

Evaluación del Retroceso NDSI del Glaciar Illimani haciendo uso de Imágenes Satelitales

Adrián 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: Satelital NDSI Glaciar Indicadores

Este estudio analiza el retroceso del glaciar Illimani entre 2017 y 2024 utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2, Landsat 7 y Landsat 8-9. Aunque los datos de Sentinel-2 están disponibles desde 2016, el análisis comienza en 2017 debido a que la calidad y precisión de las imágenes mejoraron significativamente a partir de ese año. Este período se eligió para facilitar la comparación con los datos históricos de Landsat, que están disponibles desde 1986, y para abordar las diferencias en resolución espacial y temporal entre ambas plataformas. El período seleccionado también responde a la necesidad de comparar los datos más recientes con los históricos para validar los resultados, ya que los datos más antiguos de Landsat no ofrecen la misma resolución y frecuencia de actualización que Sentinel-2. La resolución espacial superior y la mayor frecuencia de paso de Sentinel-2 proporcionan una evaluación más detallada y precisa del glaciar, lo que es crucial para detectar cambios sutiles en su superficie.

Se aplicó el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) para medir la extensión del glaciar en distintos años. Los resultados revelan una pérdida total de 1315.82 hectáreas (13.16 km²), indicando una disminución significativa en la superficie glaciar. El estudio también consideró eventos climáticos notables, como nevadas intensas en 2017 y 2023, que podrían haber influido temporalmente en la superficie del glaciar.

1 Introducción

El Glaciar Illimani, ubicado en la cordillera de los Andes en Bolivia, es un recurso natural esencial para las comunidades locales como Challasirca, Tahuapalca, Lurgeta, Cachapalla, Cebollullo y Cohoni. Entre estas, Tahuapalca se destaca como uno de los mayores productores de hortalizas, tubérculos, durazno y maíz, desempeñando un papel clave al abastecer estos productos a la ciudad de La Paz. Estos municipios enfrentan problemas importantes en agricultura y abastecimiento de agua debido a que el glaciar es vital para el suministro de agua y el equilibrio de los ecosistemas de montaña.

En las últimas décadas, los glaciares globales han retrocedido alarmantemente debido al cambio

que ha aumentado las temperaturas y alterado las precipitaciones, afectando la disponibilidad de agua, la agricultura y la biodiversidad.

El estudio tiene como objetivo evaluar el retroceso del Glaciar Illimani usando imágenes de Sentinel-2 y Landsat 7, 8 y 9. Utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) para medir la cobertura de nieve en distintos años, el estudio compara los datos de ambas plataformas para identificar tendencias y discrepancias en el retroceso del glaciar.

El monitoreo satelital de glaciares es esencial para entender el cambio climático y su impacto. Este estudio proporciona datos actualizados que ayudan a desarrollar estrategias efectivas de gestión y conservación.

2 Descripción de la zona de estudio

El glaciar Illimani se localiza en la Cordillera Real de los Andes, en Bolivia, y es considerado uno de los glaciares más importantes del país. Se sitúa a una altitud de aproximadamente 6,460 metros sobre el nivel del mar, lo que lo convierte en una de las montañas más altas de la región. (es.wikipedia.org)

El glaciar cubre una superficie significativa que ha experimentado cambios notables en los últimos años, reflejando las tendencias del cambio climático. La región presenta un clima montañoso caracterizado por precipitaciones estacionales, que influyen en la acumulación de nieve y el deshielo del glaciar.

El glaciar Illimani es fundamental para el suministro de agua y agricultura de las comunidades cercanas, como Challasirca, Tahuapalca, Lurgeta, Cachapalla, Cebollullo y Cohoni. También sirve como un importante indicador del cambio climático en la región andina. Su retroceso acelerado en las últimas décadas destaca la urgencia de implementar un monitoreo continuo y políticas de conservación efectivas para mitigar los efectos del calentamiento global en los ecosistemas de alta montaña.

3. Metodología

3.1 Obtención de Imágenes

Se obtuvieron imágenes de los satélites Sentinel-2 y Landsat (incluyendo los satélites 7, 8-9) para el período de 2017 a 2024. Las imágenes fueron descargadas de plataformas como EO Browser, Land Viewer, Google Earth Engine y Copernicus.

