

Construcción y validación de series temporales de niveles hidrológicos y coberturas de áreas del Lago Poopó (Bolivia) mediante la integración de altimetría satelital radar y teledetección óptica

Adrian Wilson Mamani C. ^a, Jhon Chura Ch. ^a

^o Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Estudios e Investigación Hidrológica, La Paz, Bolivia

Email: adrian.mamani@senamhi.gob.bo, jhon.chura@senamhi.gob.bo

Información	RESUMEN
Palabras clave Sentinel-3 Altimetría Lago Poopó	En este estudio se construyeron y validaron series temporales de niveles hidrológicos y coberturas de áreas superficiales del Lago Poopó mediante la integración de altimetría satelital radar y teledetección óptica. Se emplearon datos altimétricos de la misión Sentinel-3A (SRAL-L2), procesados y filtrados para obtener alturas hidrológicas sobre el cuerpo de agua. Para la validación de los niveles satelitales se emplearon registros in situ de las estaciones Lago Uru Uru, Puente Chavallito y Lago Titicaca – Huatjata del SENAMHI, debido a que el Lago Poopó no dispone de una estación hidrométrica dentro del propio lago. Paralelamente, se determinaron las áreas superficiales del lago a partir de imágenes ópticas de Sentinel-2, CBERS-4 y Landsat 5, 7, 8 y 9 aplicando índices de agua como el NDWI. Se estableció la relación entre nivel y área mediante análisis de correlación y se aplicaron métodos de reconstrucción temporal (interpolación y regresión por superficie) para completar los vacíos altimétricos. Los resultados muestran altas correlaciones (>0.90) entre los niveles altimétricos y las mediciones de referencia, confirmando la fiabilidad del uso combinado de altimetría radar y teledetección óptica en el monitoreo de lagos andinos. Asimismo, el análisis de las variaciones espacio-temporales del Lago Poopó permite comprender cómo cambian su nivel y superficie a lo largo del tiempo. Estas fluctuaciones están estrechamente relacionadas con los aportes hídricos que recibe, especialmente desde el río Desaguadero y el Lago Uru Uru. Los cambios en el nivel y la extensión del espejo de agua son muy significativos. El lago puede experimentar periodos de reducción marcada, seguidos de fases de recuperación notable, reflejando la alta dinámica hidrológica del sistema.
1. Introducción	como Humedal de Importancia Internacional bajo el agua. Las mediciones tradicionales, basadas en estaciones hidrométricas, presentan limitaciones notables debido a su cobertura espacial restringida y a la dificultad de acceso en ciertas zonas del lago, especialmente en áreas remotas o poco intervenidas. Desde una perspectiva ecológica, el Lago Poopo alberga una biodiversidad excepcional, con altos

niveles de especies nativas exclusivas, particularmente entre peces, y reconocida internacionalmente bajo la Convención Ramsar por su importancia ecológica. Su dinámica hidrológica es altamente variable, con cambios significativos en nivel y extensión superficial, determinados por los aportes hídricos del río Desaguadero y del Lago Uru Uru, así como por las condiciones hidrometeorológicas locales. Estas variaciones impactan directamente en la biodiversidad acuática, en la productividad pesquera y agrícola, y en los medios de vida de las comunidades que dependen de este recurso, haciendo del monitoreo y manejo sostenible del lago una prioridad para la región del Altiplano.

En la **Figura 1** se muestra la variabilidad del sistema hídrico Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS) con registros del año 2024, correspondientes a los meses de enero a diciembre, donde se observa que el lago Poopó presenta una baja permanencia hídrica, llegando a estar casi seco, a diferencia del lago Titicaca, que mantiene niveles más estables.

