



Universidad Técnica Federico Santa María

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

CAMBIOS INTERANUALES DE ALBEDO A  
PARTIR DE DATOS DE SENSORES REMOTOS  
Y OBSERVACIONES TERRESTRES EN 25  
GLACIARES DE LOS ANDES CENTRALES.

Memoria de título presentada por:

Alonso Rodríguez Oliví

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TITULO DE LA CARRERA DE

Ingeniería Civil

PROFESOR GUÍA

Gonzalo Barcaza

PROFESOR CO-REFERENTE

Lina Castro

29 de octubre de 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Cambios interanuales de albedo a partir de datos de sensores remotos y observaciones terrestres en 25 glaciares de los Andes Centrales

**Nombre del candidato(a):** \_\_\_\_\_Alonso Ignacio Rodriguez Oliví\_\_\_\_\_

**Carrera / Grado:** \_\_\_\_\_Ingeniería Civil\_\_\_\_\_

**Campus:** \_\_\_San Joaquín\_\_\_\_\_

**Departamento:** \_\_\_\_\_Obras Civiles\_\_\_\_\_

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, \_\_\_\_\_Gonzalo Barcaza\_\_\_\_\_, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

Fecha: \_\_\_\_\_18/11/25\_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

Gonzalo Barcaza

Firmado digitalmente por  
Gonzalo Barcaza  
Número de reconocimiento (DNI):  
cm=Gonzalo Barcaza, o. ou,  
email=gbarcaza@ci.cu.cu  
Fecha: 2024.11.18 15:48:11 -0400

**Profesor(a) Correferente:**

Fecha: \_\_\_\_\_17/11/25\_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_Lina Castro\_\_\_\_\_

Lina Castro

Lina Mabel Castro H

**Estudiante o Candidato(a):**

Fecha: \_\_\_\_\_14/11/25\_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# Índice general

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | Introducción . . . . .   | 2  |
| 2.     | Objetivos . . . . .  | 3  |
| 2.1.   | Objetivo principal . . . . .   | 3  |
| 2.2.   | Objetivos específicos . . . . .  | 3  |
| 3.     | Marco Teórico . . . . .  | 4  |
| 3.1.   | Glaciares . . . . .  | 4  |
| 3.2.   | Albedo . . . . .   | 5  |
| 3.3.   | Medición de albedo . . . . .   | 6  |
| 3.3.1. | Radiómetro Neto . . . . .  | 6  |
| 3.3.2. | Imágenes satelitales Landsat . . . . .   | 7  |
| 3.4.   | Diferenciación Nieve-Glaciér (NDSI) . . . . .  | 8  |
| 4.     | Zona de estudio y bases de datos . . . . .   | 9  |
| 4.1.   | Zona de estudio . . . . .  | 9  |
| 5.     | Metodología . . . . .  | 17 |
| 5.1.   | Correlación y validación de albedo satelital Landsat con albedo medido por estaciones meteorológicas móviles . . . . .   | 17 |
| 5.2.   | Derivación de albedo distribuido para los 25 grandes glaciares 2000-2022 y comparación con estudios anteriores. . . . .  | 19 |
| 6.     | Resultados y Discusión . . . . .   | 21 |
| 6.1.   | Correlación y validación de albedo satelital Landsat con albedo medido por Estaciones Meteorológicas Móviles . . . . .   | 21 |
| 6.2.   | Derivación de albedo distribuido para los 25 grandes glaciares 2000-2022 y comparación con estudios anteriores . . . . . | 30 |
| 7.     | Conclusión y comentarios . . . . .   | 48 |
| 8.     | Bibliografía . . . . .   | 50 |
| 9.     | ANEXO 1 . . . . .  | 52 |

# 1. Introducción

El derretimiento de los glaciares ha entrado en un proceso acelerado debido a diferentes factores climáticos como aumento de temperatura, sequías y el fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) que ha aumentado la variación de temperatura y precipitación a nivel regional (Rivera et al., 2000). Producto del derretimiento que se ha registrado a nivel global es que se han realizado estudios para determinar la principal causante de este efecto y como altera al entorno que los rodea, tanto en flora como en fauna. En particular, la nieve y los glaciares son la principal fuente de agua para el abastecimiento público, el riego agrícola, hidroeléctricas y abastecimiento natural (Mernild et al., 2015). Por ende, considerar que existe un aumento excesivo de la escorrentía significa un peligro de inminente desabastecimiento a futuro para los diversos sectores que se benefician principalmente de este recurso. Para el caso de Chile, específicamente los Andes Centrales, un próspero sector agrícola depende del caudal generado por el deshielo durante la época de verano y los sectores urbanos demandan cada vez más agua debido al aumento poblacional (Favier et al., 2009).

Investigaciones han arrojado que existe una variable poco estudiada que está relacionada directamente al derretimiento de las masas de hielo, el albedo nival. El cambio del albedo nival ocasiona un mayor forzamiento radiativo, acelerando el derretimiento de la masa glaciar (Haw TE et al., 2020). Estudios relacionados al albedo de los Andes Centrales, como Marmros et al. (2018), han arrojado disminuciones de la tasa de albedo en la nieve de hasta un 0.5 % por año desde el año 2000. Por otro lado, estudios realizados en Ming J et al (2015) sobre la región Hymalaya con producto MODIS, han demostrado el oscurecimiento de la superficie glaciar, exponiendo una disminución de la tasa de albedo en la nieve de 1.2 % por año, demostrando los efectos que ha generado la variación del albedo en distintos sectores del planeta. Debido a los diferentes cambios observados en cada uno de estos estudios mencionados, es necesario aumentar el análisis de la variable de albedo, relacionada a datos meteorológicos de radiación, de estaciones móviles ubicadas sobre el cuerpo glaciar en la zona Andina Chilena para cuantificar de mejor manera su efecto en los glaciares.

En cuanto a la medición del albedo en glaciares de los Andes Centrales de Chile, debido a la poca información existente, la utilización de nueva e inédita data generada por estaciones meteorológicas móviles (EMAM) ubicadas sobre 5 glaciares piloto (Glaciar Bello, Echaurren Norte, Pirámide, Yeso y San Francisco) permitió validar el algoritmo para derivar albedo satelital a un número de 25 glaciares de los Andes Centrales (32°-36°S) para los años de 2015-2022. La combinación de observaciones satelitales y terrestres permitió de mejor manera conocer los cambios interanuales de albedo superficial de las distintivas facies glaciares en respuesta a las condiciones meteorológicas y su posible relación con efectos antrópicos locales.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo principal

**Objetivo General:** Evaluar los cambios interanuales del albedo de los 25 grandes glaciares de los Andes Centrales empleando datos de sensores remotos y de estaciones meteorológicas móviles (EMAM) ubicadas en los glaciares dentro del área de estudio.

### 2.2. Objetivos específicos

**Objetivo Específico 1:** Derivar albedo distribuido para 5 glaciares piloto utilizando imágenes satelitales Landsat y datos de radiación de EMAM, adquiridos entre 2015-2022 para lugares cercanos a la ubicación de la estación.

**Objetivo Específico 2:** Analizar espacio temporalmente la variación y tendencia del albedo glaciar obtenido de sensores remotos en 25 glaciares de Chile.

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Glaciares

Los glaciares pueden ser definidos como una masa perenne de hielo que se forma en la superficie terrestre debido a la compactación y recristalización de la nieve durante periodos prolongados (Hooke et al., 2005). A medida que se acumula más nieve, el peso de las capas superiores comprime las capas inferiores, convirtiéndolas en hielo (Alley et al., 1997). Este proceso, conocido como compactación firn, es fundamental para la formación y crecimiento de los glaciares. Por otro lado, la definición entregada por la Dirección General de Aguas (DGA, 2009, p.11) define un glaciar como: Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a una hectárea ( $0.01 \text{ km}^2$ ) o cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo.

Es importante entender que los glaciares se comportan como sistemas dinámicos que interactúan con todo el medio en donde se encuentran y se ven afectados por distintos factores de este, como se aprecia en la Figura 1. Existen textos, como la publicación de Benn & Evans et al (2010), que definen el dinamismo de los glaciares como sistemas abiertos que intercambian energía con el medio ambiente. De esta manera se interpreta un glaciar como un sistema el cual puede ser afectado por distintas variables.

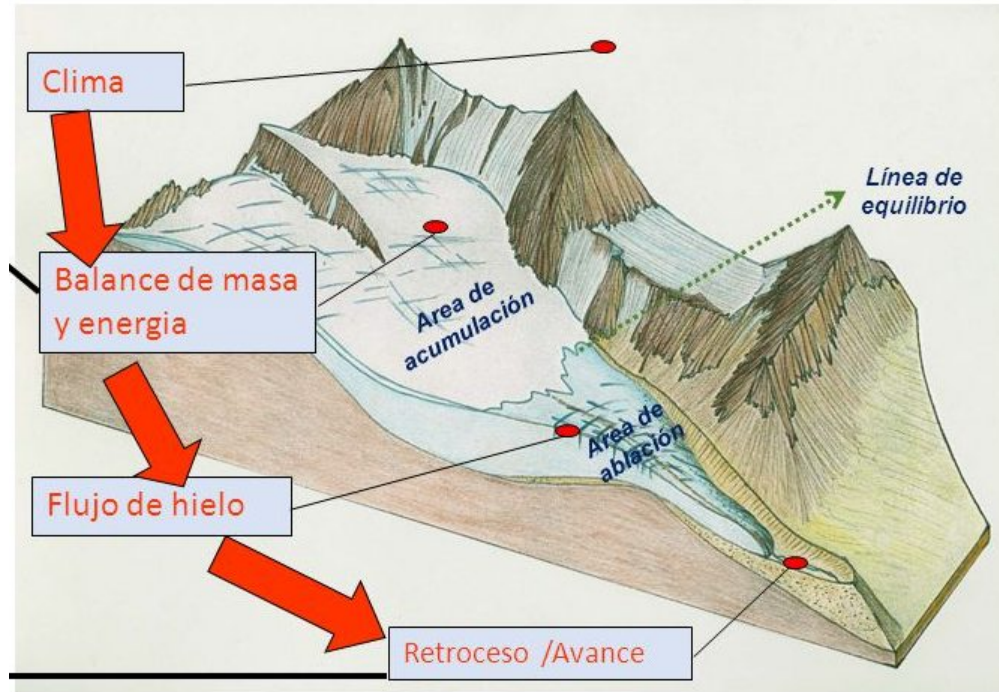


Figura 1: Esquema de balance de masa de un glaciar visto como un sistema abierto. Fuente: Fundación Glaciares Chilenos.

### 3.2. Albedo

El albedo es una medida cuantitativa adimensional que describe la reflectancia de una superficie frente a la radiación solar incidente, se define como el cociente entre la radiación de onda corta reflejada y la radiación de onda corta incidente en dicha superficie (Shaw et al., 2020 ), según la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{R}{I} \quad (1)$$

donde  $\alpha$  representa el albedo,  $R$  la radiación de onda corta refleja e  $I$  la radiación de onda corta incidente.