A continuación, se presentan los resultados del mapeo utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) para las siguientes fechas:

- Sentinel-2: 26 de junio de 2024 (Fig. 1)

- Landsat 8-9: 16 de junio de 2024 (Fig. 2)

Estas imágenes muestran la estimación de la superficie glaciar basada en el índice NDSI.

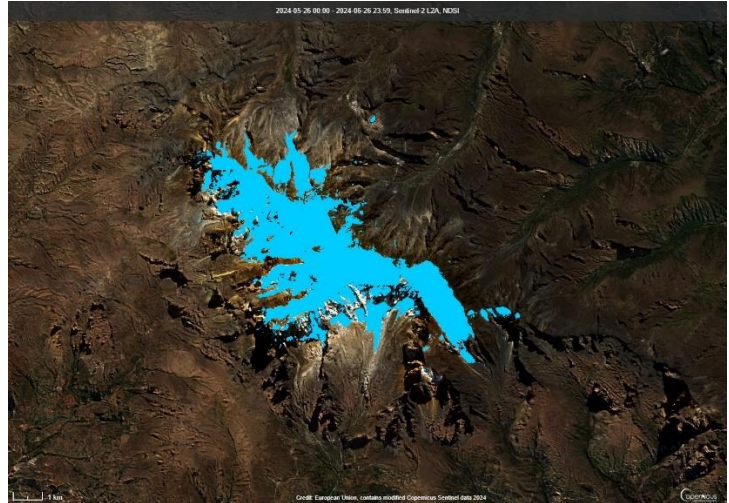


Figura 1: Índice NDSI-Sentinel 2. Elaboración propia a través de EO-Browser

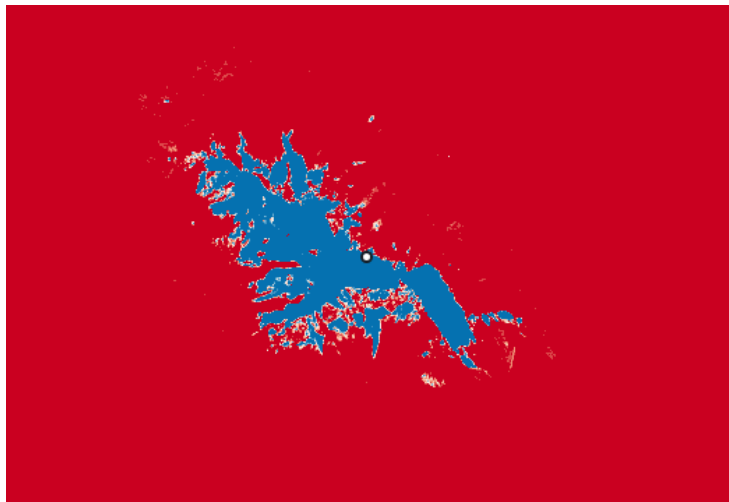


Figura 2: Índice NDSI-LANDSAT 7-9. Elaboración propia a través de EO-Browser

3.2 Procesamiento de Imágenes

Las imágenes han sido corregidas atmosféricamente y georreferenciadas para garantizar la precisión espacial. Para la estimación del área de superficie glaciar, se utiliza el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI).

El cálculo del NDSI se realiza aplicando la siguiente fórmula a cada imagen:

Sentinel-2:

$$NDSI = \frac{B3 - B11}{B3 + B11}$$

Landsat 7:

$$NDSI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5}$$

Landsat 8:

$$NDSI = \frac{B3 - B6}{B3 + B6}$$

3.3 Clasificación de Áreas de Hielo

Se definió un umbral de $NDSI > 0.42$ para clasificar áreas de hielo. Esta clasificación se realizó mediante el software QGIS, generando una capa binaria para cada imagen que distingue entre áreas de hielo y no hielo.

3.4 Medición de Áreas y Análisis Temporal

Se calcularon las áreas glaciales para cada año utilizando herramientas de análisis espacial.

Se compararon las áreas glaciales entre años para determinar el retroceso del glaciar.

