

## **REPRESENTACIÓN TOPOGRÁFICA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES SOBRE EL CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR**

**Ortone Lois, Ailin Sol<sup>1,2</sup>, Pilato, Guido Luis<sup>2</sup>, Gari, Jorge Marcelo<sup>1,2</sup>, Macote Yparraguirre,  
Erick<sup>2</sup>, Cook, Luisina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Sensores Remotos – Fuerza Aérea Argentina.

Belisario Roldán 4511, 1425, CABA

ailin.ortone@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo.

París 532, 1706 Haedo, Buenos Aires

### **RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo consiste en el trazado de los puntos de mayor altura pertenecientes al Campo de Hielo Patagónico Sur ubicado entre los paralelos 48°20' de latitud S hasta los 51°30' de latitud S, utilizando datos satelitales provenientes de modelos digitales de elevación e imágenes ópticas y radar.

El Campo de Hielo Patagónico Sur es la tercera extensión de hielos continentales más grande del mundo luego de la Antártida y Groenlandia, y está ubicada en el sudoeste de la provincia de Santa Cruz, cerca de la localidad de El Calafate. El Parque Nacional Los Glaciares es una de las zonas de estudio que se desarrollan en este trabajo, y abarcan parte de este campo.

Un modelo digital de elevación o DEM según sus siglas en inglés, describe la topografía del terreno a través de puntos acotados definidos como una terna compuesta por un valor de altitud  $z$  definido al nivel del mar, y sus correspondientes valores de coordenadas  $x$  e  $y$ , distribuidos en forma homogénea sobre la superficie terrestre. Los DEM utilizados se obtuvieron de datos suministrados mediante el sensor SAR PALSAR a bordo del satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite).

La estructura de estos datos de altura está representada de forma vectorial como también raster, según su fuente. Son sumamente importantes para hacer relevamientos topográficos y de redes hidrográficas, determinar alturas en zonas de montañas y altiplanos como este caso, así como para realizar cálculos de pendientes y curvas de nivel que pueden utilizarse en observaciones de deslizamientos en el campo de hielo y glaciares de ladera. Asimismo, se utilizaron imágenes satelitales ópticas para el reconocimiento del terreno y su representación en forma tridimensional, de manera de lograr una mejor visualización de la topografía y el relieve de la zona.

Con este estudio solo pretendemos dar una aproximación para futuras representaciones cartográficas que lleven a cabo los organismos oficiales.

### **ABSTRACT**

The aim of this work consists in the delineation of the highest points of the Southern Patagonian Ice Field located between the parallels 48 ° 20 'of latitude S up to 51 ° 30' of latitude S, using satellite data from digital models of elevation and optical images and radar.

The Southern Patagonian Ice Field is the third largest continental ice supply in the world after Antarctica and Greenland, and is located in the southwest of the province of Santa Cruz, near the town of El Calafate. Los Glaciares National Park is one of the study areas found in this work, and cover part of this field.

A digital elevation model or DEM according to its acronym in English, describes the topography of the terrain through bounded points defined as a triple composed of a value of altitude  $z$  defined at sea level, and their corresponding values of coordinates  $x$  and  $y$ , distributed in homogeneous shape on the earth's surface.

The DEMs were obtained from the data supplied by the SAR PALSAR sensor on the ALOS satellite (Advanced Earth Observation Satellite).

The structure of this height data is represented vectorially as well as raster, according to its source. They are extremely important to survey topographic and hydrographic networks, determine heights in mountain areas and highlands as this case, as well as to perform slope calculations and contours that can be used in observations of landslides in the ice field and glaciers of hillside. Likewise, optical satellite were used to recognize the terrain and its representation in three-dimensional form, in order to achieve a better visualization of the topography and relief of the area.

With this study we only intend to give an approximation for future cartographic representations carried out by official organisms.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

En “Viaje a la Patagonia Austral”, libro publicado por Francisco P. Moreno en 1879, donde se narra la exploración del río Santa Cruz y la navegación sobre el lago Argentino, ya se comenzaba a describir la topografía de la Patagonia. Ese recorrido guiado en parte con las descripciones publicadas por Charles Darwin y el Comandante Fitz Roy en su viaje a bordo del HMS Beagle, fue un importante reconocimiento topográfico realizado por el perito Moreno y dio lugar a develar la “Llanura del misterio”, como le llamaba Fitz Roy a la zona. En esa publicación ubicó distintos puntos geodésicos, tales como Monte Lavalle, Monte Fitz Roy, Cerro de Mayo, Cerro Avellaneda y Punta Bandera entre otros; donde también describió la existencia de ventisqueros, entre ellos el hoy conocido Glaciar Upsala.

A través del libro “Inventario de los glaciares existentes en la vertiente Argentina entre los paralelos  $47^{\circ} 30'$  y  $51^{\circ} S$ ”, publicado por el Instituto Nacional del Hielo Continental Patagónico (1960) se expusieron los principales picos de gran parte del área de estudio pero principalmente se describieron en detalle los ventisqueros existentes de la zona, ofreciendo nuevos relevamientos glaciológicos y topográficos al área.