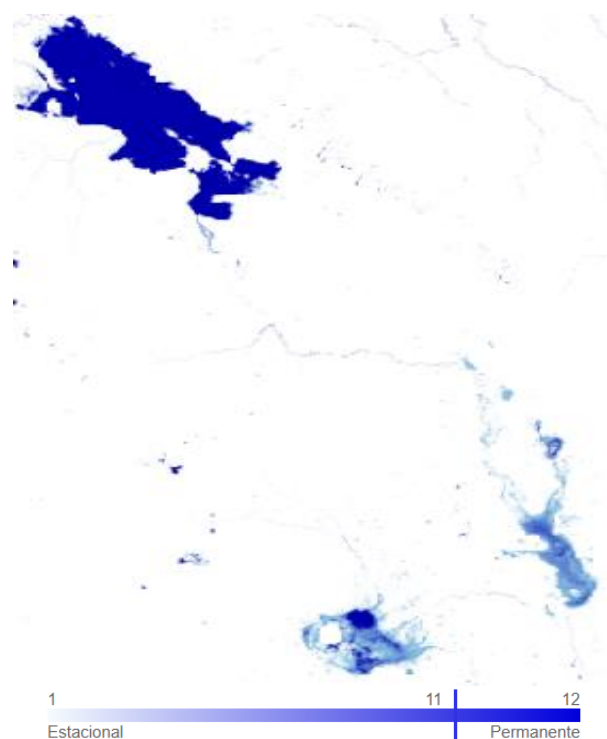


Figura 1: Estacionalidad del Agua del sistema hídrico Titicaca–Desaguadero–Poopó–Salar de Coipasa (TDPS) (Global Surface Water)

El lago alberga una rica diversidad biológica, con aproximadamente 200 especies de flora y fauna acuática, muchas de ellas nativas y algunas migratorias de importancia internacional. Destacan las poblaciones de flamencos *Phoenicoparrus andinus*, *Phoenicopterus chilensis* y *Phoenicopterus jamesi*, especies vulnerables y casi amenazadas según la **UICN**, así como aves migratorias del Neártico que utilizan el lago como sitio de alimentación y descanso. La vegetación acuática, compuesta por macrófitas como *Chara poopensis*, *Ruppia* sp. y *Schoenoplectus californicus* var. *tatora*, proporciona hábitats esenciales, mejora la calidad del agua y sustenta la cadena alimentaria del ecosistema. Asimismo, el lago ha sido un recurso económico clave para la pesca y el riego agrícola, aunque la reducción del volumen hídrico y el aumento de la salinidad han afectado gravemente estas actividades, generando impactos significativos en la seguridad alimentaria y la economía local.

En la **Figura 2** se muestran algunas de las **especies vulnerables según la UICN**, representativas del ecosistema altoandino, que incluyen aves y flora acuática características de la región.



Figura 2: Especies vulnerables y en peligro en el lago altoandino

El lago Poopó presenta una notable reducción de su espejo de agua, acompañada por la expansión de áreas semiáridas. En la zona este, la cobertura vegetal disminuye y se transforma en tierras de cultivo, lo que evidencia los cambios ambientales ocurridos en el sistema, tal como se muestra en la **Figura 3**.

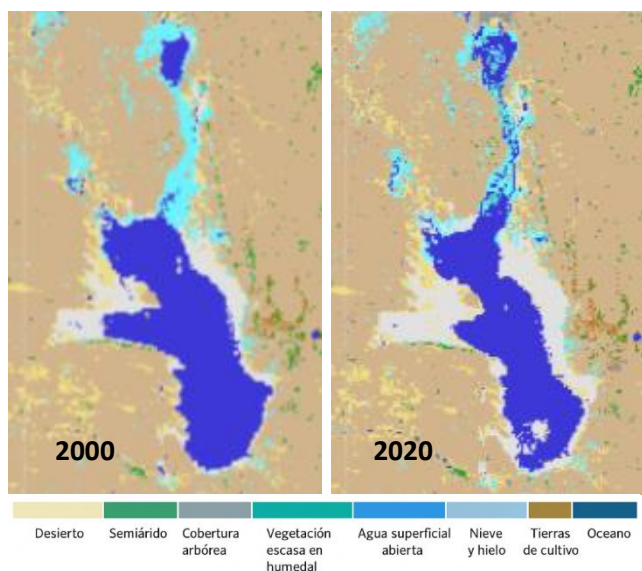


Figura 3: Comparación de Cobertura terrestre entre 2000 a 2020

Monitoreo Satelital

La **altimetría satelital** radar mide el tiempo que tarda un pulso electromagnético en viajar desde el satélite hasta la superficie del agua y volver al sensor, permitiendo estimar su altura sobre el elipsoide de referencia. Para lograr precisión, se aplican correcciones geofísicas y atmosféricas.