4. Presentación de Resultados

4.1 Resultados obtenidos de la imagen Sentinel 2 y Landsat

El uso combinado de imágenes satelitales de Sentinel 2 y Landsat 7, 8-9, capturadas entre 2017 y 2024, proporciona una representación gráfica detallada de la evolución del glaciar Illimani a lo largo del tiempo. La integración de datos de ambos satélites permite una observación más clara y comprensible de las variaciones en el área del glaciar. Esta combinación facilita la identificación de tendencias y patrones en su dinámica, destacando los cambios en la extensión glacial. Por otro lado, la superposición de imágenes de diferentes períodos, provenientes de Sentinel 2 y Landsat, ayuda a analizar y contextualizar los impactos del cambio climático en la cobertura del glaciar, ofreciendo una visión más completa de su retroceso y recuperación a lo largo de los años.

A continuación, se presentan los mapas de Sentinel 2 y Landsat 7, 8-9, que muestran los cambios en la cobertura del glaciar Illimani desde 2017 hasta 2024.

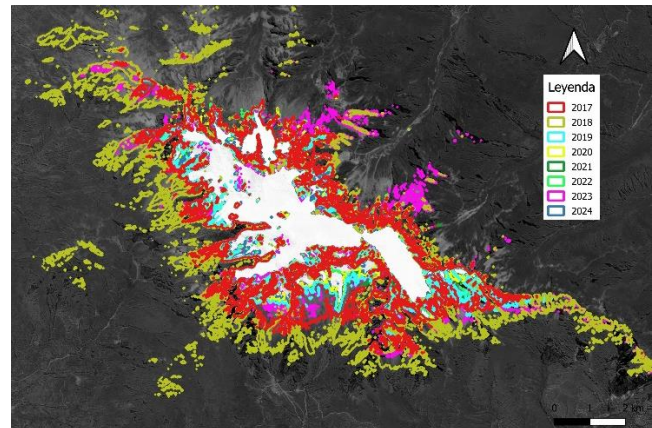


Figura 3: Cambios de cobertura desde 2017-2024 NDSI-Sentinel 2. Elaboración propia a través de EO-Browser

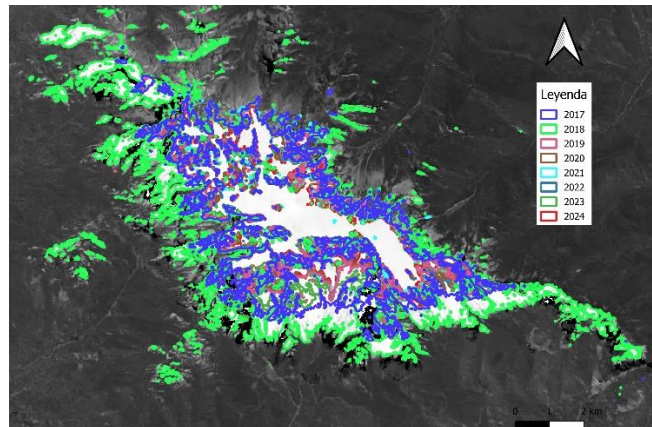
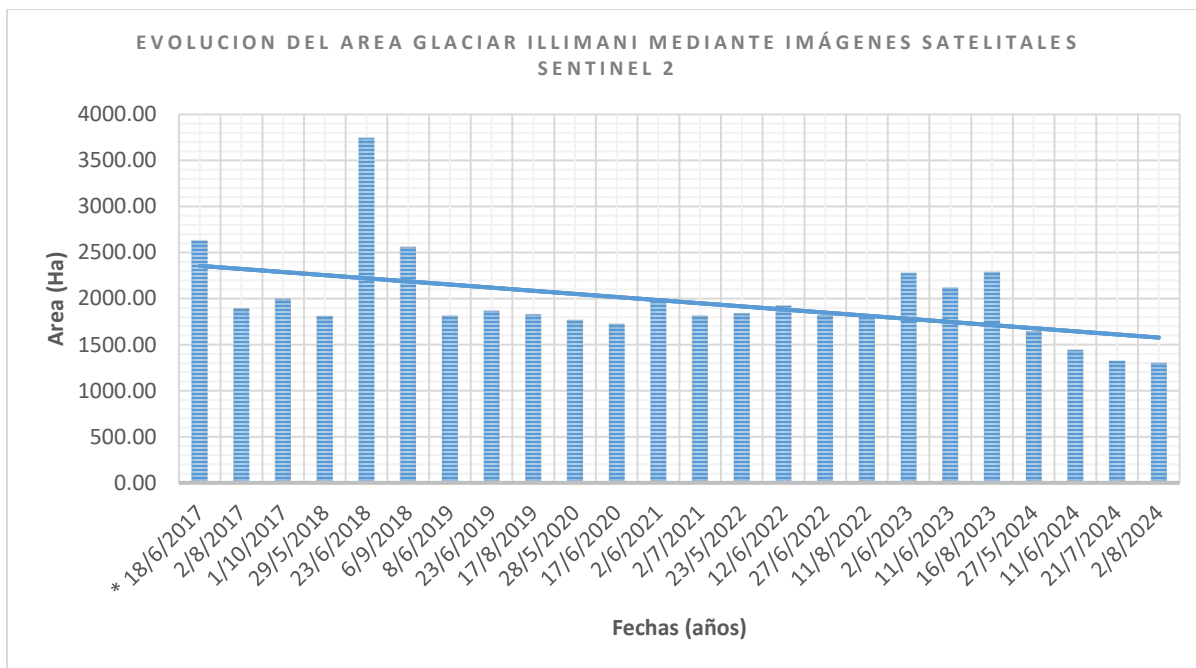