Tanto el Ing. Bertone, su compañero de viajes el Coronel (R) Ing. Emiliano Huerta como el Padre salesiano Alberto De Agostini fueron grandes exploradores y pioneros en recorrer la zona, identificando y fotografiando áreas hasta ese momento desconocidas y sobre todo levantando la primer cartografía luego registrada en el entonces IGM.

Quedando plasmados sus memorables viajes en dos libros que se convirtieron en consulta obligada de los estudios glaciarios en la zona por sus crónicas de viajes y rigor científico, a saber “Aspectos glaciológicos de la zona del Hielo Continental Patagónico.” (Bertone, 1997) y “Andes Patagónicos” (De Agostini, 1941).

Actualmente se dispone de herramientas que hacen posible el desarrollo de productos topográficos de forma remota, lugar desde el cual nuestro grupo de investigación ha estado trabajando en teledetección en la zona del Campo de Hielo Patagónico Sur, con viajes de campo según sea el trabajo propuesto.

Desde 1995 se trabajó en varios proyectos de investigación en teledetección, adquiriendo así gran experiencia en el procesamiento digital de imágenes satelitales ópticas y de radar y en la generación de productos de alto valor agregado.

### 1.1.- Zona de estudio

El Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) es la tercera área cubierta de hielo en la Tierra que es considerada como un regulador muy importante en el medio ambiente local y el clima global.

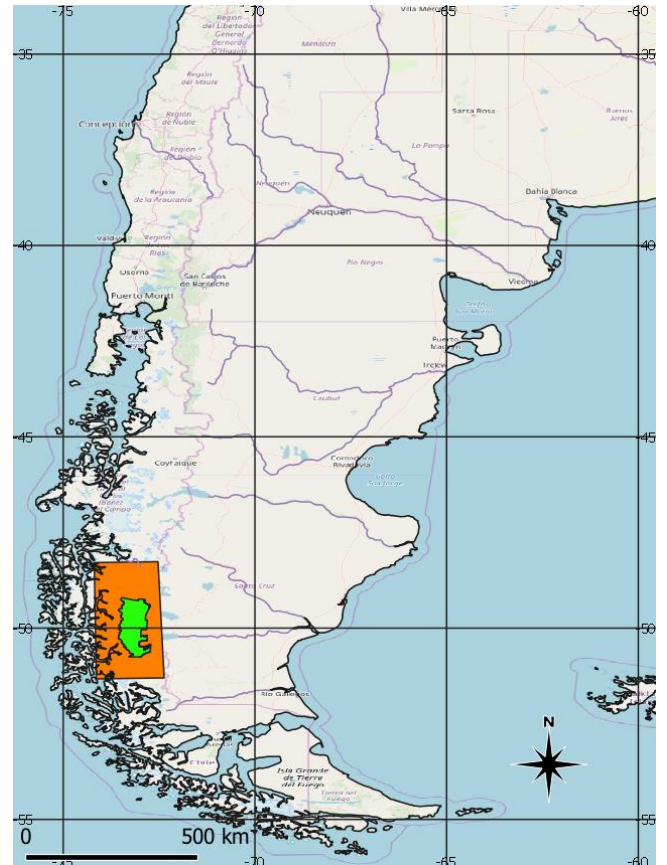
Se extiende desde 49.5 hasta 51.5 S a lo largo del meridiano 73.5 W. Entre los años 1944/1945 cubría una superficie de aproximadamente 13500 km<sup>2</sup> la cual retrocedió a 13000 km<sup>2</sup> según mediciones en una imagen Landsat TM. Actualmente posee una superficie aproximada de 12573 km<sup>2</sup> en el período 2015/2016 [1].

El Parque Nacional Los Glaciares (PNLG), creado por decreto nacional bajo la ley 105433/37, bajo la Administración de Parques Nacionales, forma parte del CHPS y está ubicado en el sudoeste de la provincia de Santa Cruz como se ve en la Figura 1, comprendiendo como tal un Sitio de Patrimonio Mundial. Contiene los glaciares del Lago Argentino y Lago Viedma, el cual cubre 7269,27 Km<sup>2</sup> comprendidas en 49° 56' 48,85" latitud Sur y 73° 9' 28,71" latitud Oeste, según datos propios. Este se desarrolla a lo largo de la cordillera de Los Andes, con altitudes de 3400 m y drena a través de glaciares temperados que pueden terminar en tierra, lagos proglaciares o fiordos [2].

El parque posee una particular topografía donde se ubican distintos cordones montañosos, extensos altiplanos como el Italia que conecta las áreas de acumulación de los dos más grandes glaciares del Parque que son el Upsala y el Viedma, amplios lagos glaciarios como los lagos Argentino y Viedma y una gran cantidad de glaciares de valle compuesto cuyas lenguas son modeladoras de profundos valles entre montañas.

Del lado argentino, sobre las cuencas del Lago Viedma y Lago Argentino, descienden 13 grandes glaciares que están unidos a la gran masa del CHPS y que de norte a sur son los glaciares

Marconi, Viedma, Moyano, Upsala, Agassiz, Bolados, Onelli, Peineta, Spegazzini, Mayo, Ameghino, Moreno y Frías, varios de los cuales llegan a tocar las aguas de estos grandes lagos [3].



