para su uso posterior en los diferentes fines previstos.

La Figura 3 presenta imágenes del Embalse Misicuni.



Figura 3: Embalse Misicuni.

3 Datos de mediciones de niveles de embalses

3.1 Mediciones en sitio

Las empresas Corani y Misicuni realizan mediciones diarias de niveles de embalse. Los datos proporcionados abarcan mediciones desde el año 2017 hasta mediados del año 2022.

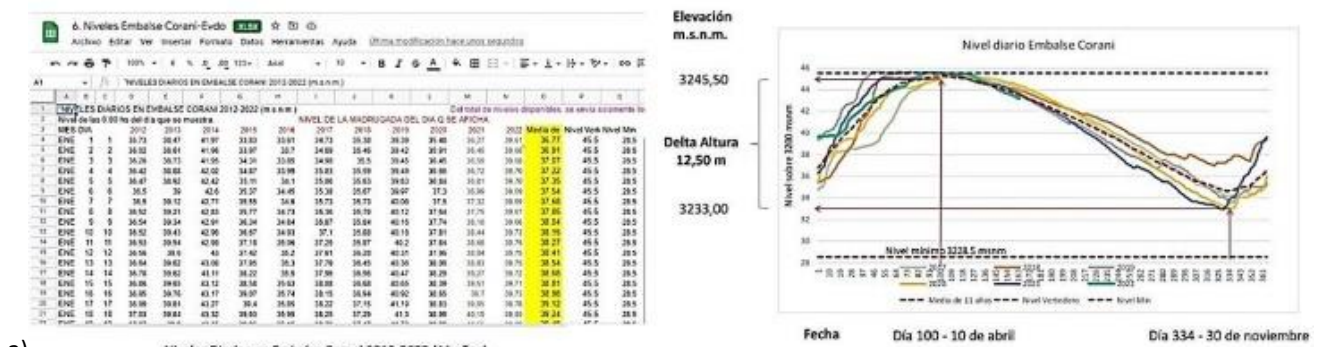
La Figura 4 muestra un registro de datos diarios de los embalses.

3.2 Mediciones mediante Imágenes satelitales Sentinel 1

3.2.1 Análisis Temporal

Se generaron series temporales de interferogramas para cada embalse, lo que permitió observar las fluctuaciones estacionales y de largo plazo en los niveles de agua. El análisis de tendencias proporcionó información valiosa sobre los cambios en el almacenamiento de agua en los embalses.

La Figura 5 muestra un ejemplo de procesamiento de imágenes satelitales de Sentinel 1 para el año 2018 en la que clara mente se identifica la variación de nivel y cuantificación del área correspondiente en el embalse.



a)
b)

Misicuni - REGISTRO COTAS Y VOLUMEN EMBALSE

Fecha	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1 ene	1688.43	1708.88	171.88	1748.64	161.81	1754.04
2 ene	1688.76	1707.08	171.88	1748.64	161.81	1754.21
3 ene	1689.17	1708.69	171.88	1748.64	161.81	1754.38
4 ene	1689.54	1708.79	171.87	1748.74	161.81	1754.58
5 ene	1689.88	1708.84	171.88	1748.78	161.81	1754.82
6 ene	1690.08	1708.92	171.88	1748.82	161.81	1755.18
7 ene	1690.28	1709.02	171.88	1748.82	161.81	1755.47
8 ene	1690.53	1709.19	171.88	1748.82	161.81	1755.78
9 ene	1690.82	1709.38	171.87	1748.82	161.81	1756.12
10 ene	1691.05	1709.58	171.87	1748.82	161.81	1756.51
11 ene	1691.31	1709.78	171.88	1748.82	161.81	1756.94
12 ene	1691.58	1709.98	171.88	1748.82	161.81	1757.41
13 ene	1691.85	1710.18	171.88	1748.82	161.81	1757.91
14 ene	1692.12	1710.38	171.88	1748.82	161.81	1758.44
15 ene	1692.38	1710.58	171.88	1748.82	161.81	1759.01
16 ene	1692.65	1710.78	171.88	1748.82	161.81	1759.61
17 ene	1692.92	1710.98	171.88	1748.82	161.81	1760.24
18 ene	1693.18	1711.18	171.88	1748.82	161.81	1760.91

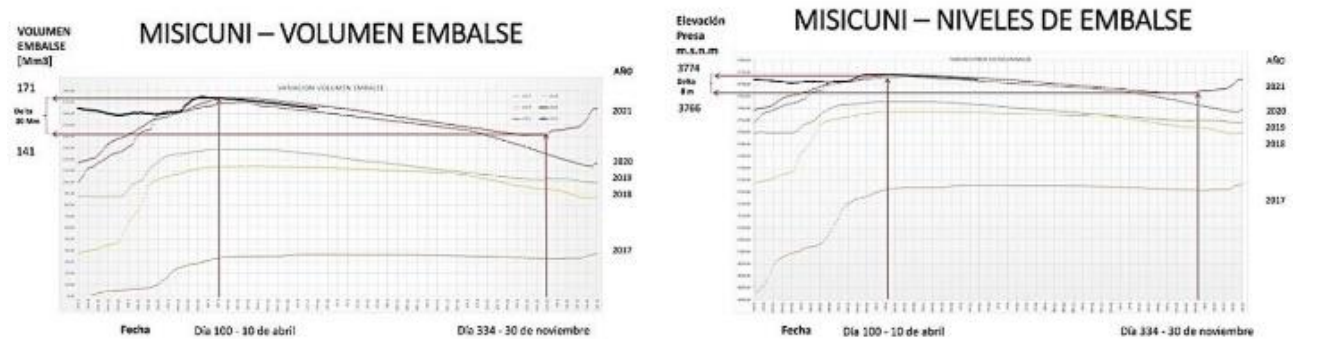
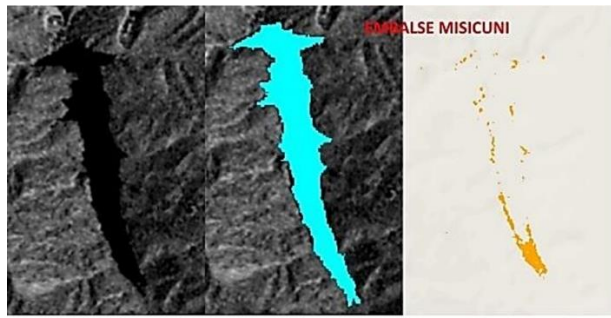