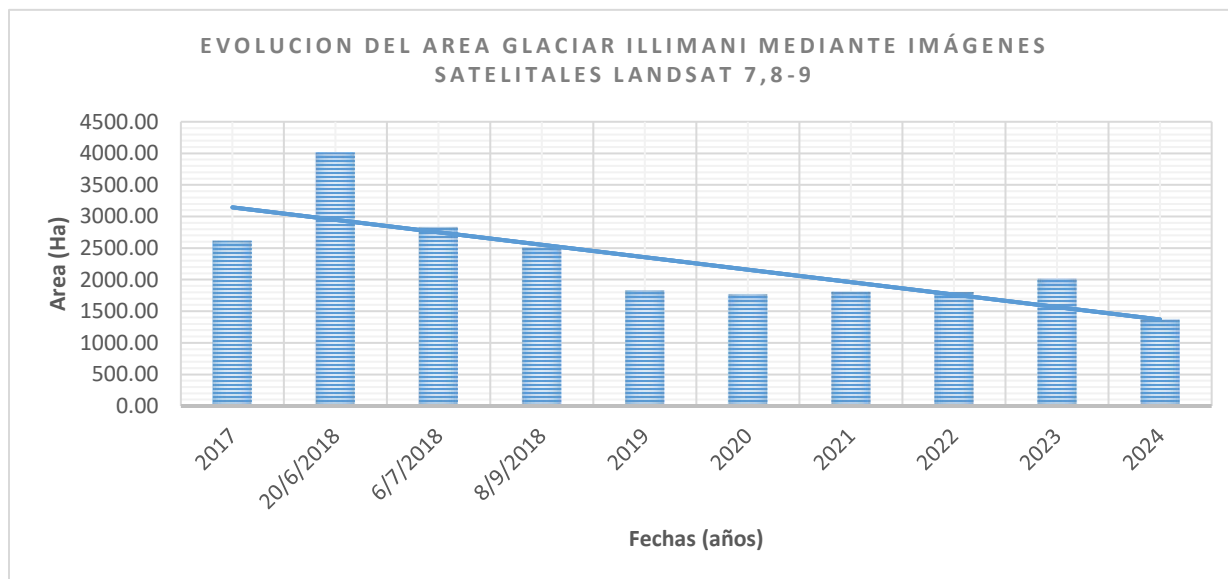
Figura 4: Cambios de cobertura desde 2017-2024 NDSI-LANDSAT. Elaboración propia a través de EO-Browser

El procesamiento de las imágenes satelitales ha revelado las áreas del glaciar Illimani para cada año, mostrando descensos y ascensos en su extensión.

A pesar de los aumentos intermitentes, la tendencia general es una pérdida neta de glaciar, como se observa en las tablas. Esta tendencia refleja una disminución continua en la cobertura glacial a lo largo del tiempo.



Grafica 1: Tendencia Temporal de la Evolución del Área según las Imágenes Satelitales de Sentinel 2. Elaboración propia



Grafica 2: Tendencia Temporal de la Evolución del Área según las Imágenes Satelitales de Landsat 7, 8-9. Elaboración propia

Las siguientes imágenes muestran la pérdida de cobertura del glaciar Illimani desde 2017 hasta 2024. El análisis de las imágenes satelitales de Sentinel 2 revela una pérdida total de 1,325.16 hectáreas en el área glaciar, mientras que las imágenes de Landsat indican una pérdida de 1,247.30 hectáreas. La discrepancia entre estos valores puede atribuirse a varias razones, como diferencias en la resolución espacial y temporal de los satélites, condiciones atmosféricas durante las capturas de imágenes y variaciones en los métodos de procesamiento de datos.