El procesamiento del eco radar mediante algoritmos (retrackers) permite obtener mediciones confiables incluso en lagos continentales. Misiones como ERS, ENVISAT, Jason, SARAL y Sentinel-3 este último con el altímetro SRAL en modo SAR (Delay-Doppler) han mejorado la precisión y frecuencia de observación, posibilitando el monitoreo continuo de niveles hidrológicos en cuerpos de agua como el Lago Poopó.

Los **satélites ópticos** registran la radiación reflejada por la superficie terrestre, permitiendo diferenciar agua, vegetación y suelo mediante índices como NDWI y NDVI. Misiones como Landsat y Sentinel-2 ofrecen imágenes multiespectrales de alta resolución, útiles para monitorear cambios en la extensión, turbidez y cobertura de lagos. Combinados con altimetría satelital, permiten analizar tanto variaciones espaciales como fluctuaciones del nivel de agua.

En la **Tabla 1** se presentan los principales satélites ópticos y altimétricos, indicando sus características, periodo de operación y revisita.

Satélite	Tipo	Periodo de disponibilidad	Repetibilidad / Revisita
Envisat (RA-2, altímetro)	Altimétrico	2002–2012	~35 días
Jason-2 / OSTM	Altimétrico	2008–2019	~10 días
Sentinel-3A	Altimétrico	2016–actualidad	~35 días
Sentinel-3B	Altimétrico	2018–actualidad	~35 días
Sentinel-6	Altimétrico	2020–actualidad	~10 días
Jason-3	Altimétrico	2016–actualidad	~10 días
CryoSat-2	Altimétrico	2010–actualidad	~369 días
Sentinel-2A	Óptico	2015–actualidad	10 días
Sentinel-2B	Óptico	2017–actualidad	10 días
Landsat-8	Óptico	2013–actualidad	16 días
Landsat-9	Óptico	2021–actualidad	16 días

Tabla 1: Principales características de los satélites ópticos y altimétricos

2. Área de estudio

El lago Poopó se encuentra ubicado en el Altiplano Central de Bolivia, en el departamento de Oruro, entre los 17°45' y 19°30' S y 66°30' y 68°00' O, a una altitud media de 3.686 m.s.n.m. Forma parte del sistema endorreico Titicaca–Desaguadero–Poopó–Salar de Coipasa (TDPS), siendo su principal afluente el río Desaguadero.

Se trata de un lago poco profundo y de alta variabilidad, con profundidades menores a 3 metros y una extensión que puede variar entre 1.700 km² en años húmedos y menos de 500 km² en periodos secos, llegando incluso a desecarse completamente, según los registros de la Plataforma de la ALT.

El lago Poopó no cuenta con estaciones de monitoreo del nivel de agua, por lo que carece de información

continua y precisa necesaria para el desarrollo de estudios hidrológicos y ambientales detallados.

3. Metodología

La metodología se estructura de la siguiente:

3.1 Ubicación y selección de estaciones

A partir de las trayectorias de los satélites Sentinel-3A que cruzan el Poopó, identificadas mediante el traslape con el área de estudio utilizando las plataformas Panoply, ArcGIS y QGIS, se seleccionaron 3 estaciones virtuales distribuidas priorizando la cobertura espacial y la continuidad temporal de los datos. En la **Figura 4** se presentan la ubicación de las estaciones virtuales junto con la estación DAHITI y las dos estaciones hidrométricas como del Lago Uru Uru y Pte. Chavallito.

