



# RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE ONI (OCEANIC NIÑO INDEX) Y LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LAS LAGUNAS DE TAJZARA – TARIJA - BOLIVIA

Mario Carmelo Gamarra Mendoza

Centro de Investigación del Agua (CIAGUA), Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), Docente Investigador, [mcgamarramendoza@hotmail.com](mailto:mcgamarramendoza@hotmail.com), [mcgamarramendoza@gmail.com](mailto:mcgamarramendoza@gmail.com), [mariogamarra@uajms.edu.bo](mailto:mariogamarra@uajms.edu.bo), Tarija, Bolivia



## Introducción

Las Lagunas de Tajzara se encuentran ubicadas en el Departamento de Tarija (Bolivia) a 76 kilómetros de la ciudad de Tarija, Bolivia. Poseen una altura promedio de 3600 msnm y son parte de la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama. La precipitación media anual registrada en la estación pluviométrica Yunchará, cercana a las Lagunas de Tajzara, es igual a 416.6 mm. Las intervenciones antrópicas en la cuenca son escasas a casi nulas debido a la condición de Área Protegida y la escasa precipitación, aspecto relevante para observar el comportamiento del balance hídrico cuasi-natural de las Lagunas de Tajzara.



Figura 1. Lagunas de Tajzara (Diciembre 1985) Figura 2. Lagunas de Tajzara (Diciembre 2020)  
En las anteriores figuras se observa la apreciable disminución de agua en las Lagunas de Tajzara que se observa respecto del año 1985 hasta la fecha, disminución que se dio paulatinamente con el paso del tiempo, y que actualmente representa una cicatriz dejada por el cambio climático.

La represa San Jacinto está ubicada en una zona próxima, aunque con diferenciados climas, pues Tajzara corresponde a una región altiplánica y San Jacinto a una región de valles. Fue puesta en operación el año 1989, y actualmente tiene una estación hidrométrica que registra los niveles de agua cada 15 minutos, administrada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) de Bolivia, desde el año 2018.



Figura 3. Vertedero Represa San Jacinto Figura 4. Vista satelital embalse San Jacinto Figura 5. Niveles instantáneos de agua del embalse San Jacinto

La presente investigación plantea una metodología para revisar la información de niveles de agua registrados por el satélite ICESat-2 en lagos o embalses cercanos, en el cual uno posea registros hidrométricos para monitorear una laguna con escasa intervención antrópica, con el objeto de obtener correlaciones entre parámetros de las superficies de agua continental y los indicadores ONI (Oceanic Niño Index). El desarrollo de la misma corresponde con las líneas de investigación desarrolladas por el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), de Tarija, Bolivia.

WLC18- 0067



## Metodología

La metodología planteada requiere primeramente recopilar la información de la ruta de alturas superficiales de cuerpos de agua continentales, incluidos lagos, estuarios y ríos. Los datos fueron adquiridos por el instrumento del sistema de altímetro láser topográfico avanzado (ATLAS) a bordo del observatorio Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2). Todas las elevaciones se informan como altura (ortométrica) por encima del elipsoide WGS84 en metros. Cada punto representa la altura de un segmento corto de la superficie del agua.



Figura 6. Satélites con sensores de altimetría Se ha obtenido la información de niveles de agua de las Lagunas de Tajzara y de San Jacinto, como así también del terreno, que brinda la incertidumbre de la medición.



Figura 8. Nivel de agua y terreno ICESat-2 San Jacinto Figura 9. Nivel de agua y terreno ICESat-2 Tajzara

## Resultados

Se han procesado los niveles de agua superficial ICESat-2, obtenidos para las diferentes fechas disponibles de los RGT que atraviesan el embalse San Jacinto, y se han comparado con los niveles medios diarios de agua registrados en la estación hidrométrica de San Jacinto, correspondientes con la fecha de cada RGT. Se obtuvieron coincidencias de los valores de nivel de agua, medidos por cada láser y su trayectoria en terreno (GT3L, GT3R, GT2L y GT2R), siendo las diferencias de 1 cm hasta 8 cm entre los niveles de cada láser, mientras que la diferencia respecto de la diferencia entre los valores registrados por el sensor de la estación hidrométrica sostienen una diferencia de 85 cm hasta 110 cm respecto de los ICESat-2.