Figura 5: Pérdida de Cobertura desde 2017 – 2024 Sentinel 2. Elaboración propia a través de EO-Browser

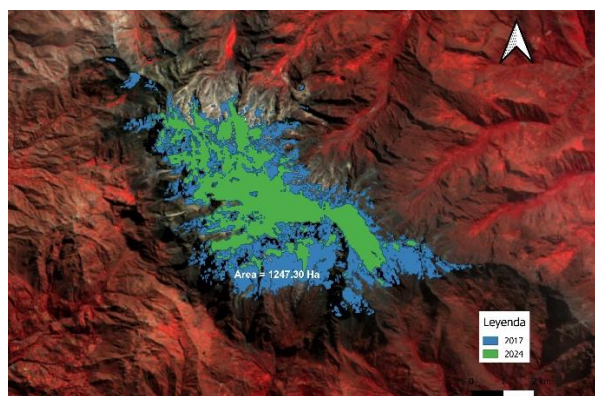
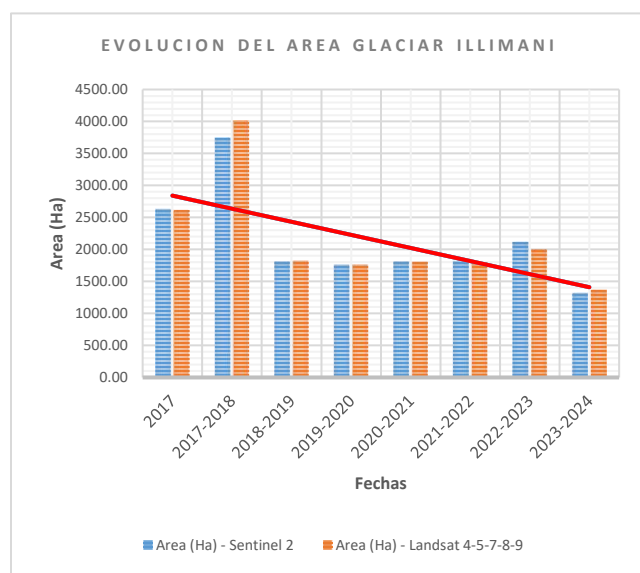


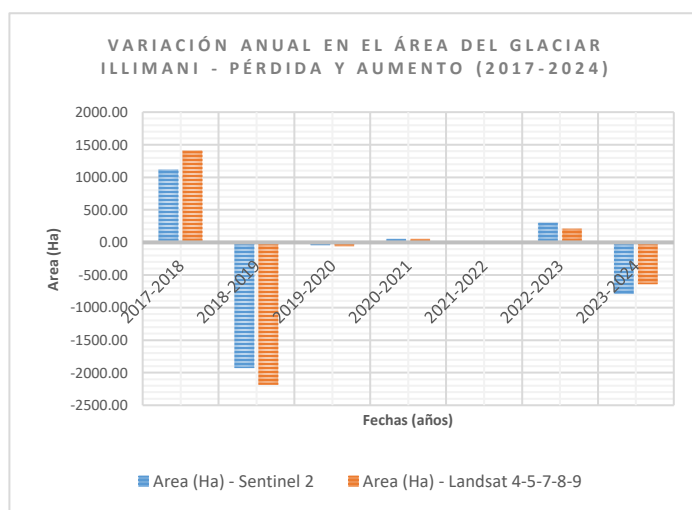
Figura 6: Pérdida de Cobertura desde 2017 – 2024- LANDSAT. Elaboración propia a través de EO-Browser

También se puede observar el cambio en la cobertura del glaciar Illimani desde 2017 hasta 2024 a través de las gráficas presentadas a continuación. Estas gráficas ilustran la evolución anual del área glaciar, destacando tanto los periodos de expansión como de retroceso.