Figura 4: Registro de Datos de niveles diarios de los embalses periodo 2017-2022 a) Corani y b) Misicuni

4 Resultados



Detección de Cambios Altimetría Satelital del mes de Enero - Febrero 2018

Figura 5: Ejemplo de procesamiento de obtención de áreas de niveles de embalse y cuantificación de áreas de Misicuni

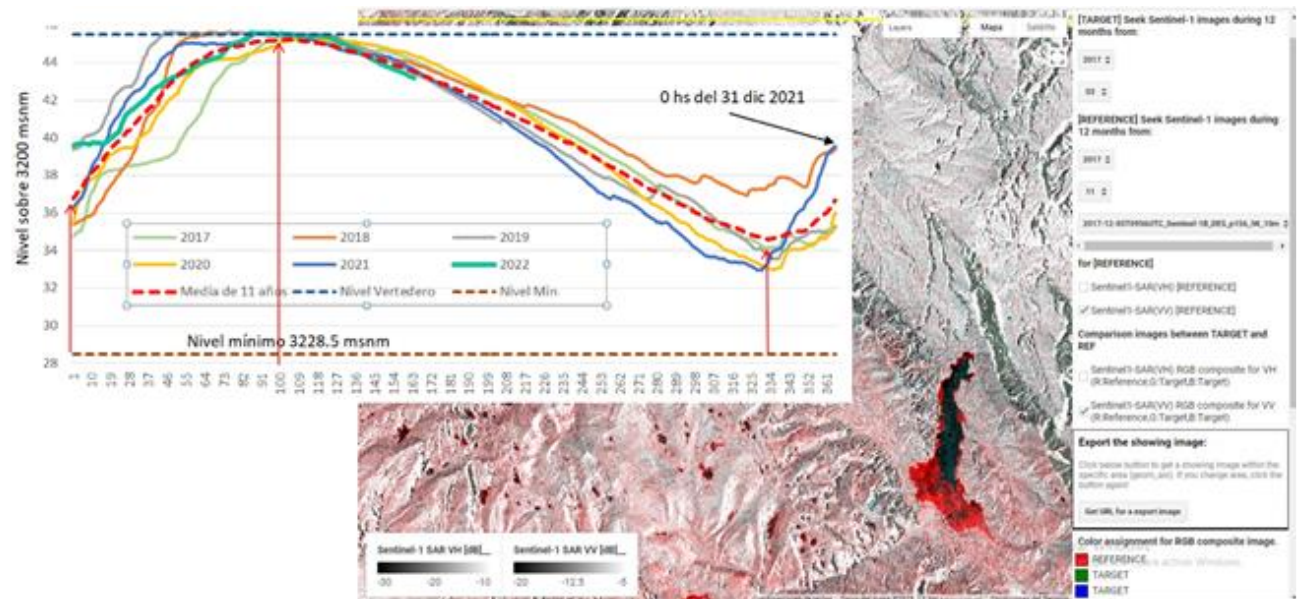
Los resultados del monitoreo de los niveles de agua en los embalses Corani y Misicuni muestran una concordancia notable entre los datos obtenidos mediante InSAR y las mediciones de campo. Se observaron variaciones estacionales consistentes con las precipitaciones y el uso del agua para riego y generación de energía. Además, se identificaron tendencias a largo plazo que pueden ser de interés para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

El comportamiento de los embalses a nivel estacional se identifica que tiene un periodo de recarga desde los meses de diciembre a abril en casa año, debido a las precipitaciones en las cuencas aportantes, y tiene un ciclo de descarga de abril a los primeros días de diciembre.