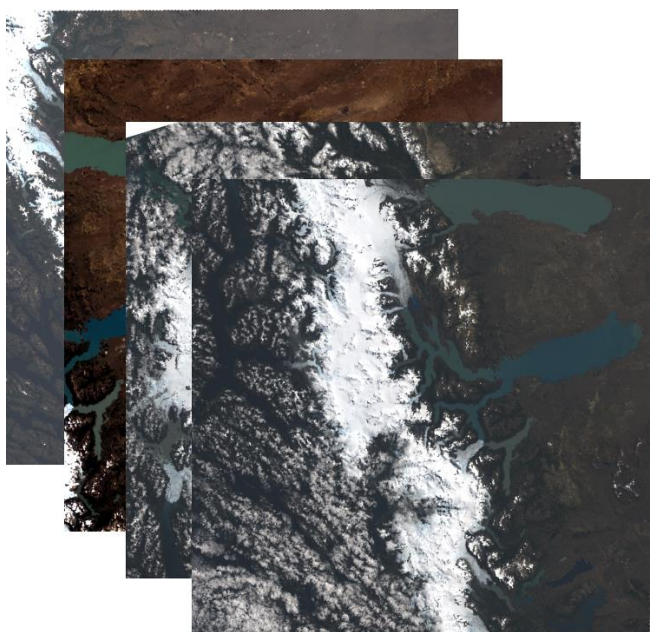
**Figura 1.** Ubicación del CHPS (Naranja) y el PNLG (verde).

## 2.- METODOLOGÍA

### 2.1.- Imágenes ópticas

Se buscaron imágenes ópticas de fines de la época estival, entre los meses de enero y marzo. Según la disponibilidad de imágenes que pueden bajarse gratuitamente de internet, se seleccionaron las siguientes del satélite Landsat 8 OLI con un tamaño de píxel de 30 m, que cubren la totalidad del CHPS (Figura 2):

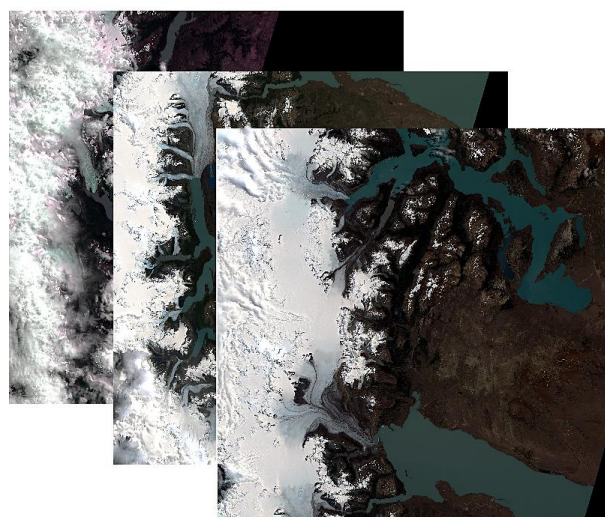
- LC08\_L1TP\_230095\_20190203
- LC08\_L1TP\_230096\_20190203
- LC08\_L1TP\_231094\_20190109
- LC08\_L1TP\_231095\_20190109
- LC08\_L1TP\_231096\_20190314
- LC08\_L1TP\_232094\_20190116



**Figura 2.** 6 Imágenes LC8 OLI de Enero/Marzo 2019 [4]

Por otro lado, se descargaron imágenes S2A del satélite Sentinel 2 A y B de la ESA que abarcan el Parque Nacional, las cuales poseen una resolución espacial de 10 m de píxel (Figura 3):

- S2B\_MSIL2A\_20190111T142749\_N0211\_R053\_T18FXJ\_20190111T182955
- S2A\_MSIL2A\_20190116T142751\_N0211\_R053\_T18FXK\_20190116T183638
- S2A\_MSIL2A\_20190116T142751\_N0211\_R053\_T18FXL\_20190116T183638



**Figura 3.** 3 Imágenes Sentinel 2 [5]

Las imágenes se bajaron del sitio de la USGS U.S. Geological Survey [4], del sitio de la ESA [5] respectivamente. Se considera ideal contar con imágenes del mismo mes o con la menor cobertura de nieve posible para identificar las áreas del glaciar. Esto se dificultó ya que debido a la posición geográfica de la zona, ésta se encuentra gran parte del año cubierta de nubosidad.

### 2.2.- DEMs

Un DEM es un Modelo Digital de Elevaciones que representa la elevación de la superficie en forma digital con respecto a un datum de referencia. Se utilizan para determinar ciertos atributos del terreno como la elevación en cualquier punto, pendiente y aspecto. Los modelos se descargaron a través del portal Vertex ASF's [6], donde se utilizaron 17 DEMs que corresponden al Satélite ALOS PALSAR V2 (Advanced Land Observing Satellite - Phased

Array type L-band Synthetic Aperture Radar, Versión 2), los cuales tienen una resolución espacial de 12,5 m y son distribuidos por Alaska Satellite Facility's, actual centro de distribución para Latinoamérica.