Tabla 1. Comparación de niveles de superficie de agua de estación hidrométrica San Jacinto y niveles ICESat-2

Fecha	Track	Altura promedio ICESat-2 (msnm)	H <sub>media</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>min</sub>	Beam	Ground Track	Diferencia (m)	Rango (m)	Desviación estándar (m)	Número de datos	Diferencia nivel GT (m)	Estación hidrométrica San Jacinto - Sensor nivel (msnm)	Diferencia nivel (S) - (14) (m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
26/09/2019	26	1881.680		1881.680		Beam 2	GT3L	0	0.0964	0.0426	4	4	-0.045	0.934
28/09/2019	26	1881.730		1881.680		Beam 4	GT3R	0	0.0667	0.0244	7	6		
28/09/2019	26	1881.730		1881.725		Beam 4	GT2L	0.01	0.0591	0.0154	37	33	H <sub>013</sub> - H <sub>012</sub>	0.979
28/09/2019	26	1881.720		1881.725		Beam 3	GT2R	0	0.0957	0.0245	125	119		
29/11/2019	971	1882.639		1884.382		Beam 2	GT3L	-3.4844	-	-	1	1	5.352	6.203
29/11/2019	971	1886.124		1884.382		Beam 1	GT3R	-	-	-	1	1	-	-
29/11/2019	971	1879.070		1879.030		Beam 4	GT2L	0.08	0.2603	0.1063	15	15	H <sub>013</sub> - H <sub>012</sub>	0.851
29/11/2019	971	1878.990		1879.030		Beam 3	GT2R	0	0.2344	0.0610	34	27		
04/04/2020	140	1884.910		1884.910		Beam 5	GT1R	-	0.0405	0.0147	7	6	-	1.105

Si bien esta diferencia es relativamente amplia, cuando se analizan las diferencias de las mediciones entre 2 fechas para cada uno de los niveles ICESat-2 y Sensor de la estación hidrométrica, la diferencia se reduce y además se observa la misma tendencia de alza o baja del nivel por temporada.



Figura 14. Nivel de agua registrado cada 15 mins en la estación hidrométrica San Jacinto

La información de niveles de agua superficial de San Jacinto y Tajzara, se verificaron según su ubicación georeferenciada, y para el caso de San Jacinto también se analizó la correlación existente con la información registrada en la estación hidrométrica que registra con un sensor el nivel del agua cada 15 minutos.

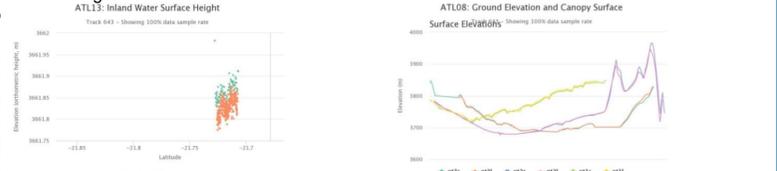


Figura 10. Nivel de agua ICESat-2 Tajzara Figura 11. Nivel del terreno y cobertura vegetal ICESat-2 Tajzara

Posteriormente se han procesado los datos de Sustainable Development Goal indicador 6.6.1, que dispone de la información de las superficies de agua superficial por país y desde el año 2000 a 2018, con superficies analizadas de las imágenes satelitales LandSat, considerando la presencia del agua, de manera estacional o permanente. Con tal información se ha obtenido el área de la superficie de agua superficial en las Lagunas de Tajzara, y la misma se ha comparado con los índices Oceanic Niño Index (ONI), obteniéndose coincidencias aceptables de su representación.

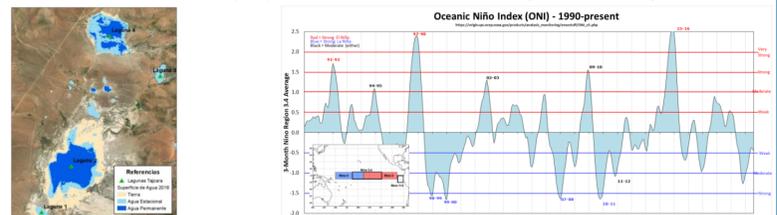


Figura 12. Superficies de agua SDG6.6.1 Figura 13. Índices ONI región 3.4

Los valores del nivel de agua de superficie continental medidos por el satélite ICESat-2 en las Lagunas de Tajzara, tienen la particularidad de que en algunas trayectorias del RGT se atraviesan 3 lagunas a la vez. Este aspecto es importante a la hora de tener un sistema de monitoreo de los niveles en las Lagunas de Tajzara. Los valores exponen ser consistentes, y sólo el nivel de fecha 28/10/2020 expone una magnitud de los valores del nivel del GT1L y GT1R diferenciados en 10 cm.