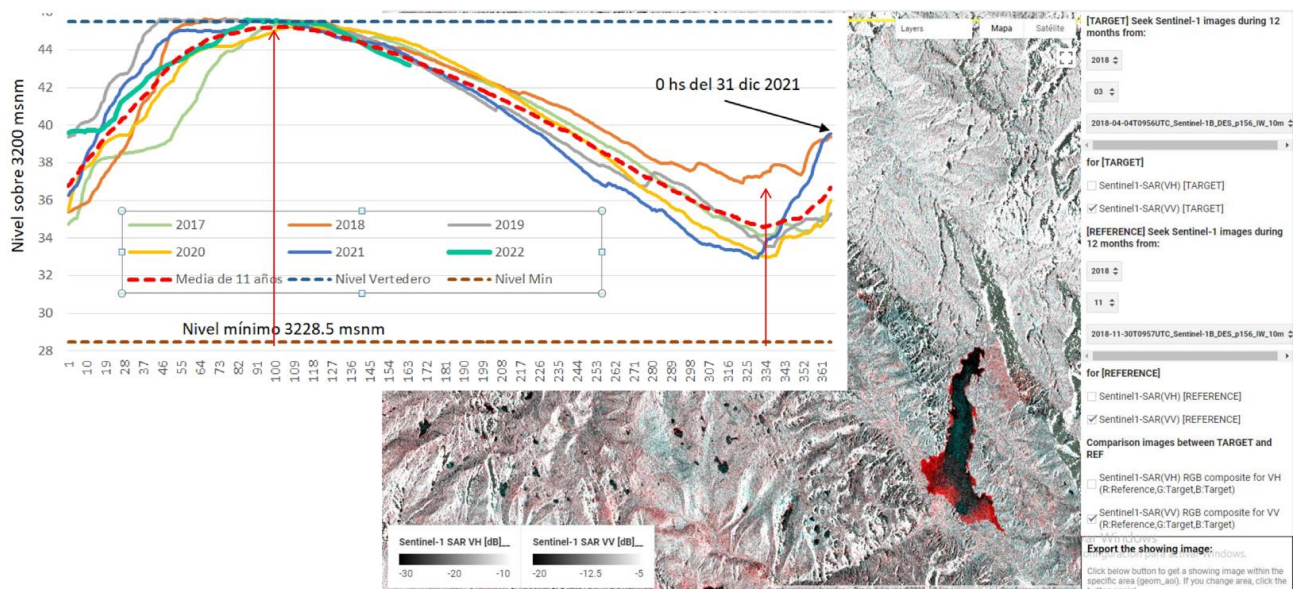
La Figura 6 presenta un conjunto de resultados del procesamiento de imágenes Sentinel 1 más cercanos a estas fechas de abril a diciembre, para los años del 2017-

2022 que permiten identificar las áreas de descarga-

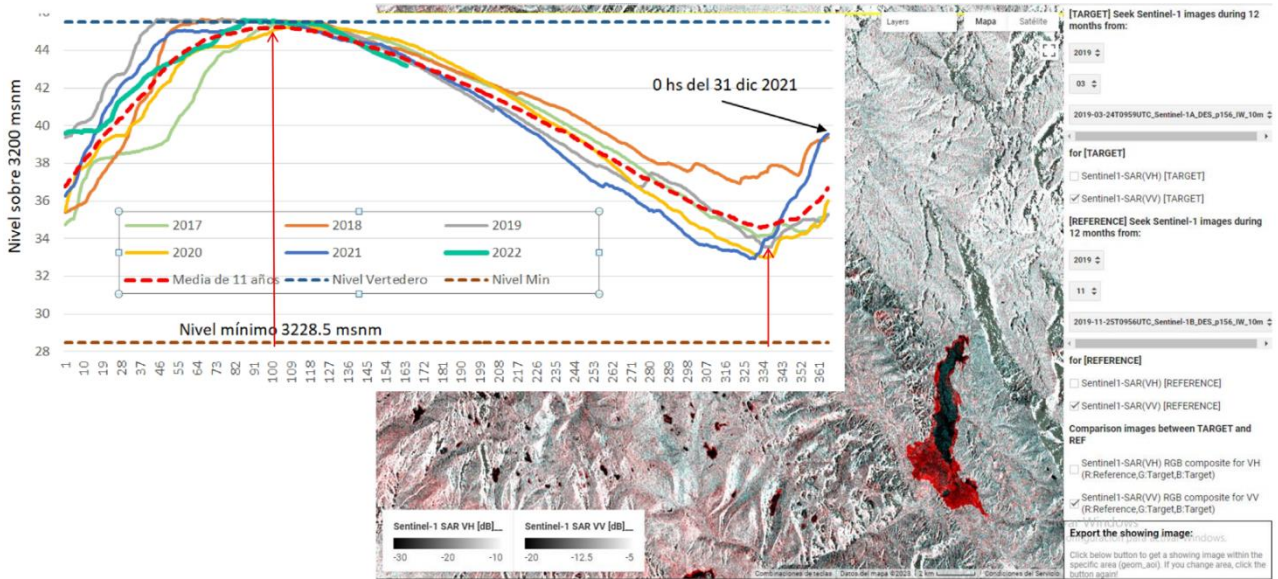
a) Corani - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2017