A efectos de medir las mayores elevaciones, se utilizaron 17 modelos entre los meses de enero y marzo del 2010, los cuales se corresponden espacialmente con las imágenes Landsat y Sentinel, y que cubren todo el CHPS (Figura 4):

- AP\_22392\_FBS\_F6140\_RT1.dem
- AP\_22246\_FBS\_F6190\_RT1.dem
- AP\_22144\_FBS\_F6160\_RT1.dem
- AP\_22144\_FBS\_F6150\_RT1.dem
- AP\_22144\_FBS\_F6140\_RT1.dem
- AP\_22071\_FBS\_F6190\_RT1.dem
- AP\_22071\_FBS\_F6180\_RT1.dem
- AP\_22071\_FBS\_F6170\_RT1.dem
- AP\_21648\_FBS\_F6170\_RT1.dem
- AP\_21648\_FBS\_F6180\_RT1.dem
- AP\_21648\_FBS\_F6150\_RT1.dem
- AP\_21225\_FBS\_F6170\_RT1.dem
- AP\_21225\_FBS\_F6160\_RT1.dem
- AP\_21225\_FBS\_F6150\_RT1.dem
- AP\_21225\_FBS\_F6140\_RT1.dem
- AP\_21202\_FBS\_F4610\_RT1.dem
- AP\_21202\_FBS\_F4620\_RT1.dem

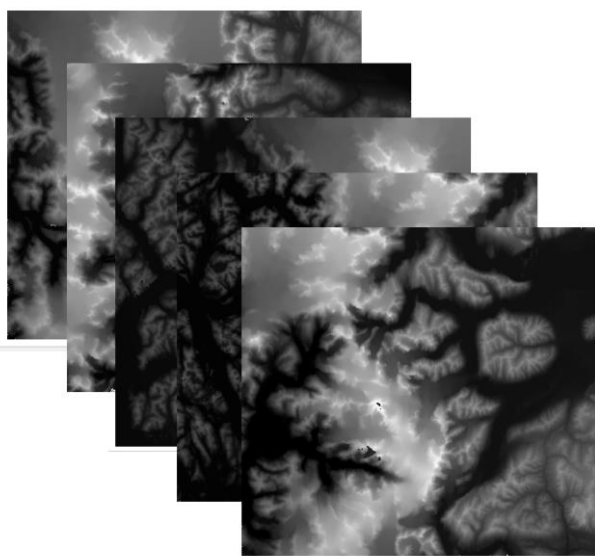


Figura 4. DEMs ALOS PALSAR V2 [6]

Con el fin de automatizar las descargas, se compiló un script en Python, que permitió continuar con el trabajo mientras se ejecutaba el código y completaban los archivos de imágenes.

Para el estudio y análisis de la información geoespacial se hizo uso del software QGIS 3.6. Éste es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License, basado en un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Se optó por esta alternativa debido a la versatilidad que ofrece, ya que soporta numerosos formatos de datos vectoriales, rásters y bases de datos; además de funcionalidades ofrecidas por el constante desarrollo de nuevos plugins.

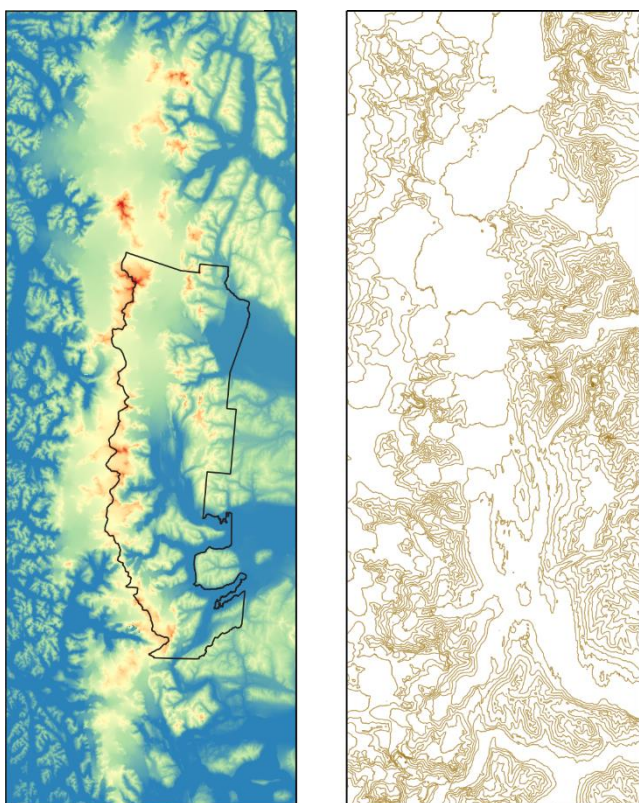
### 3.- DESARROLLO

Las imágenes y los DEMs se convirtieron a un mismo sistema de proyección UTM WGS-84 Zona 18S, y se pre procesan de modo de homogeneizar sus realces y nomenclatura, ya que provienen de diferentes satélites y poseen distintas fechas de adquisición.