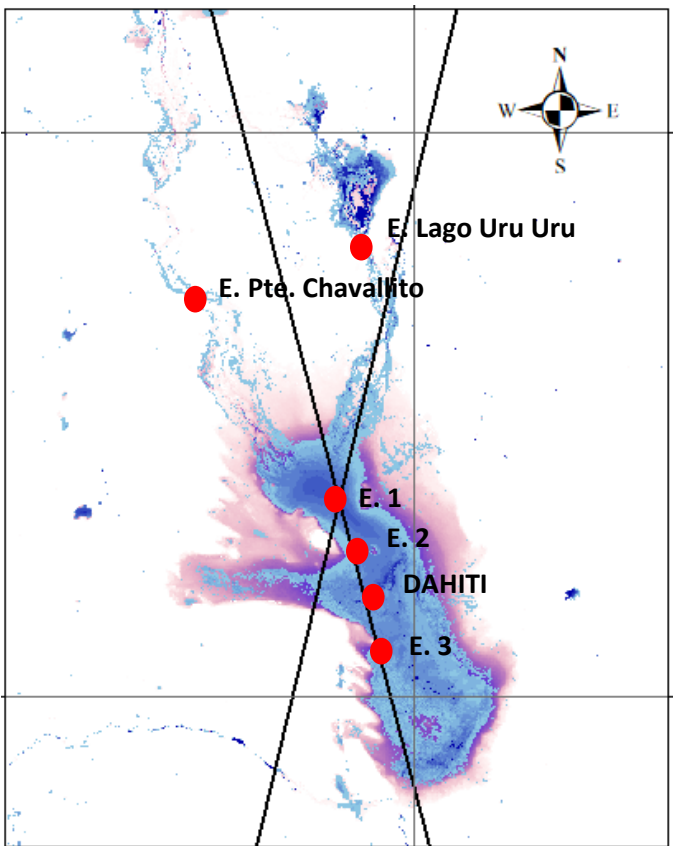
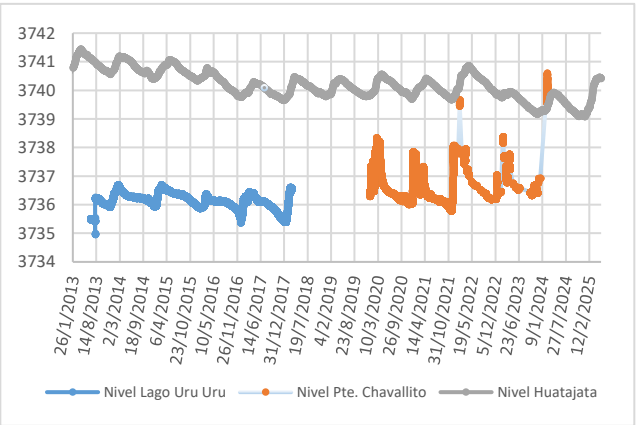


Figura 4: Ubicación de las estaciones convencionales, estaciones virtuales y los recorridos satelitales radar S3A

Se recopilieron registros históricos diarios de niveles de agua de estaciones hidrométricas operadas por el SENAMHI (Bolivia). En la **Gráfica 1** se presenta las estaciones del Lago Uru Uru, Pte. Chavallito y de Huatajata como referencia principal.



Gráfica 1: Niveles históricos de las estaciones Huatajata, Lago Uru Uru y Pte. Chavallito (SENAMHI-BOLIVIA)

3.2 Construcción de series a partir de altimetría y teledetección óptica

3.2.1 Acceso y descarga de datos satelitales

Se emplearon datos satelitales del programa Copernicus de la ESA y del programa Landsat de la NASA/USGS, correspondientes al periodo 2016–2025. Para el análisis altimétrico se utilizaron productos de nivel 2 (L2) del altímetro radar SRAL (Synthetic Apertura Radar Altimeter) a bordo de los satélites Sentinel-3A, descargados desde los portales EUMETSAT y Copernicus Open Access Hub (SciHub). Estos productos proporcionan mediciones precisas de la altura del agua sobre el elipsoide de referencia, permitiendo estimar las variaciones temporales del nivel del agua en lago Poopó.

De forma complementaria, se emplearon imágenes ópticas multiespectrales de los satélites Sentinel-2A/B, Landsat-7 (ETM+) y Landsat-8 (OLI/TIRS), obtenidas de los portales Copernicus SciHub y NASA EARTHDATA. Estas imágenes fueron utilizadas para la identificación y delimitación de coberturas de agua superficial.