En cuanto a los valores del albedo, estos se encuentran en un rango entre 0-1, siendo 0 el valor que indica que la superficie absorbe toda la energía incidente y el valor de 1 el que indica que toda la energía incidente es reflejada por la superficie. Cabe destacar que los valores más altos de albedo se relacionan a las superficies más claras y que poseen mayor reflectancia, como es el caso de la nieve. Por otro lado, los valores bajos de albedo se relacionan con

superficies con características oscuras y con menor reflectancia, como es el caso del hielo, que es una superficie altamente absorbente de energía. Según estudios realizados por Cuffey and Paterson (2010), dentro de un sistema nivo-glaciar, se considera como hielo a todo cuerpo que posea un valor de albedo menor a 0.46.

### 3.3. Medición de albedo

#### 3.3.1. Radiómetro Neto

La radiación solar es una de las principales fuentes de energía que recibe el planeta para diversos procesos, como la absorción de calor en la superficie. Sin embargo, no toda la radiación proveniente del sol (incidente) es absorbida por la superficie, ya que, dependiendo de diferentes factores de esta, gran parte de la radiación puede ser reflejada. Según Tohsing et al., (2023), la radiación neta corresponde al cociente entre la radiación incidente sobre la radiación reflejada y es posible medirla mediante el radiómetro neto, que consiste en un equipo con sensores capaces de medir la radiación incidente en una superficie y la radiación que refleja.

En cuanto a la medición de la radiación neta, en el mercado es posible hallar diferentes modelos de radiómetros, sin embargo, para efectos de este estudio, se utiliza el equipo marca *Kipp & Zonen* modelo CNR4, ver Figura 2 . El radiómetro se caracteriza por poseer dos piranómetros para la radiación solar, capaces de medir la radiación de onda corta refleja e incidente, y dos pirgeómetros que miden las radiaciones infrarrojas (Kipp & Zonen, s.f.).

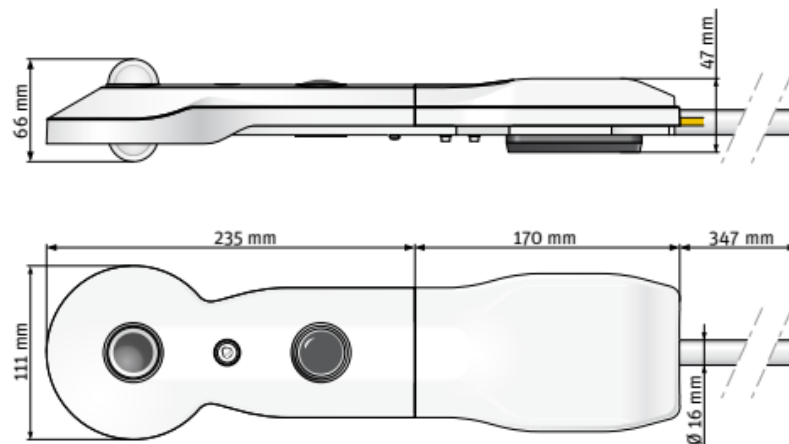


Figura 2: Esquema Radiómetro Neto CNR4. Fuente Kipp & Zonen s.f.

### 3.3.2. Imágenes satelitales Landsat

La misión satelital Landsat corresponde a un sistema satelital de observación de la tierra que data desde 1972 y es operado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), en la Figura 3 se aprecia el equipo satelital utilizado para la misión Landsat 8. La misión tiene por objetivo obtener imágenes detalladas del estado de la superficie terrestre que ayuden al monitoreo de los usos y estados del suelo, como para también ayudar con la gestión de recursos naturales, observaciones del medio ambiente y planificación urbana. Actualmente, dentro de la misión se pueden encontrar los satélites Landsat 4 y 5, que poseen 7 bandas satelitales, Landsat 7 y Landsat 8 con 8 y 11 bandas satelitales, respectivamente, siendo las bandas los rangos específicos de medición del espectro electromagnético que un satélite puede captar utilizando sensores incorporados a este.

Dentro de los sensores e instrumentos utilizados en los satélites Landsat, se encuentran los denominados Operational Land Imager (OLI) y Therman Infrared Sensor (TIRS) presentes en el satélite Landsat 8, el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) presente en el satélite Landsat 7 y el sensor Thematic Mapper (TM) ubicado en los satélites Landsat 4 y 5. Además, los satélites Landsat observan la superficie de la tierra cada 10 o 16 días y presentan una resolución de 15, 30 y 100 [m], dependiendo del tipo de satélite.

En cuanto a la medición de albedo, se determina mediante la aplicación de la fórmula de Liang (Liang, 2003) propuesta para satélites, donde se utilizan los datos de las bandas espectrales para la estimación de la variable según las siguientes expresiones:

$$albedo = 0,356b_{azul} + 0,130b_{rojo} + 0,373b_{NIR} + 0,085b_{SWIR1} + 0,072b_{SWIR2} - 0,0018 \quad (2)$$

donde  $b_i$  representa la reflectancia terrestre de cada banda de las imágenes Landsat,  $NIR$  corresponde a la onda infrarroja cercana,  $SWIR1$  a la onda corta infrarroja 1 y  $SWIR2$  a la onda corta infrarroja 2.



*Figura 3:* Satélite Landsat 8. Fuente: NASA, 2022.

### 3.4. Diferenciación Nieve-Glaciár (NDSI)

En cuanto a la variable de albedo obtenida de imágenes satelitales, fue necesario determinar el contorno del glaciár para cada año de estudio utilizando el parámetro NDSI definido para cada tipo de satélite. Para diferenciar el glaciár de la nieve, se utilizó la variable NDSI que, según lo extraído de estudios como Hall et al (1995), debe cumplir con la siguiente desigualdad  $NDSI > 0,4$ . Donde el valor dado corresponde a los valores típicos de nieve.

$$NDSI = \frac{b_{verde} - b_{infrarroja}}{b_{verde} + b_{infrarroja}} \quad (3)$$

donde se observa  $b_{verde}$  y  $b_{infrarroja}$  correspondientes a las bandas satelitales verde e infrarroja, respectivamente, obtenidas a partir de los productos satelitales Landsat.

## 4. Zona de estudio y bases de datos

### 4.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a los Andes Centrales de Chile, comprendidos entre las latitudes 32°-36°S, donde se considera el análisis de 25 grandes glaciares de la zona central, Figura 4, los cuales están identificados con un ID numérico y se presentan en las Tablas 1-2-3. A modo general, la zona central de Los Andes abarca las cuencas de Aconcagua, Maipo, Maule, Petorca y Rapel, las cuales presentan un área glaciada de 869,5  $km^2$ , lo que corresponde a un 3.6% del área glacial total del territorio chileno y se caracteriza por un clima mediterráneo con inviernos lluviosos durante los meses de abril a septiembre y veranos secos a partir de octubre hasta marzo, siendo el sector de Río Itata (36°S) la zona con clima mayoritariamente húmedo producto del decrecimiento abrupto de la altura de la cordillera de los Andes (Barcaza et al., 2017). Sin embargo, para este estudio, se analiza un total de 25 grandes glaciares, con un área glaciada conjunta de 168.8  $km^2$  repartidos entre las cuencas del Río Maipo, Río Rapel y Aconcagua, lo que corresponde a un total de 19.4% de la criósfera de las tres cuencas y representa a los glaciares más influyentes en cuanto a aporte hídrico (Gómez, F. 2022). Además, la zona que se utilizó y los glaciares considerados para el análisis se pueden clasificar según el sector y cuenca donde se ubican. De la Figura 4, se puede apreciar que los glaciares están distribuidos en la cuenca Río Aconcagua, Río Maipo y Río Rapel.

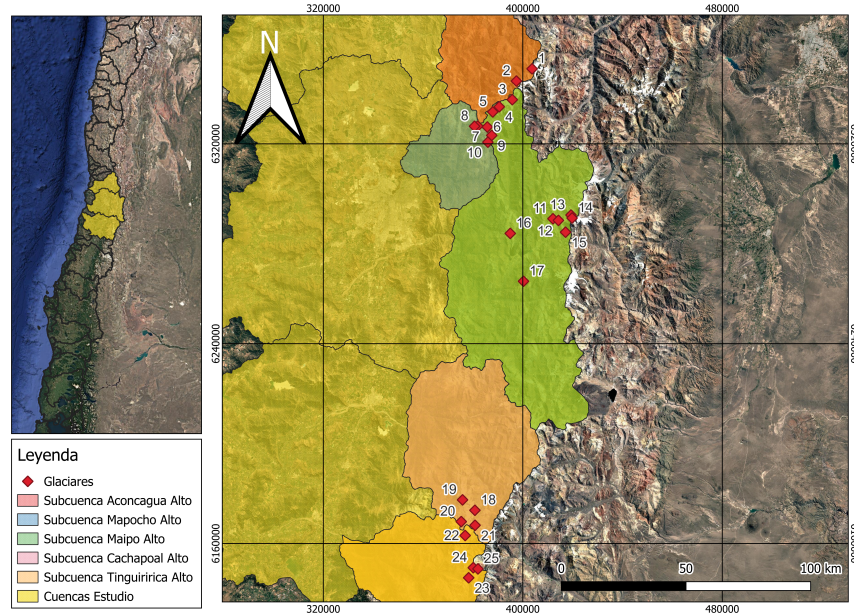


Figura 4: Cuencas y glaciares en estudio.

### Cuenca Rio Aconcagua

La cuenca se forma por la confluencia de los ríos Juncal, Colorado y Blanco los que corresponden a los ríos principales de la cuenca. Dicho sector se ubica entre las latitudes 32.2°S y 33.3°S del globo. Como se aprecia en la Figura 4, la zona específica de estudio se ubica dentro de la subcuenca Aconcagua Alto, lugar donde se encuentran los glaciares de Monos de Agua y Juncal Norte, según lo expuesto en la Tabla 1. La cuenca presenta un clima mediterráneo semiárido, con estacionalidad marcada, precipitaciones significativas en invierno y veranos cálidos y secos. Las precipitaciones anuales decrecen desde la cordillera hacia la costa variando entre 400 y 800 mm por año en la zona precordillerana y superando los 1.000 mm al año en las zonas de mayor altitud (DGA, 2009). Desde el punto de vista hidrológico, los glaciares de la cuenca actúan como reservorios naturales de agua sólida, liberando caudales durante la estación seca (Ayala et al., 2019). Su aporte es crucial para la regulación estival del río Aconcagua, especialmente en años secos, manteniendo los caudales base que abastecen la agricultura, los centros urbanos y la minería regional (Fariás-Barahona et al., 2020).