Se descargaron de la web “La Infraestructura de Datos Espaciales” de la Administración de Parques Nacionales de Argentina [7] los datos vectorizados actualizados al 20/03/2018, con información geográfica del parque para posteriormente ser agregados como capa en la plataforma QGIS, además de los límites políticos suministrados por el IGN.

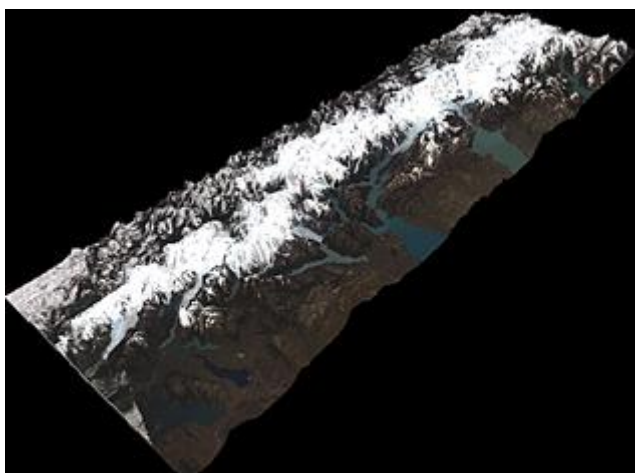
Se realizó un mosaico de las imágenes DEM que abarca todo el campo de hielo, y haciendo uso de los datos vectorizados, se elaboró una máscara del CHPS y el PNLG, para con ellas generar recortes de las zonas de interés, necesarios para delimitar sus límites geográficos.

Con ese paso establecido, se colocó en el mosaico un degradé de colores desde el azul hasta el rojo para discernir y realzar las zonas que tendrán las mayores alturas. Para representar la superficie del CHPS en el mapa, se generaron curvas de nivel y pendiente, como parte del análisis topográfico del terreno para determinar las alturas (Figura 5).



**Figura 5.** Recortes del CHPS. DEM con Límites del PNLG y Curvas de Nivel.

El modelado tridimensional producido a partir del mosaico DEM ofrece una representación digital de los mapas topográficos, ofreciendo un objeto 3D más realista. Se utilizó el mosaico de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2, para montar sobre el modelo. (Figura 6).



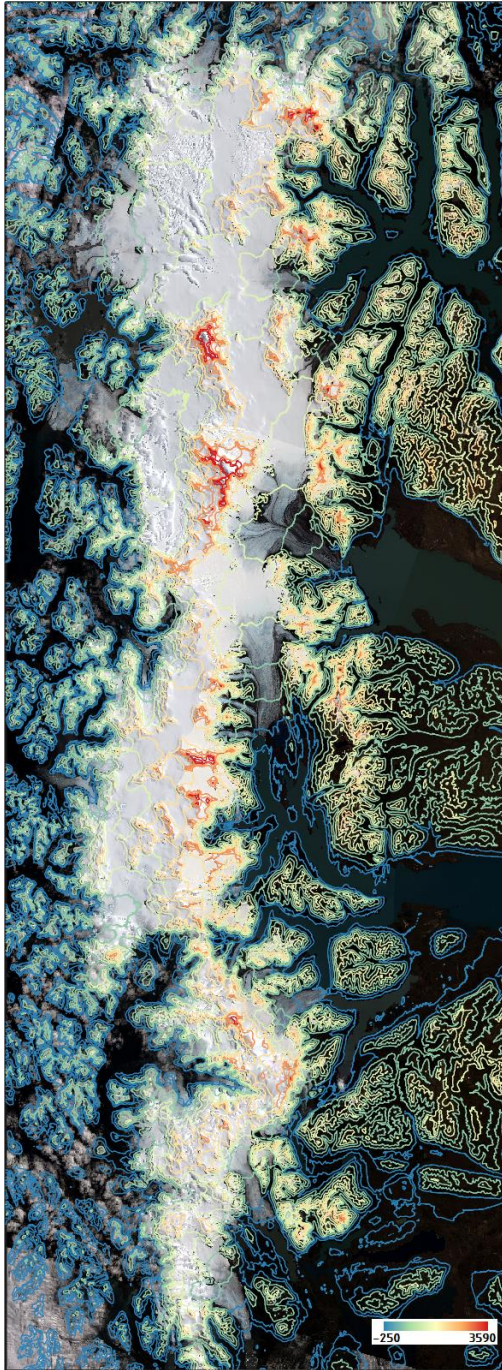
**Figura 6.** Modelado 3D del CHPS con mosaico de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2

Se generaron dos mosaicos a partir de las imágenes LC8 y uno para Sentinel 2, utilizando la Banda 8 denominada pancromática, cuya resolución es de 15 metros, y las de color natural de LC8 y Sentinel 2 (Figura 6), con la finalidad de observar similitudes respecto a los DEMs Alos Palsar V2. Debido a la densa cobertura de nubes en el CHPS, se obtuvieron imágenes Sentinel 2 sólo para cubrir el PNLG (Figura 7).



**Figura 7.** Recorte del PNLG con imágenes Sentinel 2

Por último se montaron las curvas de nivel sobre el recorte del CHPS en color natural para poder visualizar de forma habitual las deformaciones del terreno con el agregado de la información altimétrica (Figura 8).