Al comparar los datos de las imágenes satelitales de Sentinel 2 y Landsat, las gráficas proporcionan una visión visual clara de las tendencias a lo largo del tiempo. Los gráficos ilustran los cambios en la extensión del glaciar, permitiendo identificar patrones y anomalías en su comportamiento. Los valores positivos en los gráficos representan aumentos en el área glaciar, mientras que los valores negativos indican disminuciones. Estos gráficos facilitan una mejor comprensión de la dinámica del glaciar y el impacto del cambio climático en su evolución.



Gráfica 3: Evolucion del area glaciar Illimani. Elaboración propia



Gráfica 4: Variacion anual en el area del glaciar Illimani – Pérdida y Aumento (2017-2024). Elaboración propia

5. Evaluación de la Evolución del Área del Glaciar Illimani (2017-2024)

Entre 2017 y 2018, los datos provenientes de las imágenes satelitales de Sentinel-2 y Landsat muestran una expansión significativa del Glaciar Illimani, con aumentos de 1,114.15 hectáreas en Sentinel-2 y 1,399.16 hectáreas en Landsat. Este aumento puede estar relacionado con condiciones meteorológicas favorables que promovieron una acumulación de hielo y nieve. La verificación a través de medios de comunicación, como el diario *El Deber* y la página del OGIMET, confirma la ocurrencia de nevadas durante este período, apoyando la evidencia de un incremento en la cobertura glaciar.

Entre 2018 y 2019, el glaciar experimentó una notable reducción, con pérdidas de 1,928.20 hectáreas en Sentinel-2 y 2,186.49 hectáreas en Landsat. Esta disminución puede ser atribuida a un aumento en las temperaturas globales y eventos climáticos extremos. Los descensos bruscos en la cobertura glaciar en años como 2018 y 2023 reflejan cómo las nevadas intensas pueden dar lugar a una capa de nieve que, aunque inicialmente incrementa el área glaciar, se pierde rápidamente debido a los efectos del cambio climático y temperaturas elevadas, volviendo a su estado normal en poco tiempo.

En el período de 2020 a 2021, se observa una ligera recuperación con incrementos en el área glaciar, pero los datos de 2023 y 2024 muestran una aceleración del deshielo. En 2023, el glaciar mostró un aumento de 300.59 hectáreas en Sentinel-2 y 208.01 hectáreas en Landsat, mientras que en 2024 se produjo una significativa pérdida de 793.28 hectáreas en Sentinel-2 y 642.18 hectáreas en Landsat. Estos descensos reflejan una rápida pérdida de la capa de nieve acumulada, probablemente exacerbada por el continuo calentamiento global y cambios climáticos adversos.

Las discrepancias entre los datos de los satélites

pueden reflejar diferencias en la resolución y en las condiciones de captura de las imágenes. La siguiente tabla resume las variaciones en el área del glaciar a lo largo del tiempo:

Año	Área (Ha) - Sentinel 2	Área (Ha) - Landsat 7, 8-9	Sentinel 2 Perdida (Ha)	Landsat 7, 8-9 Perdida (Ha)
2017	2626.02	2616.68		
2018	3740.17	4015.84	1114.15	1399.16
2019	1811.97	1829.35	-1928.20	-2186.49
2020	1762.83	1768.26	-49.14	-61.10
2021	1813.21	1811.57	50.38	43.32
2022	1815.70	1803.55	2.49	-8.02
2023	2116.29	2011.56	300.59	208.01
2024	1323.01	1369.38	-793.28	-642.18

Tabla 1: Resumen de la Evolucion del area Glaciar Illimani Mediante Imágenes Satelitales. Elaboración propia

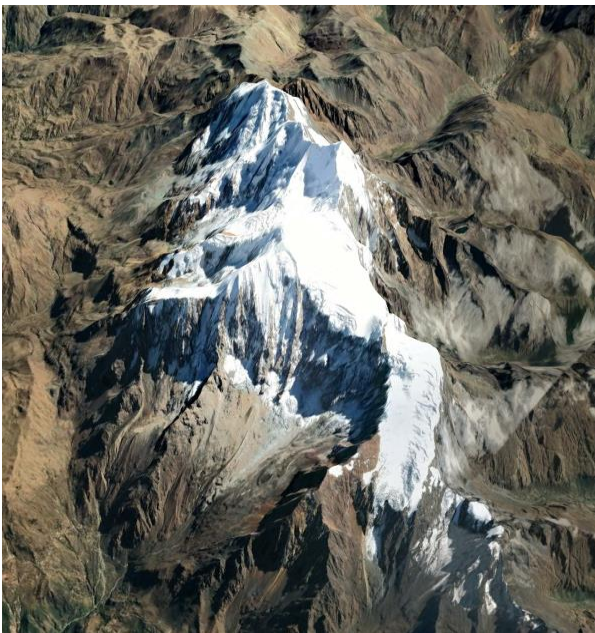


Figura 7: Imagen satelital del Glaciar Illimani. Elaboración propia a través de Google Earth