Tabla 1: Glaciares Cuenca Rio Aconcagua

| ID | NOMBRE        | CLASIFICACIÓN      | ESTE<br>UTM | NORTE<br>UTM | ALTURA<br>PROM |
|----|---------------|--------------------|-------------|--------------|----------------|
| 1  | Monos De Agua | Glaciar de Montaña | 403728      | 6350041      | 4540           |
| 2  | Juncal Norte  | Glaciar de Valle   | 397431      | 6345146      | 5074           |

### Cuenca Rio Maipo

La cuenca se forma por la confluencia de los ríos Mapocho y Colorado los que corresponden a los ríos principales de la cuenca. Dicho sector se ubica entre las latitudes 32.9°S y 34.4°S del globo. La cuenca del Rio Maipo, se conforma por 5 subcuencas, sin embargo, para efectos de este estudio y como se aprecia en la Figura 4, la zona específica de análisis se ubica dentro de la subcuenca Maipo Alto y Mapocho Alto, lugar donde se encuentran los glaciares descritos en la Tabla 2. La cuenca presenta un clima mediterráneo templado, con lluvias centradas entre mayo y septiembre, que varían entre los 300 a 400 mm por año en el valle y entre 900 a 1.200 mm por año en las zonas cordilleranas, donde predomina la nieve (DGA, 2009). Los glaciares más relevantes de la cuenca son de tipo de montaña y de valle y representan fuentes estratégicas de agua para la Región Metropolitana de Santiago (Gómez F, 2022). Hidrológicamente, la fusión glacial regula los caudales del río Maipo durante los meses secos, sustentando la agricultura, el consumo humano y la generación hidroeléctrica (Farías-Barahona et al., 2020).

Tabla 2: Glaciares Cuenca Rio Maipo

| ID | NOMBRE          | CLASIFICACIÓN      | ESTE UTM | NORTE UTM | ALTURA PROM |
|----|-----------------|--------------------|----------|-----------|-------------|
| 3  | Juncal Sur      | Glaciar de Valle   | 395786   | 6337683   | 4287        |
| 4  | Olivares Gamma  | Glaciar de Valle   | 390566   | 6334861   | 4391        |
| 5  | Olivares Beta   | Glaciar de Montaña | 387955   | 6332786   | 4471        |
| 6  | Olivares Alfa   | Glaciar de Valle   | 385784   | 6326757   | 4507        |
| 7  | Paloma          | Glaciar de Montaña | 381905   | 6327134   | 4265        |
| 8  | Rincón          | Glaciar de Montaña | 380642   | 6327047   | 4173        |
| 9  | Esmeralda       | Glaciar de Valle   | 387557   | 6323398   | 4929        |
| 10 | Plomo           | Glaciar de Montaña | 385997   | 6320677   | 5015        |
| 11 | Bello           | Glaciar de Montaña | 412096   | 6290018   | 4413        |
| 12 | Yeso            | Glaciar de Valle   | 414293   | 6289365   | 4449        |
| 13 | Yeso 1          | Glaciar de Montaña | 419338   | 6291501   | 5079        |
| 14 | Yeso 2          | Glaciar de Montaña | 419768   | 6290320   | 5024        |
| 15 | Pirámide        | Glaciar de Valle   | 417141   | 6284647   | 3784        |
| 16 | Echaurren Norte | Glaciarete         | 394977   | 6284150   | 3678        |
| 17 | San Francisco   | Glaciar de Montaña | 400280   | 6264998   | 3509        |

### Cuenca Rio Rapel

La cuenca se forma por la confluencia de los ríos Cachapoal y Tinguiririca los que corresponden a los ríos principales de la cuenca. Dicho sector se ubica entre las latitudes 33.5°S y 35.0°S del globo. La cuenca del Rio Rapel, se conforma por 6 subcuencas, sin embargo, para efectos de este estudio y como se aprecia en la Figura 4, la zona específica de estudio se ubica dentro de las subcuencas Cachapoal Alto y Tinguiririca Alto, lugar donde se encuentran los glaciares descritos en la Tabla 3. La cuenca del río Rapel se caracteriza por ser de un clima mediterráneo templado, con inviernos fríos donde se presentan precipitaciones que pueden llegar a superar los 1.200 mm por año en los sectores cordilleranos y veranos secos con alta radiación en los sectores de valle (DGA, 2009). En términos glaciológicos, los principales cuerpos de hielo se ubican sobre los 3.500 m. y cumplen una función esencial en la alimentación de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, principales afluentes del Rapel (Gómez F, 2022). Estos glaciares actúan como reservas estratégicas de agua en estado sólido, aportando caudales durante el verano, que son aprovechados para riego agrícola y generación de energía (Fariás-Barahona et al., 2020).

Tabla 3: Glaciares Cuenca Rio Rapel

| ID | NOMBRE         | CLASIFICACIÓN      | ESTE<br>UTM | NORTE<br>UTM | ALTURA<br>PROM |
|----|----------------|--------------------|-------------|--------------|----------------|
| 18 | Palomo         | Glaciar de Valle   | 380796      | 6173312      | 3861           |
| 19 | Cipreses Norte | Glaciar de Montaña | 375838      | 6177485      | 3660           |
| 20 | Cipreses Sur   | Glaciar de Valle   | 375315      | 6168781      | 3505           |
| 21 | Cortaderal     | Glaciar de Valle   | 380856      | 6167306      | 3843           |
| 22 | Universidad    | Glaciar de Valle   | 376886      | 6163221      | 3905           |
| 23 | Tinguiririca 1 | Glaciar de Montaña | 378295      | 6146300      | 4068           |
| 24 | Tinguiririca 3 | Glaciar de Valle   | 380139      | 6150327      | 3795           |
| 25 | Tinguiririca 4 | Glaciar de Montaña | 382023      | 6149855      | 4066           |

Por otro lado, cabe destacar que en estas zonas del país, según estudios realizados por el CENSO 2017 y los datos extraídos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), se concentra aproximadamente el 56 % de la población nacional, esto sumado a que Chile alberga la mayor parte de la criósfera del hemisferio sur, excluyendo a la Antártica (González et al., 2019), resalta la importancia de los glaciares andinos como reservorios estratégicos de agua, fundamentales para el abastecimiento humano y el desarrollo agrícola de las comunidades cercanas. Durante los períodos de sequía prolongada, la escorrentía de origen glaciar puede llegar a aportar hasta un 34 % del caudal total de los ríos, evidenciando su rol crucial en la sustentabilidad hídrica regional (Ayala et al., 2019). En este escenario, se hace imprescindible contar con una mayor cantidad de información validada que complemente los datos obtenidos por sistemas remotos y permita mejorar el monitoreo de la criósfera andina. Por ello, en la presente memoria se incorporó mediciones in situ obtenidas a partir de estaciones meteorológicas móviles, Figura 5, ubicadas en la cuenca del río Maipo, Figura 6, con el fin de validar y contrastar los registros satelitales de albedo, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica glaciar y su relación con las condiciones climáticas locales.

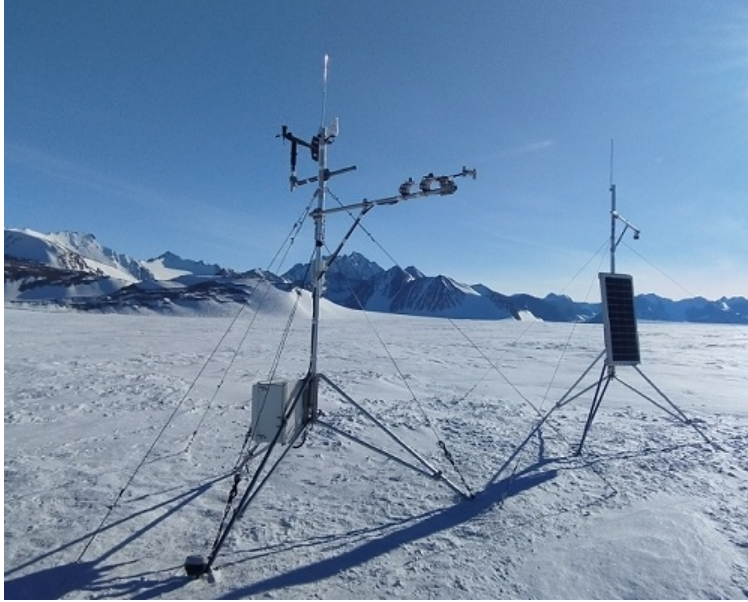


Figura 5: Imagen referencial de Estación Meteorológica Móvil. Fuente: Dirección General de Aeronáutica Civil.

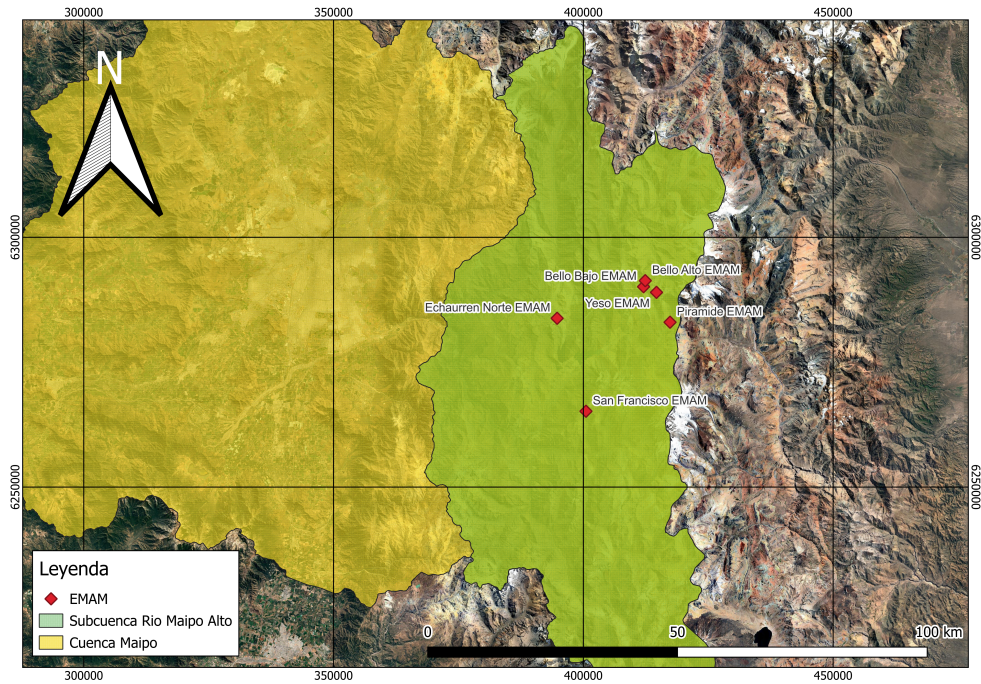


Figura 6: Mapa de ubicación espacial de EMAM.

## **Base de Datos**

En cuanto a la base de datos utilizada en este estudio, se considera el uso de datos de albedo de banda ancha integrada obtenida a partir de productos satelitales Landsat. Además, se considera datos medidos por las estaciones meteorológicas móviles, ubicadas en los glaciares mencionados en el acápite anterior, que permiten medir los valores de albedo de banda ancha corta sobre la superficie glaciar cercana a la estación. Por otro lado, se cuenta con datos meteorológicos a partir de la web de la Dirección General de Aguas (DGA), de donde es posible obtener registros de precipitación y temperatura de las zonas estudiadas.