3.2.2 Procesamiento de los datos altimétricos y ópticos:

a) Procesamiento de datos altimétricos (Sentinel-3 SRAL)

- Extracción de datos:

Los productos Nivel 2 (L2) de Sentinel-3 SRAL se descargaron en formato netCDF y se visualizaron en Panoply para inspeccionar la calidad y detectar valores atípicos.

- Corrección de datos:

Se aplicaron las correcciones geofísicas estándar:

$$h = h_{alt} - h_{ran} - N - cor$$

Donde:

- **h_{alt}**: Altura del satélite sobre el elipsoide de referencia (WGS84).
- **h_{ran}**: Distancia medida entre el satélite y la superficie del agua.
- **N**: Diferencia entre el elipsoide y el geode (ondulación del geode).
- **cor**: Suma de todas las correcciones mencionadas arriba.
- **h**: Altura final del nivel del agua sobre el geode (es decir, la medida corregida y real del nivel del agua).

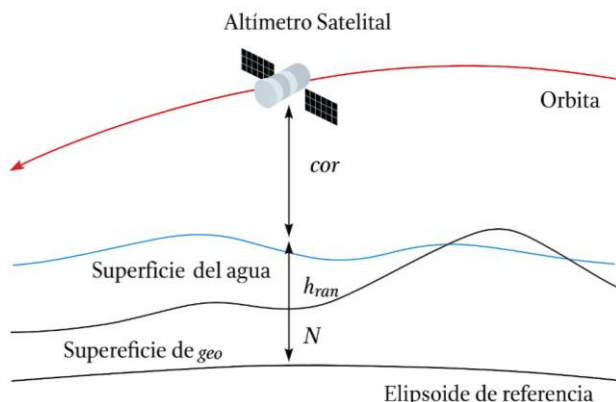


Figura 5: Diagrama esquemático de la altimetría satelital

- Filtrado y suavizado:

Se eliminaron los datos de baja calidad, valores atípicos y errores causados por el instrumento o por condiciones ambientales (como el viento o las olas). Luego, se aplicó un filtro de media móvil para reducir las variaciones bruscas y obtener una serie temporal

más continua y representativa del nivel real del lago. Como alternativa de comparación, los datos altimétricos del Lago Poopó fueron procesados mediante VALS, herramienta que permite la selección espacial, la corrección de efectos instrumentales (como el hooking) y la depuración de valores atípicos, garantizando una mayor precisión en las mediciones, tal como se muestra en la **Figura 6**.

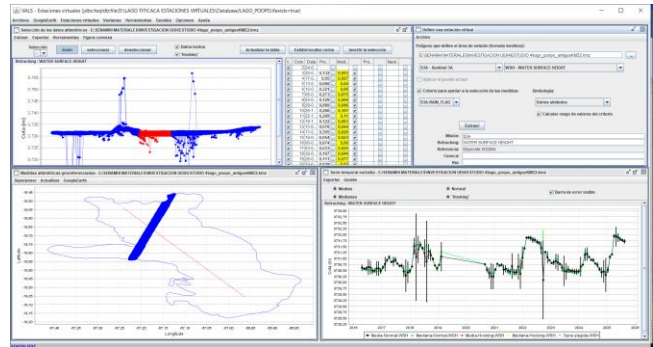


Figura 6: Procesamiento de datos Altimétricos con VALS

b) Procesamiento de datos ópticos (Sentinel-2 y Landsat 7/8)

El procesamiento de las imágenes ópticas se llevó a cabo mediante una serie de etapas orientadas a la obtención de información confiable sobre la cobertura de agua superficial.

En primer lugar, se aplicaron las correcciones atmosférica, radiométrica y geométrica, con el objetivo de eliminar distorsiones causadas por la atmósfera, ajustar los valores digitales a reflectancias reales de superficie y garantizar la correcta georreferenciación de las escenas.