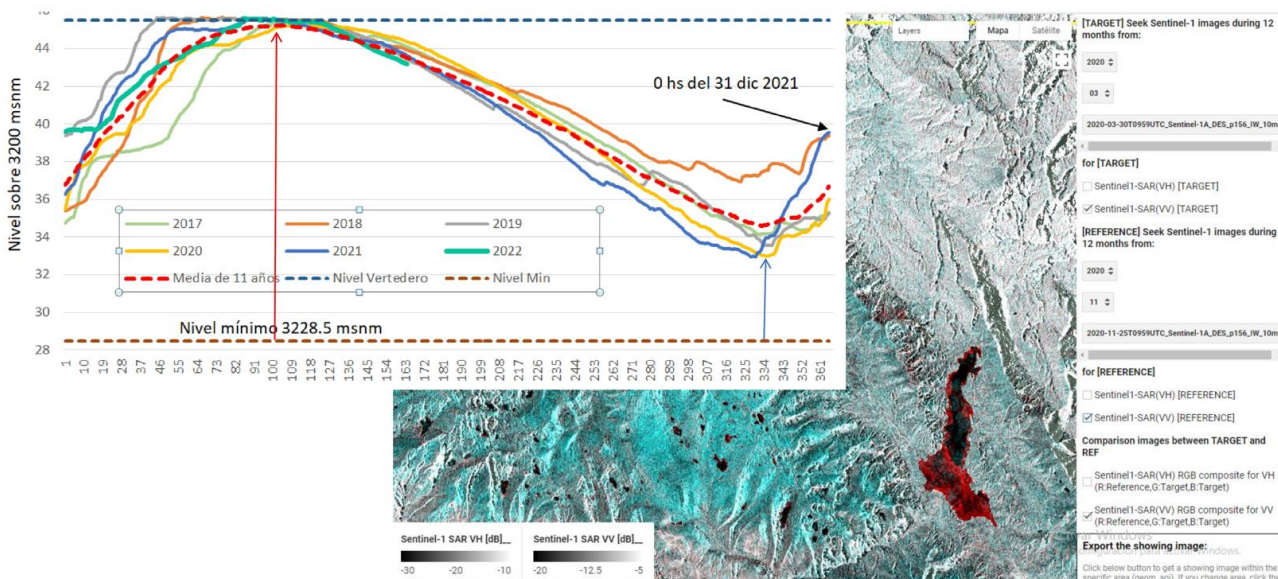
Corani - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2018



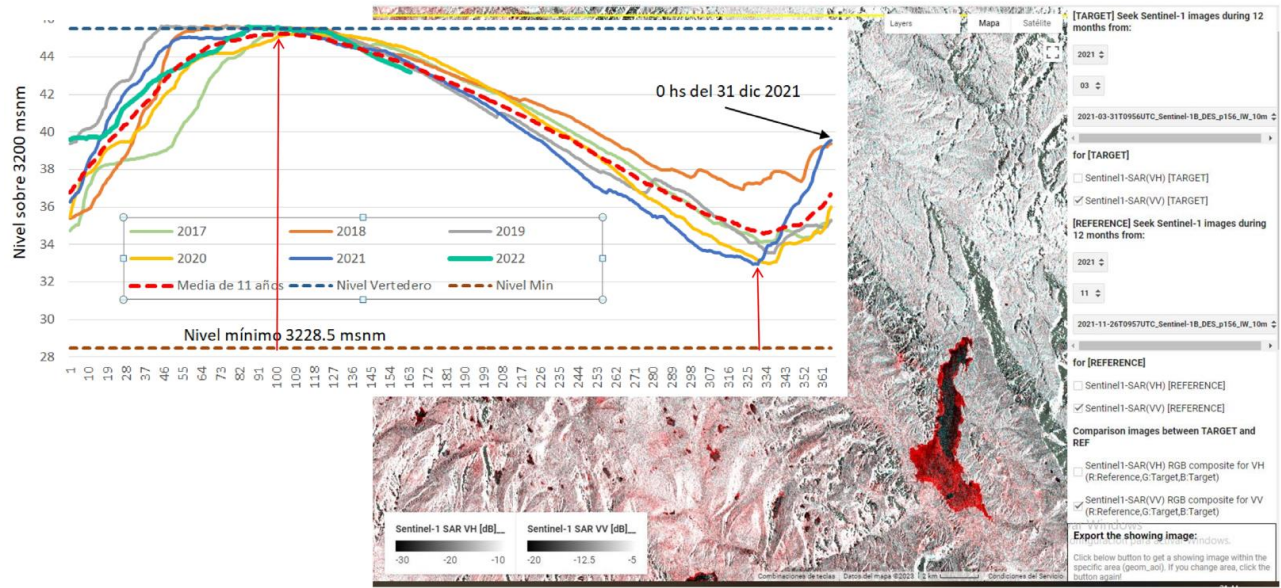
Corani - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2019



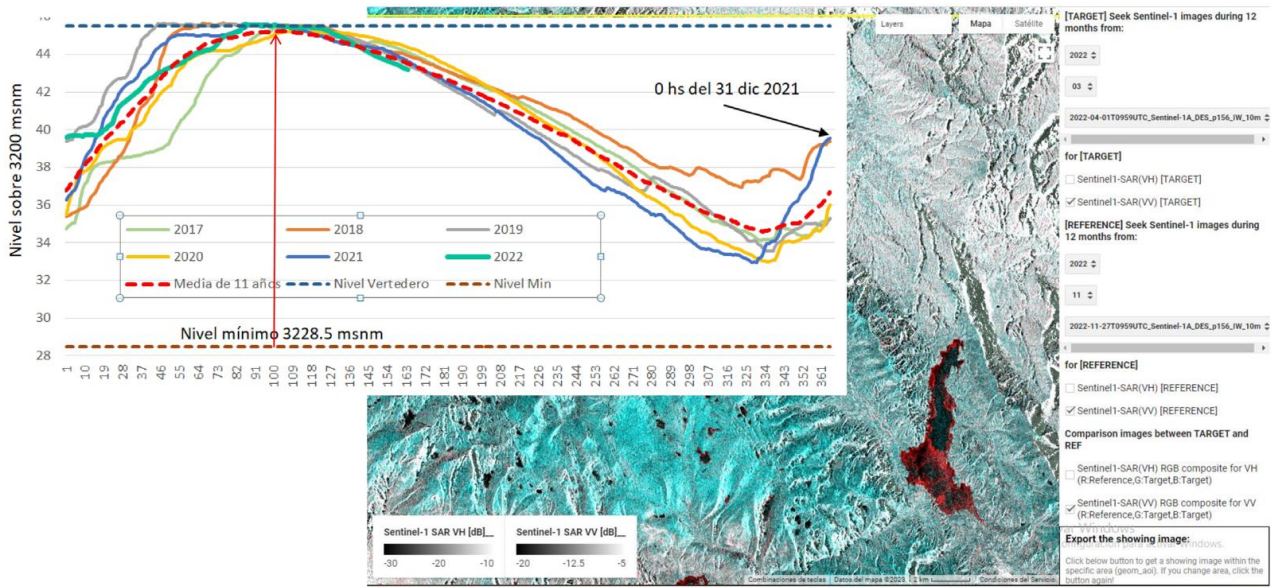
Corani - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2020