## **Datos Satelitales**

Para obtener los datos satelitales Landsat se debe realizar la descarga de datos a partir de la página de exploración y observación satelital *United States Geological Survey* (USGS), donde se realiza la descarga del paquete de datos Landsat Collection II de la web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las imágenes descargadas poseen un sistema de proyección en coordenadas UTM, por ende, no se deben realizar correcciones geométricas y solo se debe ajustar la proyección al sistema de referencia WGS84 con huso en 19 sur.

## **Datos Precipitación**

Para obtener la data de precipitación y temperatura de los sectores cercanos a los glaciares trabajados se utiliza la base de datos de estaciones meteorológicas de la DGA, cuyo registro de estaciones se encuentra disponible en su página web <https://snia.mop.gob.cl>. Para el caso de esta memoria se utilizan las estaciones meteorológicas de Embalse El Yeso (COD: 5703008), Glaciar San Francisco Aguas Panimávida (COD: 5702011), Río Olivares ante Junta Colorado (COD: 5706001), Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal (5721017) y Cipreses (6003004). Además, para contrastar los valores de precipitación, también se utilizan los datos grillados de la plataforma de CR2MET disponible en su página web <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados>.

## **Datos Digitales Sernageomin**

Para obtener la data de ubicación georreferenciada de las instalaciones mineras en los sectores cercanos a los glaciares trabajados se utiliza el sistema GIS de la institución del Sernageomin, cuyo registro de las instalaciones mineras se encuentra disponible en su página web <https://portalgeomin.sernageomin.cl>.

## **Datos EMAM**

En cuanto a los datos de terreno, se utilizan los registros obtenidos por las estaciones meteorológicas móviles ubicadas en los glaciares de la cuenca del Río Maipo. Como se menciona en

el acápite 3.3.1, las estaciones realizan las mediciones de radiación solar neta a partir de un radiómetro neto incorporado en cada una de estas donde, utilizando la fórmula descrita en el capítulo 3.2, se determina el albedo medido in situ de cada glaciar. La ubicación, altura y tiempos de mediciones de cada estación queda descrita en la siguiente tabla.

*Tabla 4:* Cuadro de ubicación, altitud y fechas de medición de EMAM.

| Estación EMAM           | Cuenca | Este UTM | Norte UTM | Altitud | Periodo Verano |        |
|-------------------------|--------|----------|-----------|---------|----------------|--------|
|                         |        |          |           |         | Desde          | Hasta  |
| Glaciar Pirámide        | Maipo  | 417353   | 6282990   | 3450    | oct-13         | mar-22 |
| Glaciar Echaurren Norte | Maipo  | 394750   | 6283778   | 3720    | oct-20         | feb-22 |
| Glaciar Bello Bajo      | Maipo  | 412050   | 6290098   | 4387    | nov-13         | mar-22 |
| Glaciar Bello Alto      | Maipo  | 412397   | 6291308   | 4783    | nov-18         | mar-22 |
| Glaciar San Francisco   | Maipo  | 400525   | 6265170   | 3562    | oct-13         | abr-22 |
| Glaciar Yeso            | Maipo  | 414638   | 6288963   | 4305    | sept-15        | mar-18 |

## 5. Metodología

### 5.1. Correlación y validación de albedo satelital Landsat con albedo medido por estaciones meteorológicas móviles

Para la correlación de datos, se descargan los datos satelitales Landsat, mediante la página de USGS, que contiene los datos de reflectancia y radiación solar de onda corta con una resolución de pixel de 30x30m para el análisis de los cinco glaciares piloto: San Francisco, Echaurren Norte, Bello, Yeso y Pirámide. Como se trata de datos del año 2015 a 2022, se utiliza el producto del satélite Landsat 8, el cual presenta sensores OLI y TIRS y 11 bandas espectrales. Para realizar la descarga de datos de la página se requiere realizar el siguiente procedimiento:

- Filtrar datos de la página USGS para los años entre 2015-2022.
- Filtrar datos de verano seleccionando los meses de Diciembre-Enero-Febrero para obtener imágenes de glaciar mas claras sin exceso de nieve.
- Como el área de estudio no debe tener interferencia de nubes que perjudiquen la medición del satélite, se selecciona un rango aceptable de cobertura de nubes de un 10 % por imagen y se selecciona manualmente la imagen que no contenga nubes en la zona de interés.
- Se determina el satélite a elección, para este caso se usan los datos de *Landsat Collection 2*, el cual presenta datos de reflectancia superficial con correcciones de efectos atmosféricos añadidos a la imagen.
- Se descargan dos imágenes de reflectancia por año, correspondientes a las bandas de luz azul, verde, roja, infrarroja onda corta (SWIR) e infrarroja cercana (NIR).

Mediante la utilización del software QGIS se realiza un pre-procesamiento de las imágenes usando el plugin *Semi-Automatic Classification* para realizar correcciones radiométricas de las bandas espectrales Landsat y así eliminar objetos oscuros y convertirlos en datos de reflectancia superficial. Una vez corregida la imagen, se utiliza una herramienta de QGIS para recortar el raster con una capa mascara del sector donde se estima la ubicación del glaciar trabajado y así reducir el tamaño de la imagen. Luego, para determinar el área de glaciar efectivo dentro de la zona de interés antes recortada, se utiliza el plugin de *Diseñador de Modelos* para crear un programa que use la información de las bandas espectrales de cada imagen para el cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), el cual,

se obtiene a partir de fórmulas diferentes para Landsat 4-5-7 y Landsat 8-9 debido a un cambio de la definición de los rangos de longitud de onda para las bandas espectrales pero que se describe universalmente en el acápite 3.4. De esta forma, se determina el NDSI para cada pixel de cada imagen trabajada y se realiza la diferenciación entre hielo glaciar y nieve aplicando lo expuesto en el acápite anteriormente mencionado:

$$NDSI > 0,4$$

Una vez se tiene el glaciar delimitada por el NDSI de todas las imágenes de cada año, se utiliza como molde el área glaciar mas pequeña determinada de manera que exista la misma cantidad de datos para todos los años y sea comparable posteriormente el valor de albedo obtenido. Luego, se utiliza la metodología propuesta por Liang et al (2003) que propone el cálculo de albedo mediante una suma ponderada de las bandas de las imágenes según la ecuación descrita en el acápite 3.3.2, de acuerdo al satélite utilizado, para generar una imagen raster que contiene la información de albedo distribuido en toda el área glaciar.

En cuanto a los datos de las EMAM, se determina el albedo utilizando los valores registrados de radiación de onda corta reflejada e incidente, descrita en el capítulo 3.2. Se realizan correcciones a los datos corruptos, que corresponden a valores de albedo fuera del intervalo [0-1], realizando aproximaciones con los datos disponibles del resto del mes y de años anteriores y posteriores medidos.

Una vez corregido y tratados los datos satelitales y los datos de terreno se hacen coincidir de manera espacial. Para ello, se utiliza el pixel de la imagen satelital correspondiente a la ubicación de la EMAM del glaciar trabajado y una fecha cercana entre los dos registros, es decir, se genera un archivo que contenga las mediciones validas para las dos fuentes de datos. Luego, como se tratan de variables categóricas ordinales de diferentes fuentes se comparan los resultados y se calcula el coeficiente de correlación de Spearman (R) junto al valor t estadístico para los datos a nivel anual, considerando las siguientes expresiones para determinar si existe una correlación fuerte entre ambas fuentes de registro. Cabe destacar que el t estadístico debe ser menor al t critico calculado para determinar que la hipótesis nula de *no correlación* entre los datos quede en estado rechazado.

Finalmente, se consideran los efectos climatológicos para constatar las mediciones de ambas fuentes de datos utilizadas dependiendo de la zona trabajada. Se toman en consideración efectos de temperatura y precipitación que puedan afectar los registros y ayuden a respaldar diferencias entre las mediciones utilizadas.

## 5.2. Derivación de albedo distribuido para los 25 grandes glaciares 2000-2022 y comparación con estudios anteriores.

La determinación del albedo superficial de los 25 grandes glaciares seleccionados se llevó a cabo mediante un procedimiento sistemático que abarcó desde la adquisición de datos satelitales hasta el análisis estadístico de tendencias para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2022.

De manera similar a lo expuesto en el acápite 5.1 , se descargaron imágenes satelitales Landsat desde la plataforma USGS Earth Explorer, seleccionando manualmente aquellas con la mejor visualización de los glaciares y con la menor presencia de nubosidad. Con el fin de reducir la influencia de la nieve estacional, se eligieron las dos mejores imágenes por año correspondientes a los meses de diciembre, enero y febrero, que corresponden a la época estival y al periodo en que los glaciares presentan una mejor exposición superficial.

Las imágenes seleccionadas fueron sometidas a corrección atmosférica mediante la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) en el software QGIS. Una vez corregidas, se procedió a la eliminación de los píxeles con pendientes superiores al 40 %, así como aquellos que se encontraban oscurecidos por efecto de las sombras topográficas. Posteriormente, las imágenes fueron recortadas en torno al área de cada glaciar en estudio. Luego, para la delimitación de la superficie glaciar y el calculo de albedo, se realiza el mismo procedimiento expuesto en el apartado anterior (5.1) para todos los glaciares considerados en un rango de tiempo entre el año 2000-2022.

Una vez obtenidos los valores de albedo promedio, se aplicaron los tests Mann-Kendall y Theil-Sen, con el propósito de evaluar la existencia de tendencias temporales y su significancia estadística. En el caso del test Mann-Kendall, y como se muestra en la Tabla 5, el estadístico Tau permitió identificar la dirección de la tendencia, siendo positivo cuando el albedo presenta un incremento en el tiempo y negativo cuando evidencia una disminución. La significancia de dicha tendencia se determinó a través del p-value, de modo que valores menores a 0.05 indicaron la existencia de una tendencia estadísticamente significativa, mientras que valores superiores a este umbral reflejaron la ausencia de tendencias robustas. Por su parte, el estimador de Theil-Sen permitió calcular la pendiente de la tendencia, proporcionando una medida de la magnitud del cambio del albedo en el tiempo, es decir, la tasa de incremento o disminución promedio anual. La interpretación de los resultados se rige bajo lo indicado en la Tabla 5, que muestra a modo resumen las diferentes combinaciones de valores  $\tau$  y *p-value*

Tabla 5: Interpretación de resultados de test de Mann Kendall

| $\tau$                   | p-value     | Interpretación   |
|--------------------------|-------------|--|
| $\tau \approx 0$         | $>0.05$     | No hay tendencia significativa.<br>Las variaciones observadas pueden atribuirse al azar.                   |
| $\tau >0$                | $\leq 0.05$ | Tendencia creciente significativa.<br>El albedo aumenta con el tiempo.                                     |
| $\tau <0$                | $\leq 0.05$ | Tendencia decreciente significativa.<br>El albedo disminuye con el tiempo.                                 |
| $0.1 \leq \tau \leq 0.2$ | $\leq 0.01$ | Tendencia muy significativa.<br>Existe fuerte evidencia contra la hipótesis nula de ausencia de tendencia. |

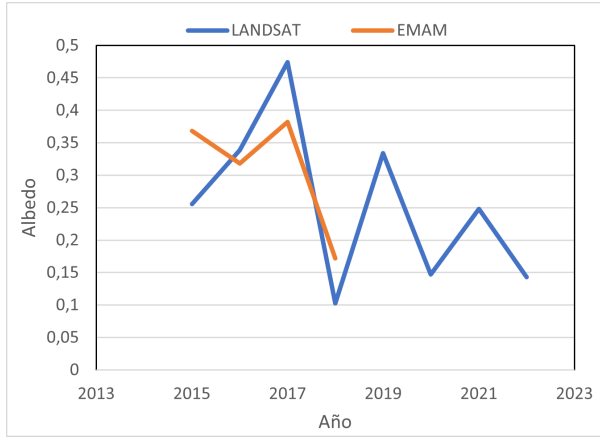
Luego, los resultados obtenidos se integraron con información meteorológica correspondiente a precipitación y temperatura, extraída de las plataformas CR2MET y CAMELS-CL, con el objetivo de evaluar la influencia de las condiciones climáticas en la variabilidad del albedo glaciar. Además, se consideró de manera conceptual la posible incidencia de la actividad minera mediante la incorporación de datos del catastro oficial de Sernageomin, a fin de analizar si la proximidad de faenas extractivas contribuye a la reducción del albedo.