Tabla 4. Nivel de agua ICESat-2 Tajzara

Fecha	Track	Altura promedio (msnm)	H <sub>media</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>min</sub>	Beam	Ground Track	Diferencia (m)	Rango (m)	Desviación estándar (m)	Número de datos	Diferencia nivel GT (m)	Estación hidrométrica San Jacinto - Sensor nivel (msnm)	Diferencia nivel (S) - (14) (m)
04/11/2018	343	3639.200		3639.200		Beam 6	GT1L	-0.07	0.0597	0.0300	6	6		
04/11/2018	329	3639.200		3639.200		Beam 5	GT1R	0.15	0.0789	0.0305	10	10		
04/11/2018	441	3661.660		3661.660		Beam 5	GT1R	0.0962	0.0315	0.011	20	20		
09/09/2020	5295	3638.305		3638.305		Beam 5	GT1L	-	0.0374	0.0104	14	13	Laguna 1	
09/09/2020	5219	3639.270		3639.270		Beam 5	GT1R	0.01	0.0361	0.0120	31	30	Laguna 4	
28/10/2020	5219	3639.260		3639.260		Beam 5	GT1R	-	0.0430	0.0100	2	2	Laguna 2	
09/02/2020	441	3661.280		3661.280		Beam 4	GT1L	-0.04	0.0379	0.0138	25	25	Laguna 4	
09/02/2020	441	3661.280		3661.280		Beam 5	GT1R	-	0.0360	0.0124	10	10	Laguna 2	
09/02/2020	529	3639.280		3639.280		Beam 5	GT1L	-0.01	0.0325	0.0135	4	4	Laguna 1	
09/02/2020	529	3639.280		3639.280		Beam 5	GT1R	-	0.0440	0.0120	10	10	Laguna 4	
04/08/2020	441	3661.830		3661.830		Beam 5	GT1R	-0.03	0.0393	0.0129	10	10	Laguna 4	
04/08/2020	441	3661.860		3661.860		Beam 3	GT1R	-	0.0327	0.0145	10	10	Laguna 4	
28/10/2020	529	3639.240		3639.240		Beam 5	GT1R	-	0.0394	0.0127	16	16	Laguna 1	
28/10/2020	529	3639.250		3639.250		Beam 3	GT1R	0.01	0.0381	0.0132	24	23	Laguna 1	
28/10/2020	529	3639.250		3639.250		Beam 5	GT1R	-	0.0387	0.0124	18	18	Laguna 4	
28/10/2020	529	3639.250		3639.250		Beam 5	GT1L	0.1	0.0302	0.0163	10	10	Laguna 4	
28/10/2020	529	3639.250		3639.250		Beam 5	GT1R	-	0.0406	0.0124	4	4	Laguna 2	
28/10/2020	529	3639.280		3639.280		Beam 5	GT1R	0.01	0.0375	0.0115	14	14	Laguna 4	

Los valores de la superficie de agua en las lagunas, procesados desde la base de datos Sustainable Development Goal indicador 6.6.1, exponen una correlación con los valores del índice ONI, pues los valores del área son sensiblemente menores cuando se tienen eventos Niño muy fuerte y moderado.

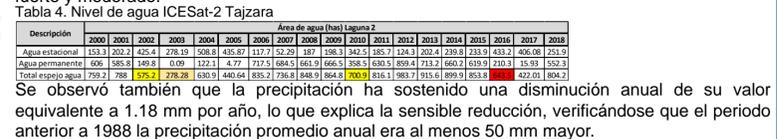


Figura 16. Superficies de agua SDG6.6.1 Figura 17. Precipitación anual estación Iscayachi