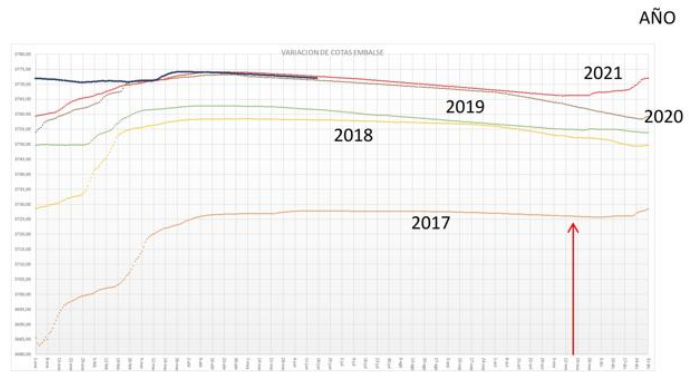
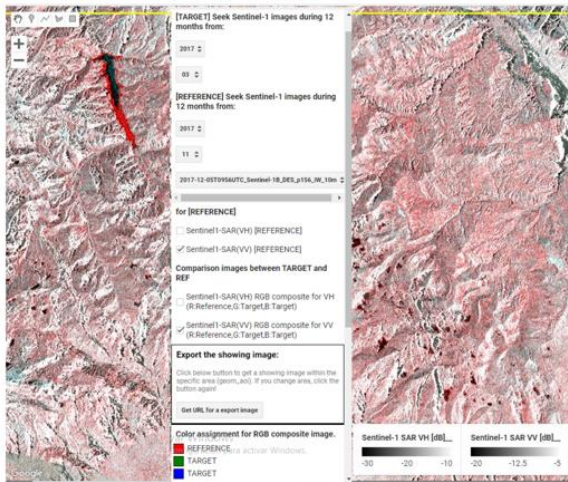
Corani - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2021



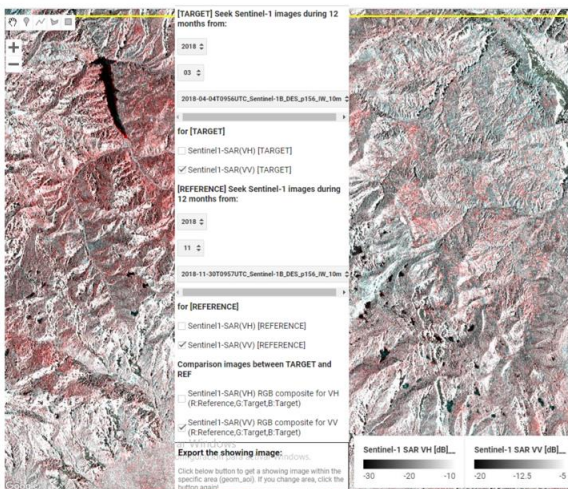
Corani - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2022



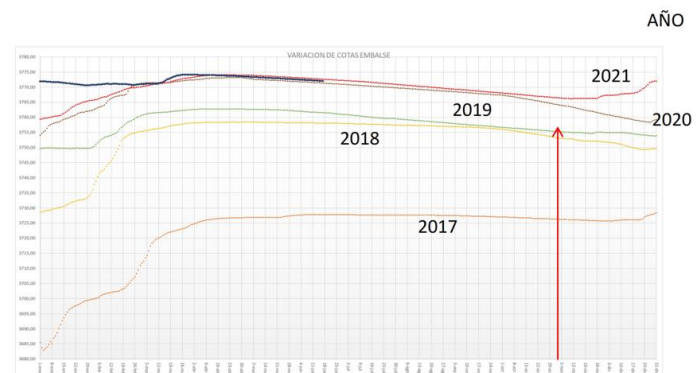
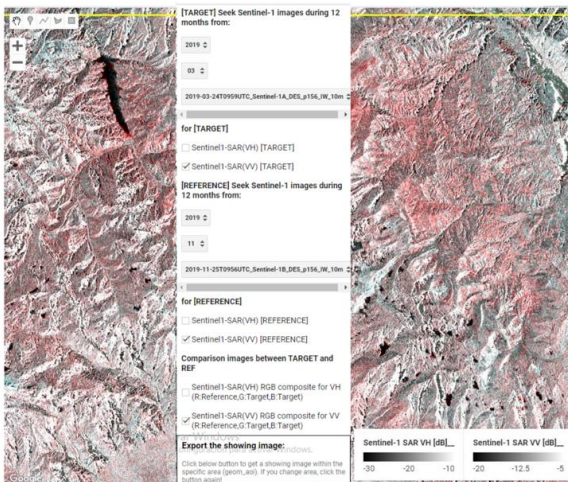
b) Misicuni - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2017