Finalmente, los resultados derivados del análisis fueron contrastados con estudios previos de la literatura, en particular con el trabajo de Shaw et al. (2020), que documenta la reducción del albedo glaciar y los efectos de la sequía en los Andes extratropicales entre 1986 y 2020, lo que permitió validar y contextualizar los hallazgos del presente estudio.

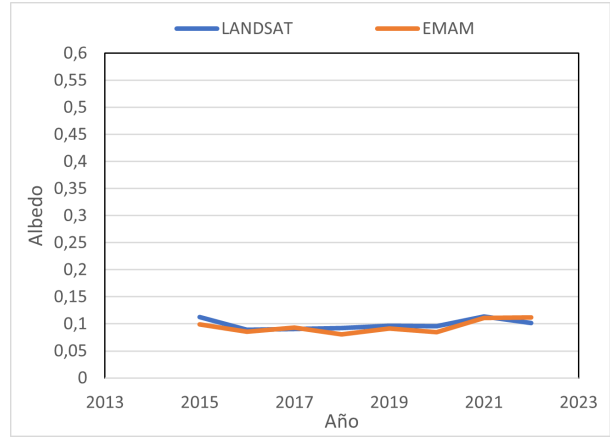
## 6. Resultados y Discusión

### 6.1. Correlación y validación de albedo satelital Landsat con albedo medido por Estaciones Meteorológicas Móviles

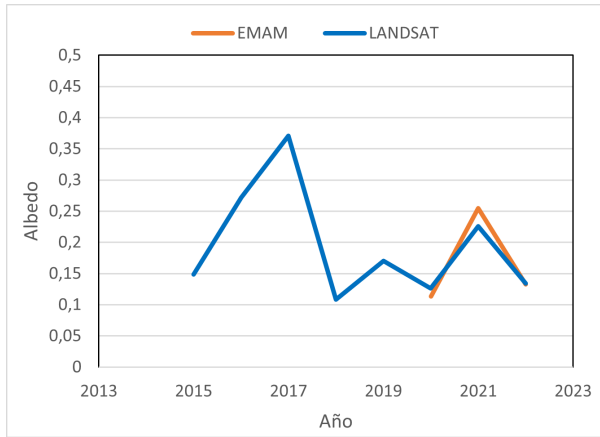
A partir de los registros de albedo puntual medidos por las estaciones meteorológicas móviles y los productos satelitales Landsat, se realiza la correlación y validación de las fuentes de datos para determinar si los valores registrados por observación satelital son confiables y/o representativos de lo que realmente ocurre en la superficie glaciaria. En la Figura 7 se presentan los valores de medición del albedo puntual, separados para cada glaciar, es decir, dentro del píxel que corresponde a la ubicación de la EMAM. Cabe mencionar que, de los resultados expuestos en esta figura, es posible observar que no existe data completa para el periodo de tiempo de interés, ya que los datos utilizados no presentaban medición en algunos años, lo que se atribuye a fallas en el equipo utilizado. Sin embargo, a pesar de la poca cantidad de datos, estos se utilizaron de igual manera para determinar la veracidad de las mediciones Landsat en el periodo de tiempo disponible. Por otro lado, los datos para el cálculo de sesgo, o diferencia relativa, entre las mediciones de ambas fuentes y los valores estadísticos se presentan en la Tabla 6, junto al gráfico de correlación de Spearman en la Figura 8, donde se presentan los valores para todos los años registrados y los valores promedio para todos los años medidos, junto a las líneas de tendencia perfecta (línea punteada roja) regresión ajustada de los datos reales (línea negra).



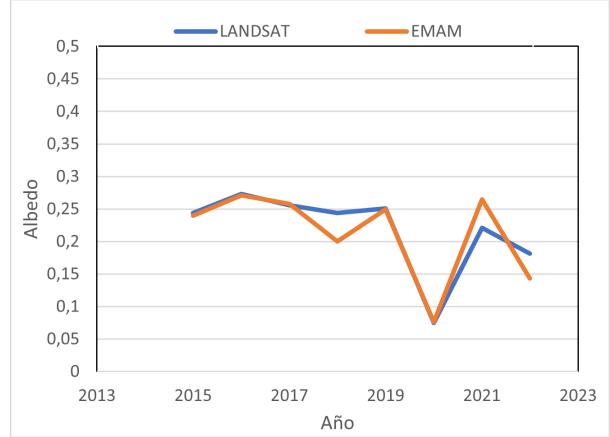
(a) Glaciar Yeso



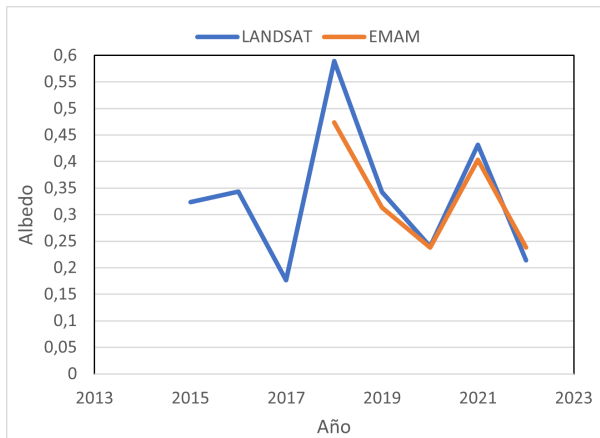
(b) Glaciar Pirámide



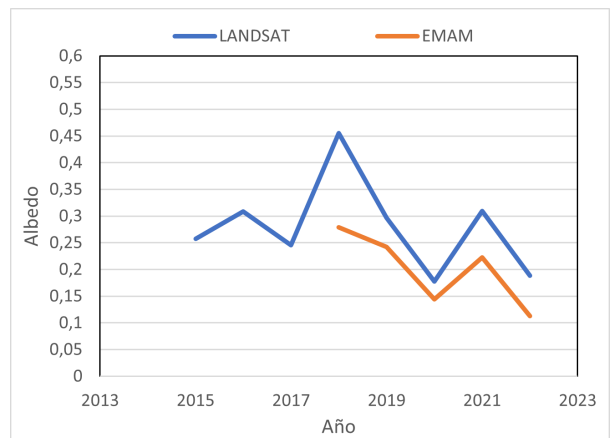
(c) Glaciar Echaurren Norte



(d) Glaciar San Francisco



(e) Glaciar Bello (alto)



(f) Glaciar Bello (bajo)

Figura 7: Resultados de albedo promedio puntual por año para fuente de datos EMAM y satélite Landsat.

Tabla 6: Tabla de correlación datos EMAM y Datos Landsat para albedo promedio total.

| Nombre EMAM/Glaciár | Elevación | Albedo Prom puntual |         | Sesgo |
|---------------------|-----------|---------------------|---------|-------|
|                     |           | EMAM                | Landsat |       |
| Piramide            | 3450      | 0.095               | 0.099   | 1.05  |
| Echaurren Norte     | 3720      | 0.167               | 0.195   | 1.17  |
| Bello bajo          | 4387      | 0.193               | 0.280   | 1.45  |
| Bello alto          | 4783      | 0.333               | 0.333   | 1.00  |
| San Francisco       | 3562      | 0.213               | 0.218   | 1.02  |
| Yeso                | 4305      | 0.310               | 0.255   | 0.82  |

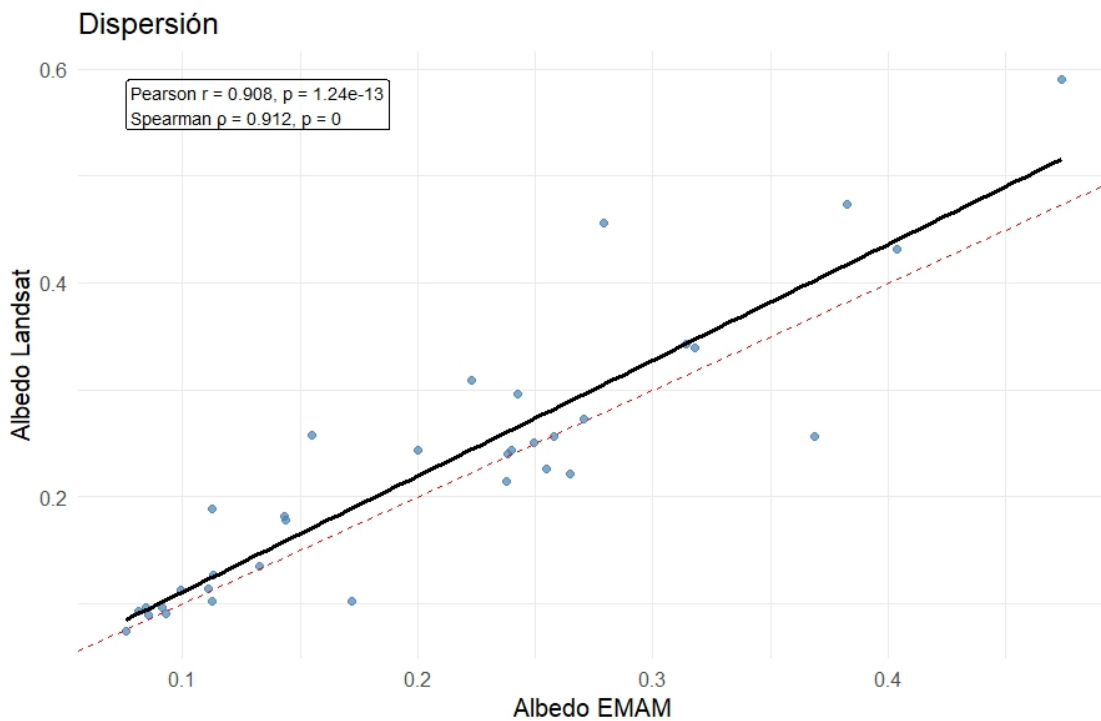


Figura 8: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat utilizando el promedio de todos los años para cada glaciár.