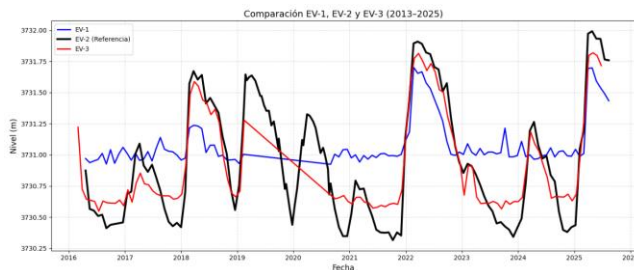
Posteriormente, se realizó el cálculo de índices espectrales de agua, empleando el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI) para los sensores Sentinel-2, Landsat 7 y Landsat 8/9, a partir de las combinaciones de bandas correspondientes.

Finalmente, se eliminaron las nubes y sombras de las imágenes para evitar errores en la detección del agua. Luego, se recortaron las zonas de estudio (Región de Interés, ROI) para analizar solo las áreas donde se encuentran los cuerpos de agua.

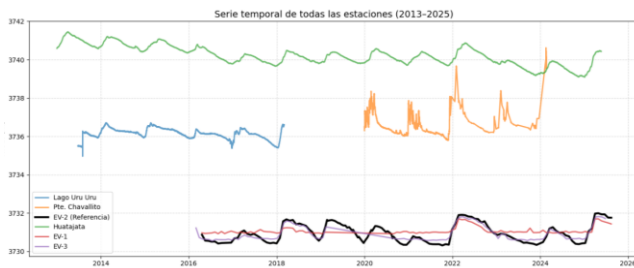
3.2.3 Selección de las Estaciones Virtuales:

Para la validación de los niveles altimétricos se evaluaron tres Estaciones Virtuales (EV) generadas a partir de los datos del satélite Sentinel-3. Cada estación fue comparada con los registros de tres estaciones hidrométricas de referencia: Lago Uru Uru, Puente Chavallito y Huatajata.

Durante el proceso de comparación como se muestra en la **gráfica 2** y **gráfica 3** se descartaron las estaciones EV-1, EV-3 y la estación obtenida de la base DAHITI, debido a que presentaban mayor dispersión y menor correspondencia con los datos observados. Finalmente, se seleccionó la Estación Virtual EV-2, por mostrar el mayor grado de similitud y coherencia temporal con las mediciones hidrométricas, considerándose la más representativa para el análisis del nivel del agua.



Gráfica 2: Comparación de las tres Estaciones Virtuales (EV-1, EV-2 y EV-3)

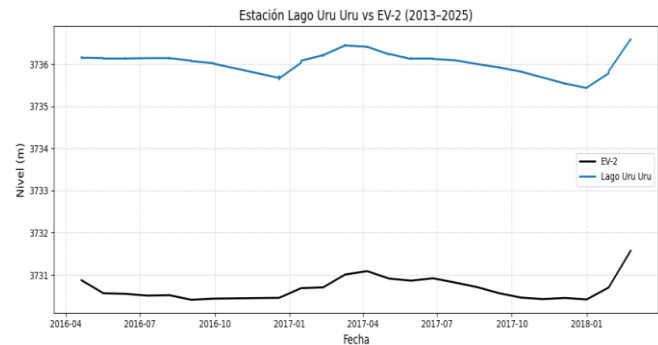


Gráfica 3: Comparación de las tres Estaciones Virtuales (EV-1, EV-2 y EV-3) y las 3 estaciones Hidrométricas

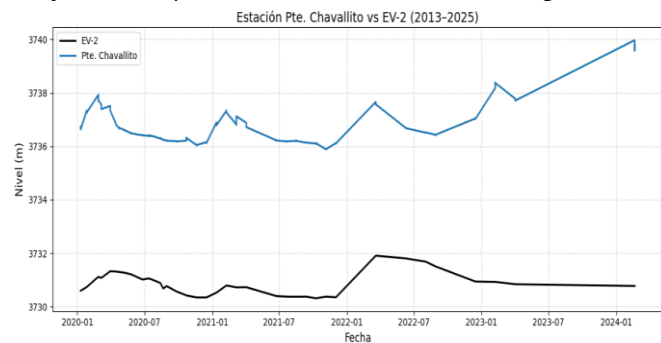
3.3 Comparación y Validación:

Los niveles de la Estación Virtual EV-2 (Sentinel-3) se compararon con las estaciones Uru Uru, Puente Chavallito y Huatajata. Aunque estas se ubican aguas arriba del lago y presentan un ligero desfase temporal,

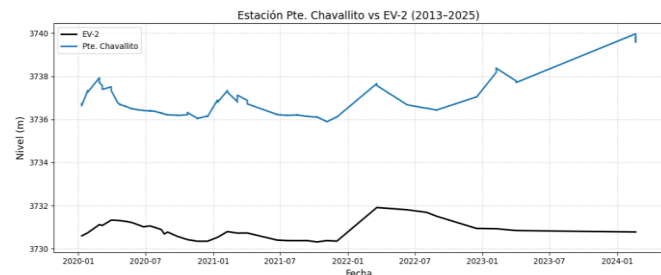
mantienen un comportamiento hidrológico similar, lo que confirma la coherencia de los datos altimétricos. Tal como se ven en las **gráficas 4, 5 y 6**.



Gráfica 4: Comparación de la estación EV-2 Vs Lago Uru Uru

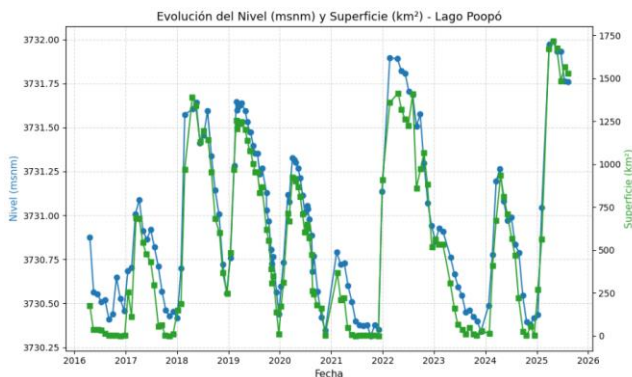


Gráfica 5: Comparación de la estación EV-2 Vs Pte. Chavallito

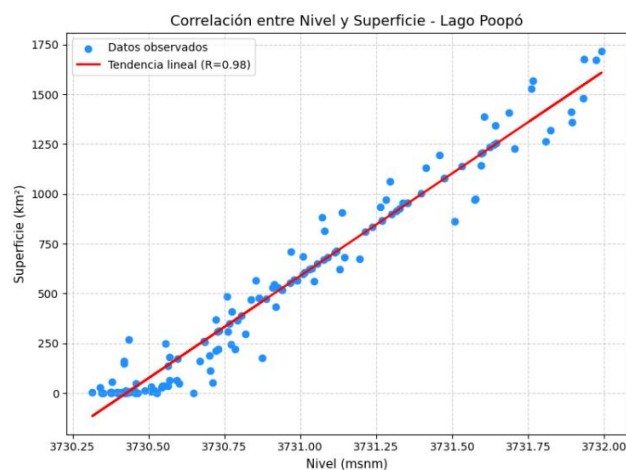


Gráfica 6: Comparación de la estación EV-2 Vs Huatajata

Asimismo, se compararon las series altimétricas con las variaciones de área de agua obtenidas mediante el índice NDWI de Sentinel-2 y Landsat 7/8/9, observándose una alta correspondencia entre los cambios en el nivel y la extensión superficial del lago. A pesar de las diferencias espaciales, se calculó un coeficiente de correlación de $R = 0.96$, lo que evidencia una fuerte relación y coherencia entre ambas fuentes de información, respaldando la validez de los resultados obtenidos. Tal como se ven en las gráficas 7 y 8.



Grafica 7: Comparación entre niveles altimétricos (EV-2) y variaciones de cobertura de agua (NDWI)



Grafica 8: Relación entre el nivel altimétrico (EV-2) y el área de agua (NDWI)

4. Resultados de la validación

El análisis mostró que las series altimétricas e hidrométricas presentan un comportamiento hidrológico similar, con incrementos y descensos coincidentes, aunque con un ligero desfase temporal debido a la diferencia espacial entre estaciones. A pesar de ello, la alta coherencia de las tendencias respalda la validez de los datos altimétricos del sensor **SRAL (Sentinel-3)**.