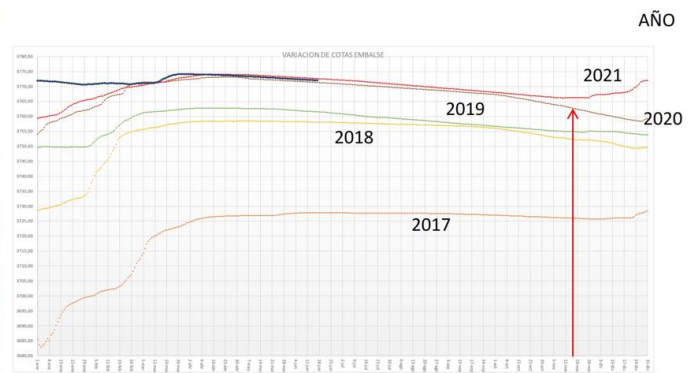
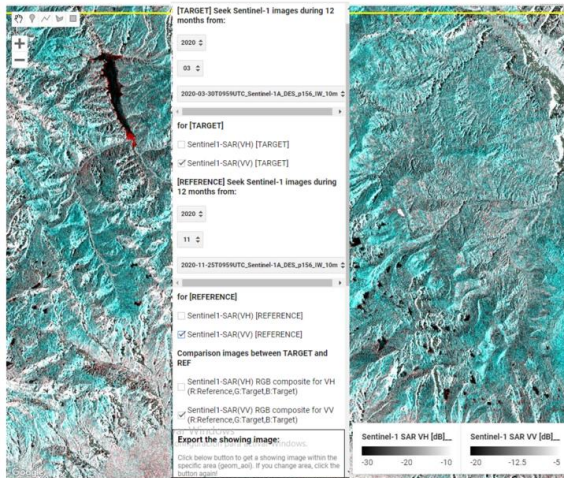
Misicuni - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2018



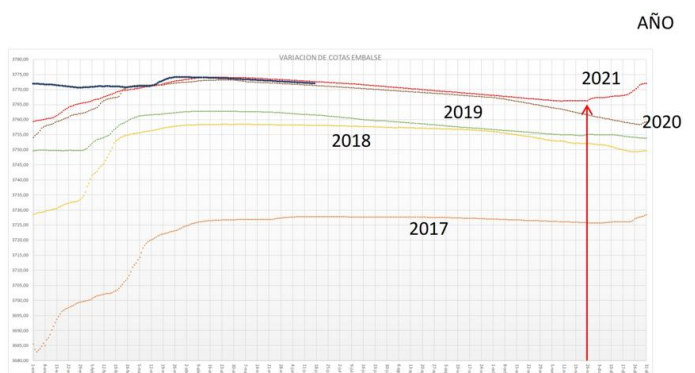
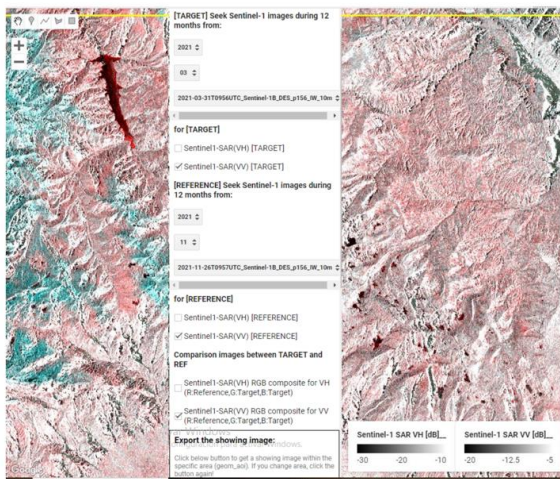
Misicuni - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2019



Misicuni - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2020



Misicuni - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2021



Misicuni - Variación de nivel de Abril a Diciembre 2022

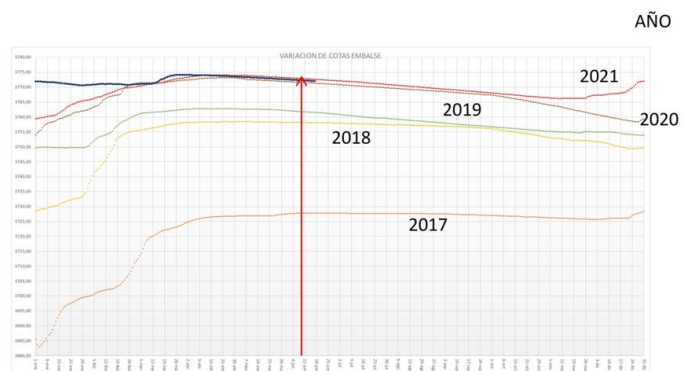
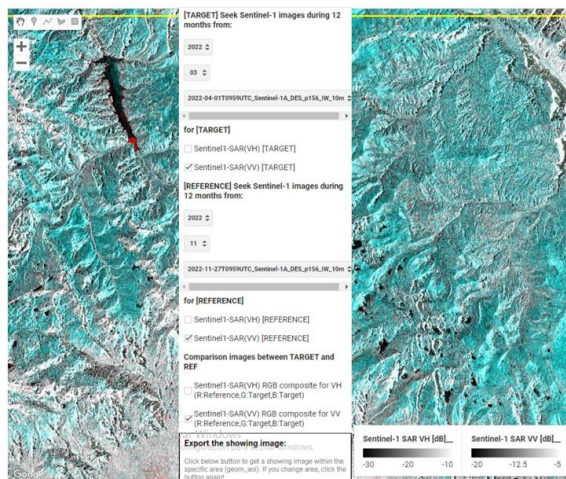