De lo expuesto anteriormente, se observa que existe diferencia en los registros medidos por ambas fuentes de datos. Del gráfico expuesto en la Figura 7 se aprecia que las mediciones de albedo captadas por el satélite Landsat son mayores a las presentadas por las estaciones meteorológicas, aproximadamente en un 10 %, en su gran mayoría. Por otro lado, como se mencionó anteriormente, se observó que los datos para los glaciares no se encuentran en la totalidad de periodo de tiempo considerado, sin embargo, es posible evidenciar que el

comportamiento de los datos in situ es concordante a lo evidenciado por los datos Landsat. A pesar de lo anterior, sí es posible evidenciar un mismo comportamiento en el periodo de tiempo completo dentro de las gráficas de los glaciares Pirámide y San Francisco, los cuales, a modo general, poseen mediciones de albedo inferiores y con mayor constancia que el resto de glaciares, debido su caracterización como glaciares cubiertos por detritos, según el estudio realizado por Gómez (2022). En relación a lo observado en la Tabla 6 se aprecia una concordancia general adecuada entre los valores derivados de las imágenes satelitales y las EMAM, donde se presentan valores cercanos a 1,0 en los glaciares Pirámide, Bello Alto y San Francisco. En contraste, es posible evidenciar una sobreestimación de la medición derivada de Landsat, debido al sesgo obtenido para los casos de Bello Bajo (1,45) y Echaurren Norte (1,17), posiblemente asociada a la diferencia de escala entre la medición satelital y área abarcada por la EMAM, debido al gran tamaño del pixel (30x30m), lo que podría indicar que la medición Landsat utilice zonas de nieve de mayor reflectancia dentro del pixel satelital. Por otra parte, se evidencia un sesgo menor para el glaciar Yeso (0,82), indicando una subestimación satelital respecto de lo obtenido por EMAM, posiblemente también vinculado a la diferencia de escala de cada fuente, es decir, el pixel puede contener condiciones locales de impureza superficial que afecten la reflectancia promedio de este. En consiguiente, estos resultados confirman que la derivación de albedo puntual Landsat constituye un método confiable para la estimación de albedo glaciar en una región mayor, considerando limitaciones asociadas a la escala de observación y la irregularidad de la superficie glaciar.

En cuanto al coeficiente de correlación entre las mediciones observadas, del gráfico de la Figura 8, se puede observar a simple vista que existe una tendencia temporal-espacial significativa, donde se presenta en promedio un valor de correlación de 0,91, lo que comparado con los valores típicos utilizados por estudios como Martínez Ortega et al (2009) donde considera que para valores de  $r > 0,75$  se presenta una fuerte correlación entre los datos trabajados, por ende, se confirma una tendencia con correlación lineal fuerte por método de Pearson y una relación monótonica fuerte positiva por método de Spearman. En cuanto a los valores  $p$ , se considera que el " $p$ -valor" debe encontrarse por debajo de 0,05 para que los resultados obtenidos presenten una correlación estadísticamente significativa, lo que para efectos del actual cálculo, se tiene un  $p$  valor de 0 para método de Spearman, lo que indica que la probabilidad de que la correlación sea debido al azar es extremadamente baja y corresponde a un resultado estadísticamente significativo, es decir, los datos utilizados presentan una similitud fuerte en cuanto a su tendencia. Por otro lado, el coeficiente de Pearson tiene un valor de  $1,24e^{-13}$ , lo que indica una asociación lineal significativa. La mayoría de las diferencias entre los datos comparados se mantienen dentro de un rango  $\pm 0,15$  reflejando un buen nivel de similitud entre ambas fuentes métodos. Sin embargo, es posible evidenciar, al igual que lo mencionado en la Figura 7, que existe una sobreestimación de las mediciones de albedo satelital, debido

a que la regresión ajustada (línea negra) se encuentra por sobre la tendencia perfecta 1 : 1 (línea roja punteada), lo que se puede explicar asociando esta diferencia a factores locales como condición atmosférica, nubosidad o heterogeneidad de la superficie glaciar, ya que, los valores determinados por Landsat corresponden a albedo de un píxel de 30x30 m, lo que corresponde a un área considerablemente superior al terreno medido por las EMAM. Por otro lado, los valores estadísticos que respaldan los métodos utilizados, se calcula un estadístico de prueba "t" que debe ser menor al valor crítico obtenido para rechazar hipótesis nula de correlación entre los datos. Para el caso actual, se tiene un  $t_{critico} = 2,9598$  y un estadístico de prueba  $t_{prueba} = 2,7764$  lo que verifica que no existe correlación lineal de los datos y se confirma que el coeficiente de correlación es distinto de cero.

Al igual que en el análisis anterior, donde se evalúa la correlación de datos utilizando el promedio de todos los años para cada glaciar, se realiza un análisis de la correlación de todos los años considerados por glaciar, evaluando de manera local la concordancia entre el albedo puntual Landsat y la EMAM ubicada en cada glaciar. Los resultados de cada glaciar se exponen en las Figuras 9-10-11-12-13-14.

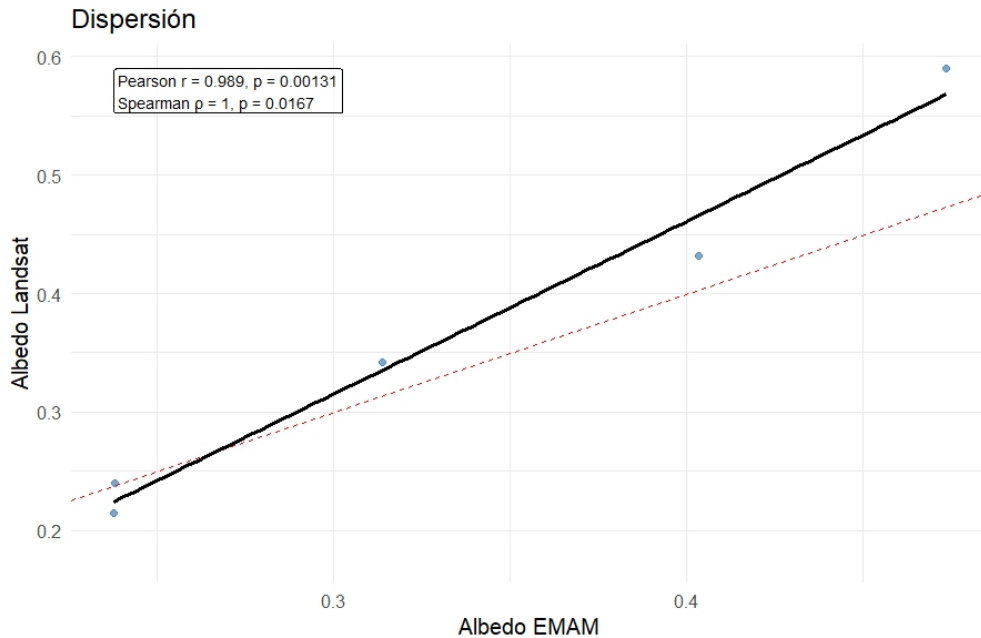


Figura 9: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat, Bello Alto.

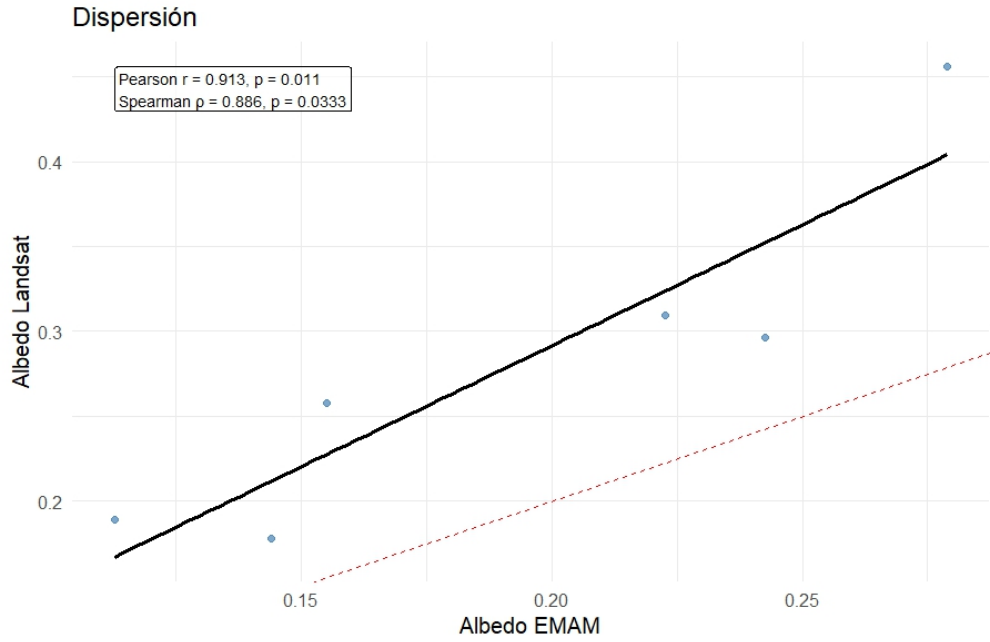


Figura 10: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat, Bello Bajo.

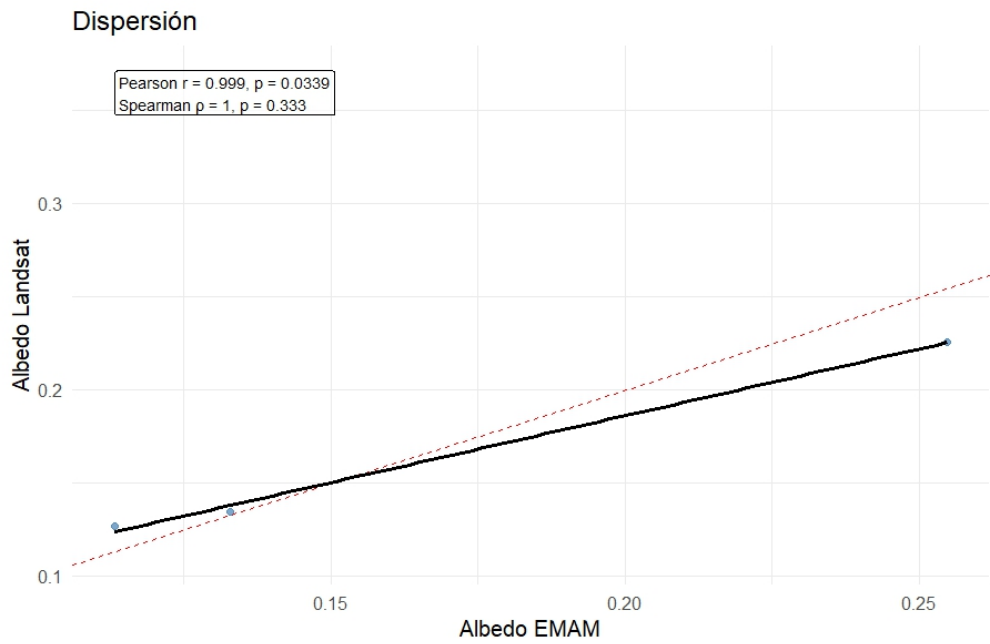


Figura 11: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat, Echaurren Norte.