Los resultados muestran que las variaciones en el nivel de agua medidas por altimetría están fuertemente relacionadas con los cambios en la superficie del lago, con un coeficiente de correlación de $R = 0.96$. Esto

significa que cuando el nivel desciende, el área de agua también se reduce, y cuando el nivel sube, la superficie aumenta.

En conjunto, estos hallazgos confirman que la información altimétrica y óptica es consistente en el tiempo y el espacio, y que su combinación es una herramienta confiable para el monitoreo de lagos interiores y análisis hidrológico.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Los niveles altimétricos obtenidos de la Estación Virtual EV-2 (Sentinel-3) muestran un patrón hidrológico coherente con las series de las estaciones hidrométricas, confirmando la validez de la altimetría radar para el monitoreo de lagos interiores, incluso en regiones con estaciones físicas limitadas.

La comparación con las variaciones de cobertura de agua calculadas mediante el índice NDWI de Sentinel-2 y Landsat 7/8/9 evidenció una alta correlación ($R = 0.96$) entre los cambios de nivel y la extensión superficial del lago, demostrando la complementariedad entre altimetría y teledetección óptica.

Las tendencias temporales y espaciales obtenidas muestran que la integración de datos altimétricos y ópticos constituyen una herramienta confiable para el análisis hidrológico y la gestión de recursos hídricos en lagos interiores.

5.2. Recomendaciones

Continuar el monitoreo utilizando la EV-2 y las coberturas de agua para mantener series temporales consistentes y detectar cambios hidrológicos significativos en el lago.

Complementar los estudios altimétricos con estaciones hidrométricas adicionales cerca del lago para reducir desfases temporales y mejorar la validación de las series altimétricas.

Promover la integración de altimetría y teledetección óptica en planes de gestión hídrica y modelos hidrológicos regionales, dado su potencial para estimar tanto niveles de agua como extensión superficial.

7. Referencias

- Sakaros Bogning, Frédéric Frappart, Fabien, Fernando Niño, Gil Mahé, Jean-Pierre Bricquet, Frédérique Seyler, Raphaël Onguéné, Jacques Etamé, Marie-Claire Paiz and Jean-Jacques Braun. *Monitoring Water Levels and Discharges Using Radar Altimetry in an Ungauged River Basin: The Case of the Ogooué*. (2018).
- Cecile M. M. Kittel, Liguang Jiang, Christian Tøttrup, and Peter Bauer-Gottwein. *Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring – a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B*. (2021)
- Xingdong Li, Di Long, Qi Huang, Pengfei Han, Fanyu Zhao, and Yoshihide Wada, *High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000–2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions*. (2019)
- Sékouba Oularé, Valère-Carin Jofack Sokeng, Koffi Fernand Kouamé, Christian Armel Kouassi Komenan, Jean Homian Danumah, Benoit Mertens, You Lucette Akpa, Thibault Catry and Benjamin Pillot *Contribution of Sentinel-3A Radar Altimetry Data to the Study of the Water Level Variations in Lake Buyo (West of Côte d'Ivoire)*, (2022)
- *Manual del Usuario vals - Definición y actualización de estaciones virtuales* (noviembre de 2022)
- *Agencia Nacional de Aguas e Saneamiento Básico (ANA), Rafael de Araujo, ALTIMETRIA POR SATÉLITE*
- Pham-Duc, B., Tran Anh, Q. y Tong Si, *Monitoreo de la variación mensual del volumen de agua del lago Tonlé Sap mediante imágenes Sentinel-1 y datos de altimetría satelital*, (2023)
- EUMETSAT, *Sentinel-3 altimetry level 2 data guide*, 18 de Oct 2024
- Adrian Wilson Mamani Conde, Jhon Chura Ch., *Monitoreo y validación del nivel del agua mediante altimetría radar satelital en el Lago Titicaca: evaluación de datos de Sentinel-3A y 3B*. (2025)