Figura 6: Conjunto de resultados del procesamiento de imágenes Sentinel 1 de abril a diciembre para los años del 2017-2022 a) Corani y b) Misicuni

La Tabla 1 presenta los resultados y comparación entre las mediciones en sitio y las obtenidas mediante procesamiento de imágenes de radar sentinel 1 mostrando una buena correlación.

Tabla 1. Resultados de comparación entre las mediciones en sitio y el procesamiento de imágenes de radar Sentinel 1 a) Corani – Se tiene una variación de hasta el 2%, b) Misicuni – Se tiene una variación menor al 1 %.

a) Corani

Elevación	Área	Variación Volumen	Vol. Acum.	Variación Espejo de agua	Variación Área Altimetría por Radar	Diferencia
m s.n.m.	ha	Mm ³	Mm ³	ha	%	%
3245,5	1370,82	6,80	145,44	0	0	0
3245	1347,83	13,34	138,64	23	2	0
3244	1320,78	13,04	125,3	53	4	0
3243	1287,65	12,57	112,26	83	6	0
3242	1226,22	11,91	99,69	145	10	1
3241	1154,98	11,10	87,78	216	15	1
3240	1064,26	10,24	76,69	307	21	1
3239	984,32	9,37	66,45	386	27	1
3238	889,98	8,46	57,07	481	34	1
3237	801,03	7,54	48,62	570	41	1
3236	706,35	6,53	41,08	664	47	1
3235	599,11	5,67	34,55	772	54	2
3234	535,1	5,06	28,88	836	59	2

b) Misicuni

Elevación	Área	Variación Volumen	Vol. Acum.	Variación Espejo de agua	Variación Área Altimetría por Radar	Diferencia
m s.n.m.	ha	Mm ³	Mm ³	ha	ha	%
3775						
3774	460,68	17,76	173,86	46,62	46,50	0,12
3770	414,06	19,05	156,1	50,05	49,96	0,09
3765	364,01	17,41	137,05	45,82	45,62	0,20
3760	318,19	16,55	119,64	43,65	43,61	0,04
3755	274,54	13,43	103,09	35,45	35,31	0,14
3750	239,09	14,97	89,66	39,65	39,55	0,10
3745	199,44	12,34	74,69	32,73	32,64	0,09
3740	166,71	11,62	62,35	30,89	30,81	0,08
3735	135,82	10,18	50,73	27,11	26,99	0,12
3730	108,71	8,74	40,55	23,32	23,11	0,21
3725	85,40	7,9	31,81	21,12	21,01	0,11
3720	64,27	5,91	23,91	15,82	15,74	0,08
3715	48,45	5,57	18	14,95	14,85	0,10
3710	33,50	3,87	12,43	10,40	10,35	0,05
3705	23,10	3,35	8,56	9,02	8,95	0,07
3700	14,08	2,32	5,21	6,26	6,11	0,15
3695	7,82	1,4	2,89	3,78	3,75	0,03

3690	4,04	1,49	1,49	4,04	3,91	0,13
3685	0	0	0	0,00	0	0,00

5 Conclusiones

Este estudio demuestra la eficacia de la altimetría satelital, en particular la técnica InSAR con datos de Sentinel-1, para el monitoreo de niveles de agua en embalses en Cochabamba, Bolivia. La combinación de tecnología de radar de apertura sintética y análisis temporal proporciona información valiosa para la gestión de recursos hídricos y la toma de decisiones informadas. La correlación exitosa con datos de campo valida la precisión de esta metodología y su relevancia para regiones de difícil acceso.

Se destaca la importancia de utilizar imágenes de la misión satelital Sentinel-1, que emplea tecnología de radar de apertura sintética (SAR), para monitorear los niveles de agua en embalses. Esta tecnología permite obtener información continua de los cuerpos de agua durante el día y la noche, y bajo diversas condiciones ambientales. Se utiliza la interferometría de radar (InSAR) para medir los cambios en la superficie de la Tierra y analizar las series temporales de datos para identificar tendencias a largo plazo y variaciones estacionales en los embalses.

El artículo presenta dos casos de estudio de embalses en Cochabamba, Bolivia: Corani y Misicuni. Se utiliza información de monitoreo de niveles de embalses obtenida en el sitio, que se correlaciona con los resultados obtenidos mediante la tecnología SAR. Los resultados muestran una comparación exitosa entre los datos de monitoreo y los obtenidos mediante la tecnología SAR, lo que demuestra la eficacia de esta metodología con variaciones menores al 2 %.