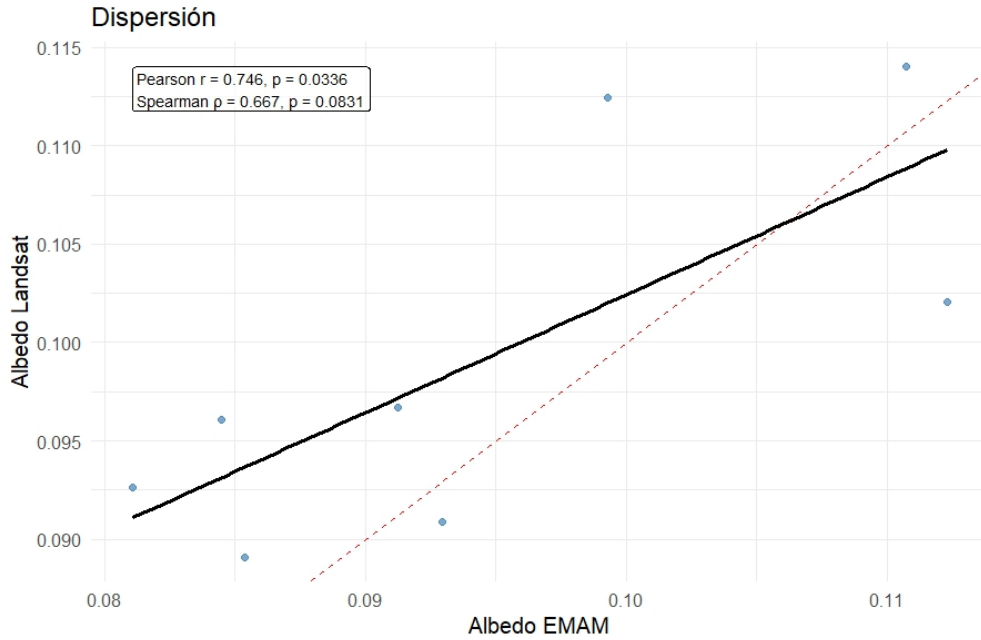


Figura 12: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat, Pirámide.

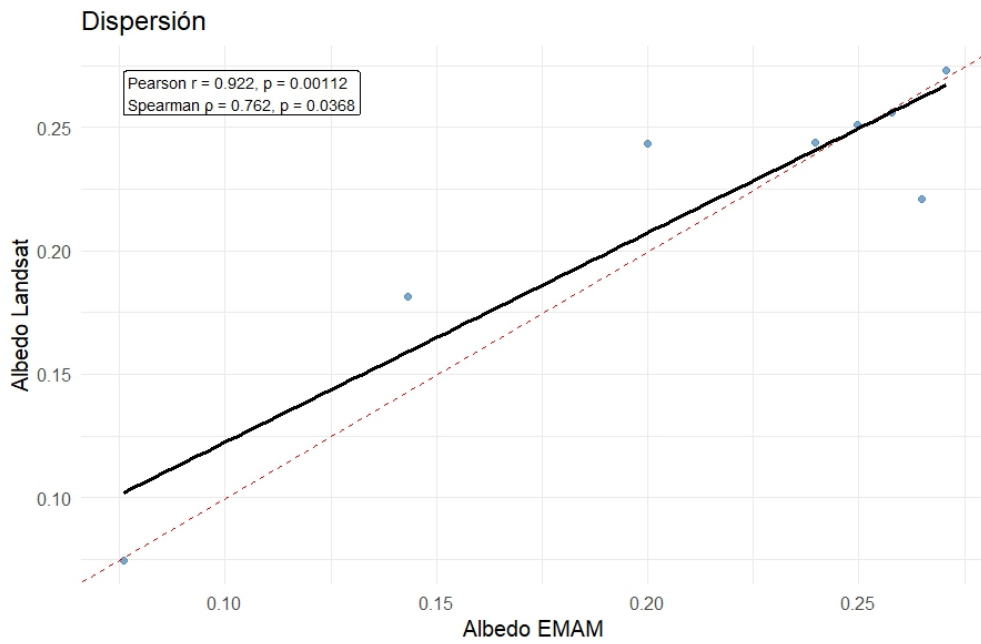


Figura 13: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat, San Francisco.

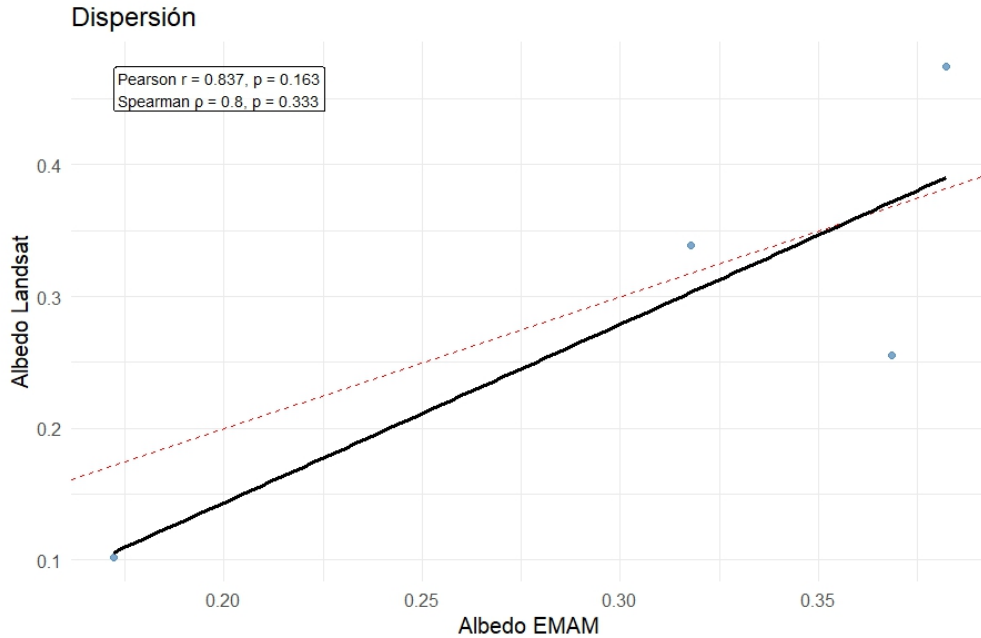


Figura 14: Coeficiente de correlación de Spearman entre datos EMAM y datos Landsat, Yeso.

De los gráficos expuestos, es posible evidenciar que, a modo general, los coeficientes de Pearson fueron altos para todos los casos evaluados ( $r \geq 0,74$ ) confirmando una relación lineal significativa entre ambas fuentes de datos utilizadas. Particularmente el glaciar Echaurren Norte y el sector glaciar Bello Alto, Figura 11 y Figura 9, respectivamente, poseen una correlación elevada de  $r \geq 0,98$ , seguidos por los glaciares Yeso, Figura 14, y San Francisco, Figura 13, que poseen correlaciones de  $r \geq 0,83$ , lo que es indicio de que el satélite Landsat otorga una aproximación fidedigna de las variaciones interanuales observadas en terreno. En contraparte, el sector glaciar Bello Bajo, Figura 10, y el glaciar Pirámide, Figura 12, aunque la correlación se mantiene fuerte entre valores de 0,74-0,91, es posible evidenciar desajustes puntuales que podrían guardar relación con la heterogeneidad espacial de la superficie, junto con la diferencia de escala entre el píxel satelital y la medición puntual de la EMAM.

En cuanto a los valores obtenidos utilizando el método de Spearman, es posible determinar que al presentar valores elevados de este método ( $\rho > 0,8$ ) los datos poseen relaciones monotónicas fuertes entre ambas fuentes de datos, confirmando que los glaciares mantienen el mismo orden de albedo puntual a lo largo de los años, aún existiendo diferencias en valores absolutos producto de las diferencias de escala entre ambas fuentes de datos. Siguiendo la línea anterior, se evidencia que los glaciares Echaurren Norte y Bello Alto poseen una correlación perfecta entre sus datos ( $\rho = 1$ ) con un nivel de significancia estadística (p-valor)

por debajo de 0,05, lo que podría significar que los valores de albedo medidos en esta zona vía satélite son fieles a lo obtenido in situ. Por su parte, los glaciares Yeso y San Francisco poseen valores  $\rho > 0,83$  con  $p - valor < 0,05$ , lo que indica que los valores son estadísticamente significativos y no se atribuyen al azar. En cambio, los glaciares Pirámide y Bello Bajo, aunque poseen coeficientes de Spearman moderados ( $\rho \approx 0,67-0,83$ ), los p-valores se sitúan ligeramente por encima de 0,05, lo que implica que la relación monotónica existe, pero no alcanza a ser estadísticamente significativa con el tamaño muestral disponible, reflejando mayor dispersión y posibles discrepancias puntuales. Sin embargo, cabe destacar que para el caso de los glaciares Echaurren Norte, Bello Alto y Yeso sólo se poseen datos EMAM entre los años 2020-2022, 2018-2022 y 2015-2018 para cada uno, respectivamente, por lo que no se tiene una densidad que permita determinar con mayor certeza si su correlación es correcta y se debe realizar una campaña de medición nueva para analizar la correlación de estos cuerpos de hielo.

## 6.2. Derivación de albedo distribuido para los 25 grandes glaciares 2000-2022 y comparación con estudios anteriores

A partir de los registros de albedo medidos vía satélite Landsat, se realiza el análisis de tendencia utilizando el método de Mann-Kendall y la pendiente de Theil-Sen para los 25 glaciares considerados para este apartado y determinar si existe disminución de albedo para el periodo de tiempo trabajado entre los años 2000-2022. Además, se realiza una comparativa con datos meteorológicos que ayuden a respaldar el comportamiento del albedo dentro del periodo de tiempo descrito, utilizando datos de precipitación invernal antes del periodo de medición de albedo.

De la derivación de albedo, se presentan los resultados consolidados de albedo ordenados por latitud de izquierda a derecha (geográficamente de norte a sur) en el siguiente gráfico de cajas de la Figura 15. En adición a lo anterior, se presentan los gráficos de las Figuras 16-17-18 donde se visualiza el comportamiento del albedo para los glaciares ubicados en conjunto según su zona, descrita en el apartado 4.1.