## Conclusiones

- La investigación realizada permite abordar las siguientes conclusiones y recomendaciones:
- Los datos del satélite ICESat-2 son muy útiles para el monitoreo de superficies de agua continental lejanas, y son altamente confiables pues en el caso del embalse San Jacinto se ha demostrado que los valores de nivel de agua determinados a través de los láseres del satélite ICESat-2 son consistentes con los medidos in situ a través del sensor de nivel de la estación hidrométrica San Jacinto.
- Es posible desarrollar indicadores sensibles para el fenómeno Niño mediante la estimación del área de superficie de agua de una laguna, más aún si se trata de una laguna que tiene un área de cuenca aporte relativamente pequeña, y mejor si es endorreica la cuenca y con precipitaciones escasas en su interior, y que a su vez tenga escasa o casi nula actividad antrópica en su interior como el caso de las Lagunas de Tajzara. Para objetos de predicción del fenómeno es necesario realizar investigaciones de correlación del índice ONI con el área de la superficie de la laguna a nivel trimestral.
- Se están desarrollando cada vez mayores y mejores iniciativas institucionales para poder medir diferentes parámetros de la superficie terrestre a través de sensores dispuestos en los satélites. Por ejemplo SWOT (2021) y Jason-CS/SENTINEL 6B (2025) sentará mayores avances tecnológicos y mejoras respecto de la precisión de las mediciones de los niveles de agua en la superficie terrestre.
- Es necesario y recomendable realizar una topografía de la laguna, que permita obtener parámetros morfológicos del vaso de almacenamiento de la laguna, de tal manera que pueda estimarse el área superficie de agua del espejo, mientras es inundado por el agua de precipitación y caudal de escorrentía que se descarga en su interior.
- Es necesario instalar sensores de nivel de superficie de agua en tierra, estos es a través de una estación hidrométrica de medición, que permitan realizar la medición de la superficie de agua de una laguna para objetos de comparar sus valores con los registros satelitales ICESat-2 y próximamente SWOT (2021) y Jason-CS/SENTINEL 6B (2025). Esos valores medidos serán necesarios para el desarrollo de una validación inicial de los niveles de agua de las lagunas, en relación a los niveles medidos por los sensores con los cuales se ha equipado un determinado satélite.
- Debido a que las mediciones de nivel de agua superficial de una estación hidrométrica y los niveles medidos y observados a través de los sensores de los diferentes satélites están en función al tiempo, en el cual una medición tiene una posición estática y la otra es dinámica, es necesario realizar estimaciones en función al tiempo, por lo que las siguientes investigaciones deberán sostener esta situación. En el caso de los niveles analizados del embalse San Jacinto durante todo el día de registro ha expuesto una variación de únicamente 7 cm, lo que no representa una gran variación, sin embargo, es necesario observar estos valores también cuando se tiene un escenario de alta variación del nivel de agua superficial.

## Reconocimientos

Se expresa un sentido reconocimiento por el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS) que ha permitido el desarrollo de la línea de investigación sobre el análisis de cuerpos de agua superficial embalsada y en estado natural, al Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA-Bolivia) por haber compartido la información de las estaciones hidrométricas de medición de niveles de agua en el embalse San Jacinto, al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) por compartir la base de datos climatológica de Bolivia, al programa Applied Remote Sensing Training Program (ARSET-NASA) por compartir conocimiento necesario para desarrollar investigación con datos confiables de sensores de medición satelital, a OpenAltimetry por compartir la base de datos y el conjunto de herramientas necesaria para analizar niveles de agua continental de superficie, a Sustainable Development Goal indicador 6.6.1 por compartir base de datos sobre indicadores de las metas del desarrollo sostenible relacionados con las superficies de agua, al Golden Gate Weather Service por el compartir la base de datos del fenómeno ENSO (Niño y Niña), y a la Conferencia Mundial de los Lagos por la oportunidad de permitir compartir el conocimiento sobre herramientas útiles para la evaluación de lagos en el mundo.

## Referencias

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2017. Estrategia para la Gestión Integral de los Humedales y sitios RAMSAR en Bolivia, La Paz – Bolivia  
 ATLAS/ICESat-2 L3A Along Track Inland Surface Water Data, Version 4. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL13.004>  
<https://ggweather.com/enso/oni.htm>  
<http://www.senamhi.gob.bo/sismet>  
<https://www.sdg661.app/downloads>  
<https://geo.qgb.bo/>  
<https://openaltimetry.org/data/icesat2/>