Como se muestra en la figura, la cara del glaciar Illimani orientada hacia el noreste recibe más radiación solar a lo largo del día, lo que acelera el deshielo. En cambio, la cara orientada hacia el suroeste recibe menos exposición solar, lo que contribuye a conservar más masa glaciar.

Esta evaluación proporciona una visión detallada de los cambios en el área del glaciar, destacando tanto los periodos de expansión como de reducción.

La integración de datos de imágenes satelitales con observaciones de nevadas y eventos climáticos proporciona un panorama más completo sobre la dinámica del glaciar y subraya la necesidad de estudios adicionales para comprender mejor las tendencias de deshielo y acumulación.

6. Conclusiones y Recomendaciones

El análisis de imágenes de Sentinel 2 y Landsat muestra que el área glaciar del Illimani ha experimentado cambios notables.

Entre 2017 y 2018, hubo una expansión significativa, con aumentos de 1,114.15 hectáreas (Sentinel 2) y 1,399.16 hectáreas (Landsat). Sin embargo, entre 2018 y 2019, el glaciar disminuyó en 1,928.20 hectáreas (Sentinel 2) y 2,186.49 hectáreas (Landsat). En 2022-2023, se produjo una recuperación, pero entre 2023 y 2024, el glaciar volvió a reducirse, con pérdidas de 793.28 hectáreas en Sentinel 2 y 642.18 hectáreas en Landsat. Estos cambios destacan la sensibilidad del glaciar a las variaciones climáticas.

Los modelos basados en imágenes satelitales de Sentinel-2 y Landsat proporcionan información valiosa sobre el Glaciar Illimani, pero su utilidad se limita principalmente a una descripción general. Estos modelos no alcanzan el nivel de precisión y detalle que ofrecen los estudios de campo directos. La información satelital, aunque esencial para realizar aproximaciones y análisis iniciales, no puede ser concluyente o contundente sin el respaldo de datos adicionales obtenidos mediante mediciones en terreno.

Dada la escasez de datos específicos sobre glaciares en Bolivia, es crucial complementar las imágenes satelitales con estudios de campo y la instalación de puntos de monitoreo adicionales. Para mejorar la precisión de los modelos y obtener una evaluación más completa, se recomienda instalar estaciones de medición en áreas críticas del glaciar, específicamente al norte y al sur del Illimani.

Estas regiones están especialmente propensas al retroceso del glaciar, y el monitoreo en estos puntos permitirá una mejor comprensión de su dinámica y una respuesta más efectiva a los cambios observados.

7. Referencias

- Juvenal Tordocillo Puchuc, Joel Rojas Acuña. Estimación del cambio de volumen del Glaciar Champará en la Cordillera Blanca de Ancash a partir de datos de Satélite en el Periodo 2000-2010
- Remigio Galárraga - Bladimir Ibarra. Montañas, Glaciares y Cambios Climáticos (1996)
- Thomas Condom, Wilson Suárez, Alejo Cochachin Rapre, Jesús Gómez. Variaciones glaciares y disponibilidad de agua en la Cordillera Blanca del Perú desde hace 40 años (2010)
- Jose Jesus Pasapera Gonzales, Christian Vargas, Carmen Villon. Comparación de Técnicas para el Mapeo de Cobertura Glaciar con Imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú (2009)
- López, M. A. (2019). Estimación de cambios en el glaciar Illimani mediante teledetección (Tesis de maestría, Universidad de La Paz).
- https://eldeber.com.bo/extra/nevada-provoca-cierre-de-vias-en-el-altiplano-y-el-frio-seguira-en-el-pais_102904 (2018)
- https://eldeber.com.bo/pais/nevada-obliga-a-cerrar-algunas-vias-en-la-paz_335889 (2023)
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Illimani>