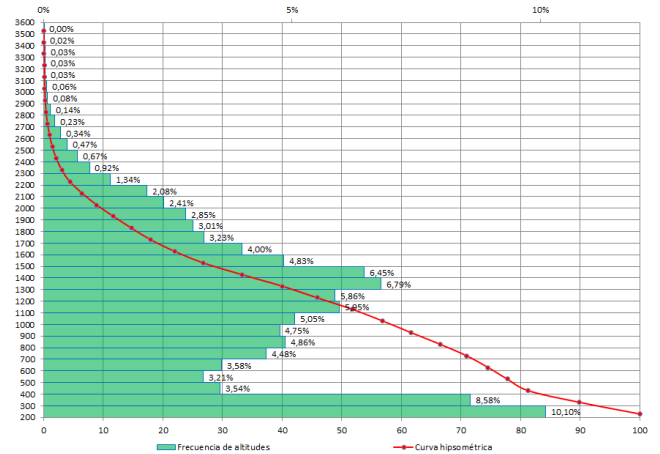


**Figura 8.** Mosaico de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2, con curvas de nivel

### 3.1.- Resultados

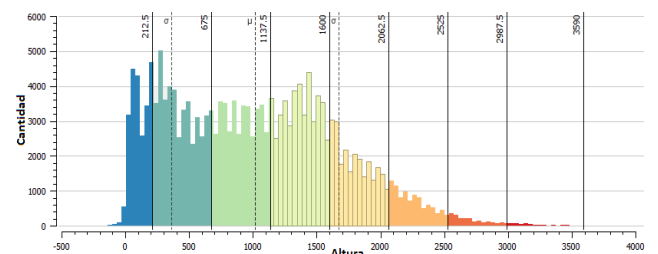
Se generó una curva hipsométrica del PNLG (Figura 9), colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se

encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca [8]. De esta forma, se indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. Normalmente poseen una forma de S, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja exhibiendo un punto de inflexión de ubicación variable [9].



**Figura 9.** Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes del PNLG

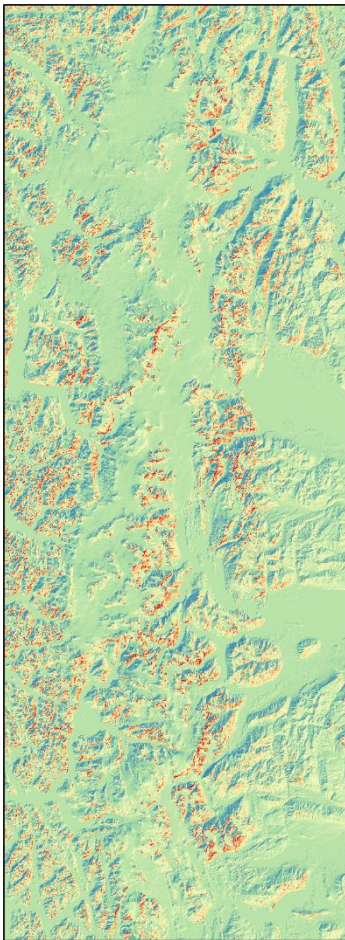
Por otro lado, se obtuvo un histograma de frecuencias altimétricas del campo de hielo, donde se observa que el valor medio de altura en el CHPS es de 1137,5 m (Figura 10). Esta representación de la superficie contiene la misma información que la curva hipsométrica, pero a través de un esquema diferente y da una idea probabilística de la variación de alturas.



**Figura 10.** Histograma de frecuencias altimétricas del CHPS

Con esta base cartográfica geomorfológica se elaboraron tres mapas del CHPS. Por un lado, se representaron las alturas en un mapa hipsométrico o topográfico que refleja el relieve mediante curvas de nivel que conectan puntos de la misma altura; cuanto menos espacio hay entre líneas, mayor es la pendiente relativa (Figura 11) [10].

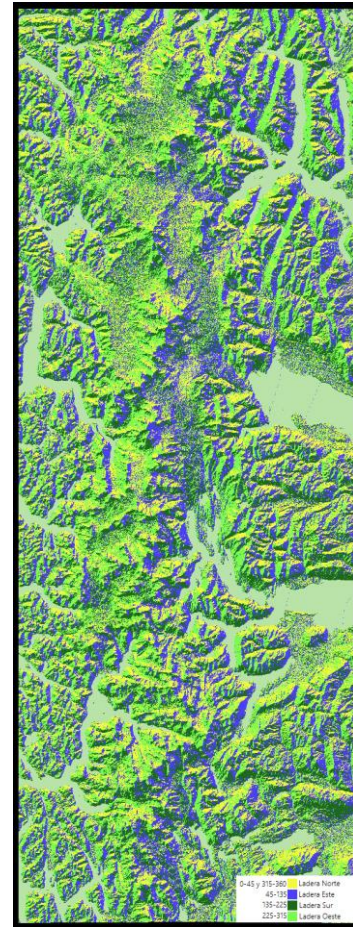
De esta forma se logra resaltar las diferencias de altitud que muestra la cuenca e identificar los principales rasgos del relieve [11].