Se destaca que el monitoreo de los niveles de los embalses es crucial para evaluar la disponibilidad y distribución del agua, y tiene aplicaciones en diferentes sectores, como el suministro de agua potable, la agricultura, el uso industrial, la preservación del ecosistema y la gestión de riesgos. Los datos precisos sobre los niveles de los embalses son esenciales para el modelado hidrológico, la estimación de caudales y la evaluación de la disponibilidad de agua. Además, el monitoreo de los niveles de los embalses contribuye a la comprensión de los impactos del cambio climático y la conservación de la biodiversidad acuática.

En cuanto a la metodología, se describe el uso de la misión satelital Sentinel-1, que adquiere imágenes de radar de alta resolución y captura datos SAR en diferentes modos de polarización. Se utiliza la técnica InSAR para medir los

cambios en la fase de las ondas de radar y obtener información sobre los niveles de agua en los embalses.

En resumen, el artículo demuestra la eficacia del monitoreo de niveles de agua en embalses mediante el uso de tecnología SAR y la técnica InSAR.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el proyecto "Mejora de la conservación y gestión de la biodiversidad mediante el monitoreo de los impactos ecológicos y sociales de los megaproyectos hidroeléctricos en Bolivia". También agradecen a la Agencia Espacial Europea (ESA) por poner a disposición los datos de la misión Sentinel-1.

7 Referencias

- Abdalla, S., Abdeh Kolahchi, A., Ablain, M., Adusumilli, S., Aich Bhowmick, S., Alou-Font, E., . . . Zlotnicki, V. (2021). Altimetry for the future: Building on 25 years of progress. *Advances in Space Research*, 68(2), 319-363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.022>
- Corani. (2023). Hidroeléctrica Corani, , from <https://www.endecorani.bo/index.php/pages/hidroelectricca/hidroelectricca-corani>
- Crétau, J.-F., & Birkett, C. (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14), 1098-1112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002>
- Engine); G. G. E. (2023). GEE provides access to a vast collection of satellite imagery, including Sentinel-1 data. It offers tools and resources for visualizing, analyzing, and processing satellite data. GEE can be utilized for exploring and working with Sentinel-1 data for lake level monitoring, from <https://earthengine.google.com/>
- Enguehard, P., Frappart, F., Zeiger, P., Blarel, F., Satgé, F., & Bonnet, M.-P. (2023). Contribution of automatically generated radar altimetry water levels from unsupervised classification to study hydrological connectivity within Amazon floodplains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101397>
- ESA, S.-T. D. b. (2023). The Sentinel-1 Toolbox. Tools and algorithms for SAR data processing, including interferometric processing for monitoring lake levels, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>
- Frappart, F., Zeiger, P., Betbeder, J., Gond, V., Bellot, R., Baghdadi, N., . . . Seyler, F. (2021). Automatic Detection of Inland Water Bodies along Altimetry Tracks for Estimating

- Surface Water Storage Variations in the Congo Basin. *Remote Sensing*, 13(19), 3804.
- Mason, D. C., Schumann, G. J. P., Neal, J. C., Garcia-Pintado, J., & Bates, P. D. (2012). Automatic near real-time selection of flood water levels from high resolution Synthetic Aperture Radar images for assimilation into hydraulic models: A case study. *Remote Sensing of Environment*, 124, 705-716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.017>
- Medina, C., Gomez-Enri, J., Alonso, J. J., & Villares, P. (2010). Water volume variations in Lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data products. *Journal of Hydrology*, 382(1), 34-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.016>
- Misicuni. (2023). Proyecto múltiple Misicuni, from <https://www.misicuni.gob.bo/la-represa-de-misicuni/>
- Mission, E. S.-. (2023). Official website of the European Space Agency (ESA) providing detailed information about the Sentinel-1 satellite mission, its capabilities, and data products, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- Nguyen, T. H., Ricci, S., Piacentini, A., Fatras, C., Kettig, P., Blanchet, G., . . . Baillarin, S. (2023). Assimilation of SAR-derived flood extent observations for improving fluvial flood forecast – A proof-of-concept. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1136(1), 012018. doi: 10.1088/1755-1315/1136/1/012018
- Peng, D., Feng, L., Larson, K. M., & Hill, E. M. (2021). Measuring Coastal Absolute Sea-Level Changes Using GNSS Interferometric Reflectometry. *Remote Sensing*, 13(21), 4319.
- Qiao, X., Chu, T., Tissot, P., Ali, I., & Ahmed, M. (2023). Vertical land motion monitored with satellite radar altimetry and tide gauge along the Texas coastline, USA, between 1993 and 2020. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103222>
- Raspini, F., Bignami, C., & Del Conte, S. (2020). Assessing the effectiveness of Sentinel-1 InSAR data for landslide monitoring in different environmental and geophysical conditions: A review. *Remote Sensing*, 12(3), 565. doi: 10.3390/rs12030565
- Zeiger, P., Frappart, F., Darrozes, J., Roussel, N., Bonneton, P., Bonneton, N., & Detandt, G. (2021). SNR-Based Water Height Retrieval in Rivers: Application to High Amplitude Asymmetric Tides in the Garonne River. *Remote Sensing*, 13(9), 1856.
- Zoysa, S., Basnayake, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Kantamaneni, K., Muttill, N., . . . Rathnayake, U. (2023). Analysis of Multi-Temporal Shoreline Changes Due to a Harbor Using Remote Sensing Data and GIS Techniques. *Sustainability*, 15(9), 7651.