**Figura 11.** Mapa Hipsométrico del CHPS

El segundo mapa es de orientación de vertientes; se calculó la orientación de las laderas según su exposición a las vertientes Norte, Este, Sur y Oeste. Como resultado obtuvimos un mapa temático con valores de pendientes comprendidos entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  respecto a los puntos cardinales, donde distintos colores reproducen la orientación de las laderas (Figura 12). Este tipo de

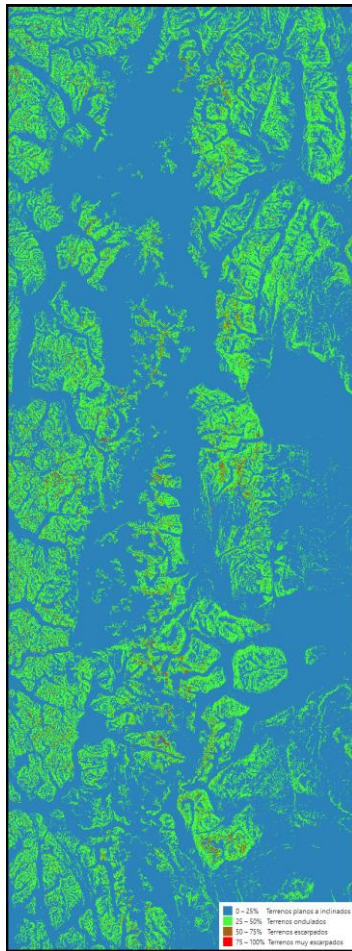
representación es útil a la hora de delinear límites geográficos.



**Figura 12.** Mapa de Orientación del CHPS

El último mapa generado es el mapa de pendientes, el cual realiza análisis de pendientes partiendo de Modelos Digitales de Elevación (DEM) bajo unidades de medida en grados o porcentaje (Figura 13). Este se obtuvo por medio de operaciones algebraicas y trigonométricas relacionadas con las curvas de nivel. Las pendientes medias variarán de acuerdo con las geoformas [11].

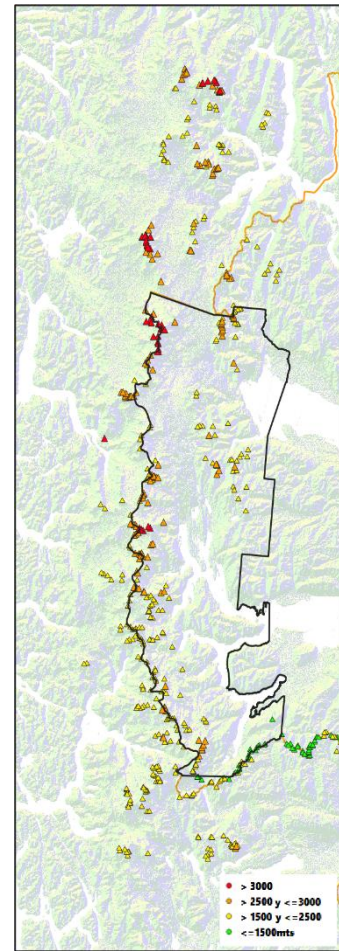




**Figura 13.** Mapa de Pendientes del CHPS

La combinación de ambos parámetros (pendiente y orientación) mejora la percepción de la morfología del territorio. Irregularidades territoriales, accidentes geográficos o infraestructuras antrópicas quedan al descubierto al estudiar ambos mapas temáticos de forma combinada.

A partir de las curvas de nivel obtenidas de los datos DEM superpuestas al mapa de orientación de pendientes realizado para el CHPS, se establecieron los puntos con mayores alturas filtrando las curvas por sus atributos y buscando los centroides. Esta tarea se aceleró haciendo uso del procesamiento por lotes. Los datos obtenidos se graficaron sobre dicho mosaico (Figura 14).



**Figura 14.** Puntos de altura montados sobre mapa de orientación

Mediante el uso de los puntos adquiridos con el relevamiento topográfico de alturas elevadas, se trazaron perfiles divididos en 4 secciones, delimitadas por Cerro La Mesa - Cerro Stokes - Cerro Murallón - Cerro F. Moreno - Monte Fitz Roy (Figura 15).

El perfil topográfico es una representación gráfica de una sección vertical de la superficie mediante una línea de contorno o la intersección de un plano vertical con la superficie terrestre [12]. En la literatura científica usualmente se le denomina perfil altimétrico [13], donde en el eje de abscisas se encuentran los valores de distancia y en el de ordenadas los valores de elevación de una cierta sección del territorio (en metros) [14].

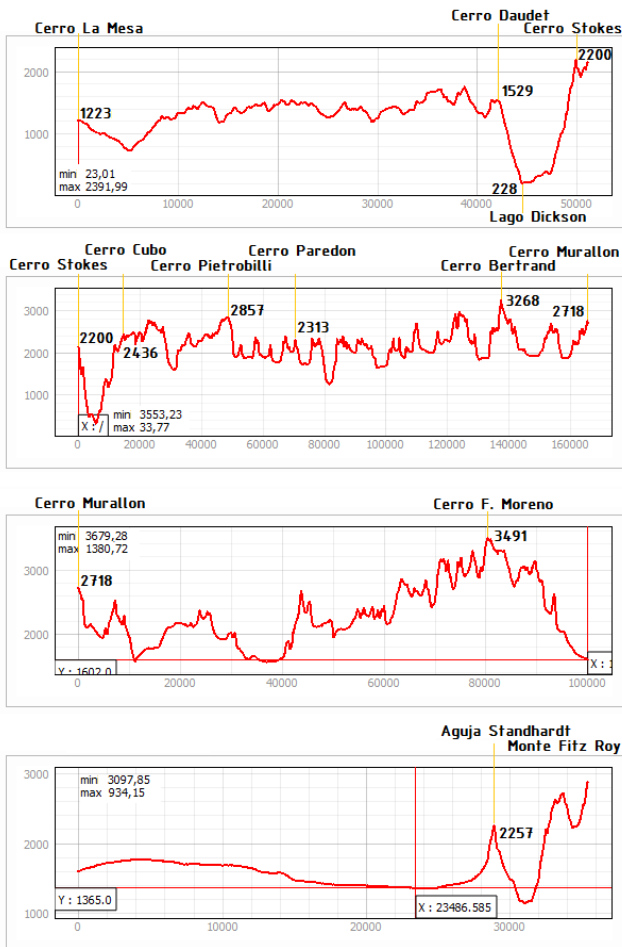


Figura 15. Perfiles topográficos del CHPS entre el Cerro La Mesa y el Monte Fitz Roy

## CONCLUSIONES

Como se adelantó en el resumen, el objetivo de este trabajo se centró en demostrar que con la combinación de imágenes satelitales y avanzados DEM se puede hacer un relevamiento topográfico bastante preciso del área de estudio. Esto es posible aún en lugares de difícil acceso, pudiéndose generar productos de interés cartográfico con las herramientas de software disponibles. Los resultados son muy útiles para toma de decisiones, trazado de redes hidrográficas, cálculo de pendientes, estudio de áreas de drenaje, monitoreo de retroceso de frentes glaciares, actualización de curvas de nivel e imágenes 3D.

De los mapas de orientación se puede observar que las diferencias de pendientes se

concentran en áreas de pendientes pronunciadas, mientras que las diferencias de orientación están generalmente en áreas más planas, de pendientes suaves o con pocas deformaciones en el relieve [15].

El trazado del perfil topográfico se elaboró siguiendo la línea de frontera internacional Argentino-Chilena, así como también los límites del PNLG, los cambios de orientación en las pendientes y las cotas medidas sobre el DEM; pudiendo comprobar que la unión de picos elevados a través de las líneas de inflexión que se observan en el mapa de orientación de laderas conforman una metodología apropiada para la representación del relieve del terreno.

## REFERENCIAS

- [1] MALZ, P.; MEIER, W.; CASASSA, G.; JAÑA, R.; SKVARCA, P.; BRAUN, M.H. **Elevation and Mass Changes of the Southern Patagonia Icefield Derived from TanDEM-X and SRTM Data.** Remote Sens. 10, 188, 2018.
- [2] GARI, J; ORTONE LOIS, A.; PILATO, G.; MACOTE YPARRAGUIRRE, E.; COOK, L. **Estimación de la velocidad de desplazamiento del hielo en el glaciar Upsala mediante imágenes SAR.** IX Congreso de la Ciencia Cartográfica, IGN, 2018.
- [3] BERTONE, M. **Aspectos glaciológicos de la zona del Hielo Continental Patagónico.** INHCP, 1997.
- [4] <https://glovis.usgs.gov/>
- [5] <https://scihub.copernicus.eu/>
- [6] <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>
- [7] <https://mapas.parquesnacionales.gob.ar/>
- [8] RACCA, J. M. G. **Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno.** Boletín

del Instituto de Fisiografía y Geología 77 (1-2), 2007.

[9] Revista de la Asociación Geológica Argentina Tomo XXXIV. ISSN 0004-4822, Abr.-Jun. 1979.

[10] VILLEGAS YEPES, P. P. <https://www.aguaysig.com>.

[11] Acevez, Q., J. F., G. Legorreta P., J. Lugo H., J. Umaña R. Y H. A. Legorreta C., **Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México**, Investigaciones Geográficas, núm. 91, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 43-55, 2016.

[12] STRAHLER, A. **Dynamic Basis of Geomorphology**. Geological Society of America Bulletin, 63, p.923-938, 1952.

[13] G. OSACI-COSTACHE. **Cartografie**. Edit. Universitară, București. p. 166, 2008.

[14] OSACI, G.; DULAMA, M. E.; Lovan, O. R. **Forming and assessing the competence to elaborate topographic profiles**. STUDIA UBB GEOGRAPHIA, LVIII, 2, pp. 199 - 220, 2013.

[15] KANG-TSUNG CHANG, BOR-WEN TSAI **The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect Mapping**, Cartography and Geographic Information Science. V. 18, p.69-77, 1991.