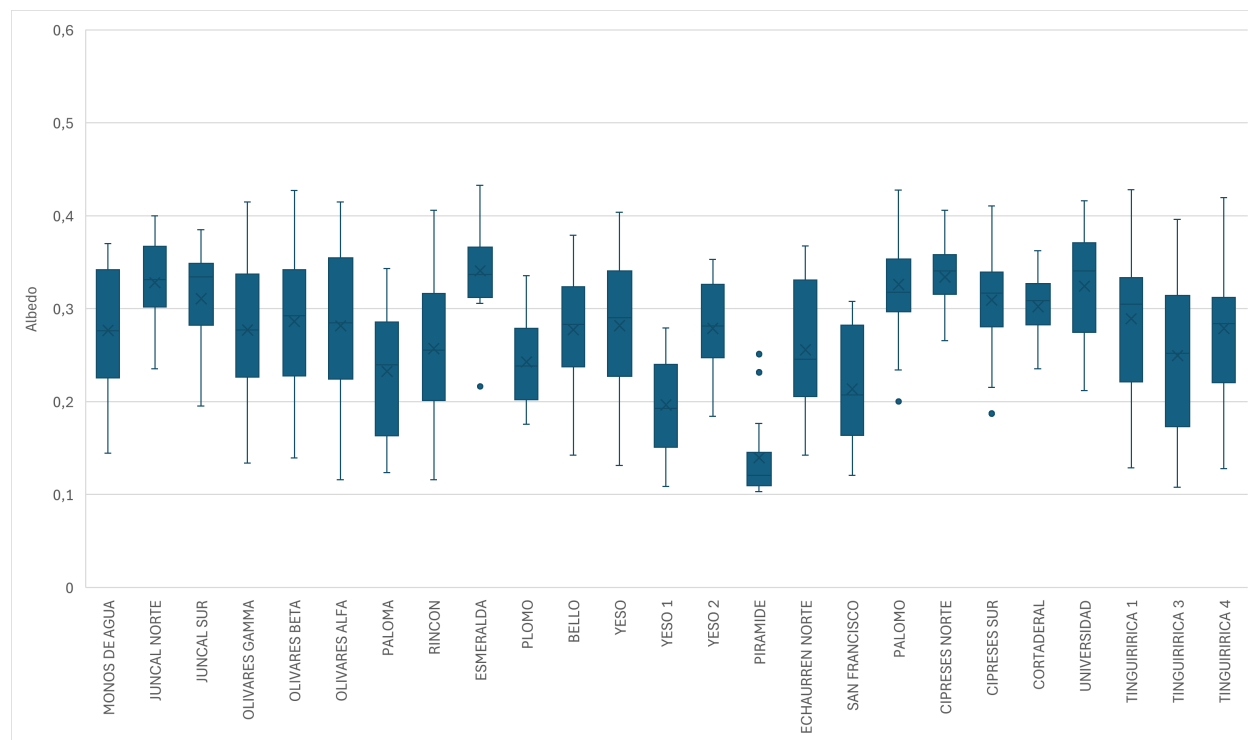


Figura 15: Gráfico de cajas de la variable de albedo para los 25 glaciares en orden de latitud.

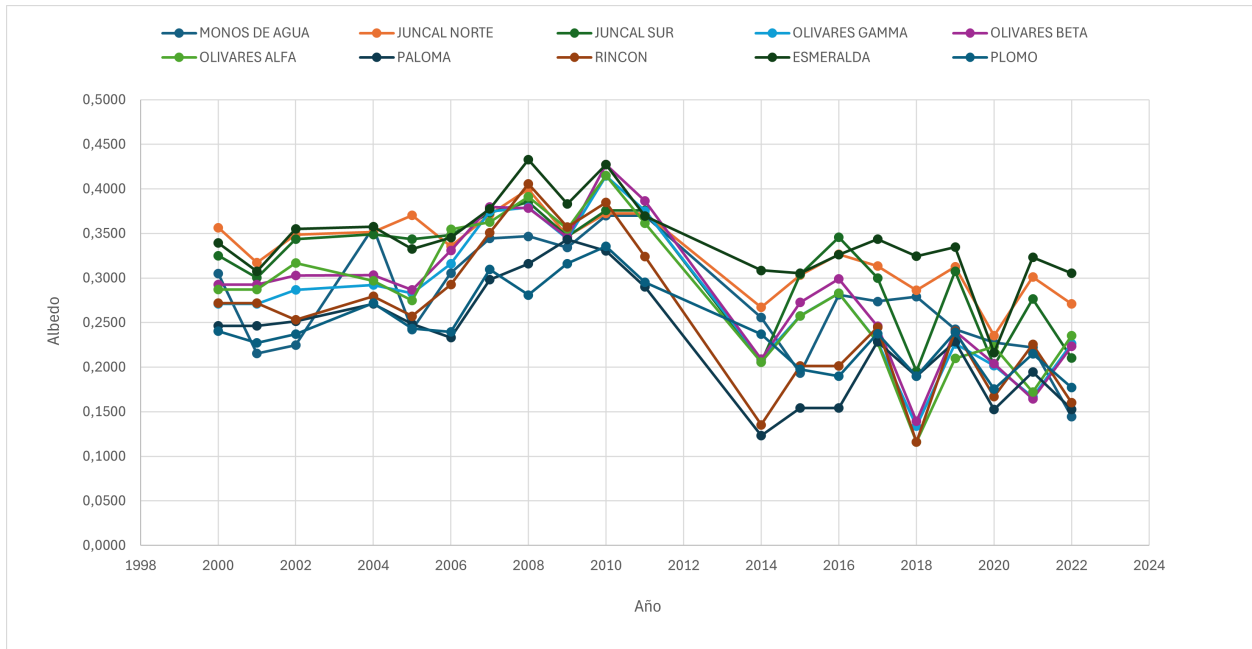


Figura 16: Mediciones de albedo glaciar Sub Zona Norte

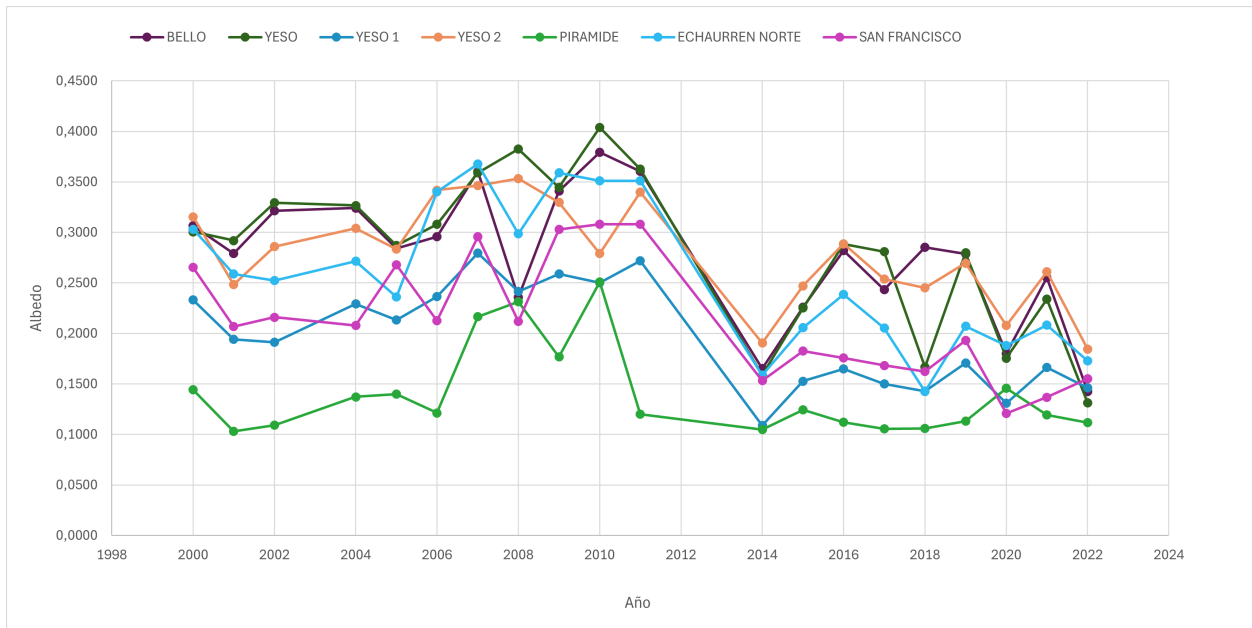
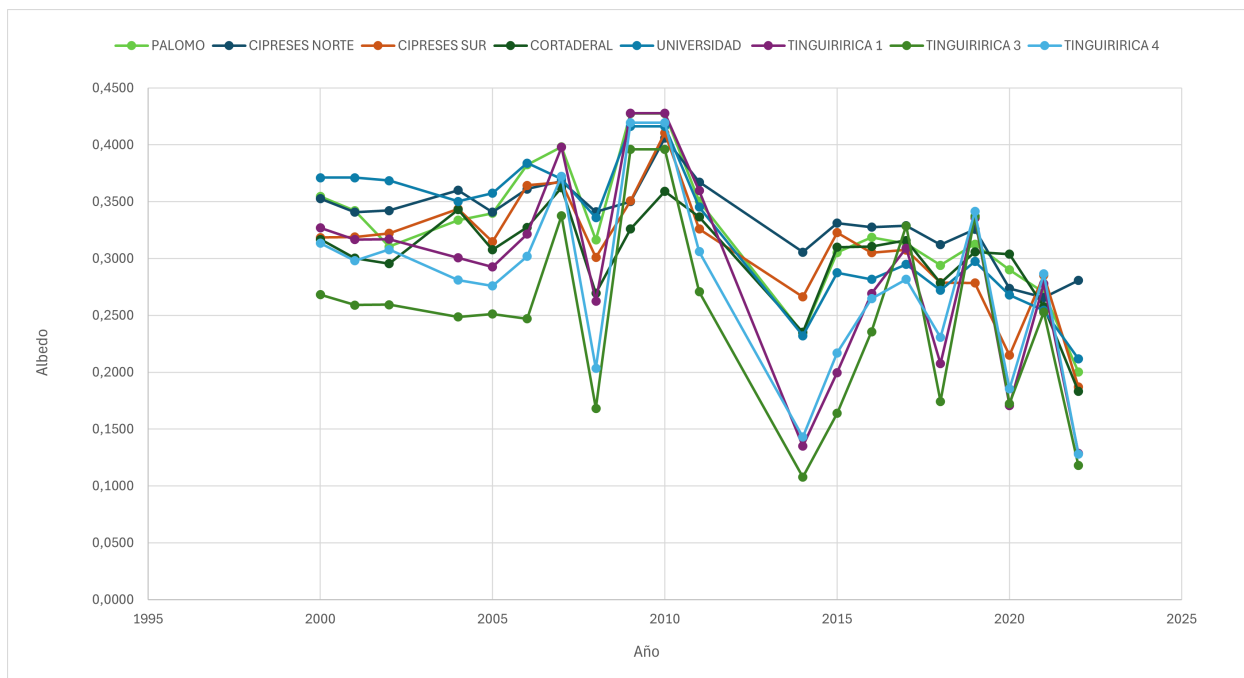


Figura 17: Mediciones de albedo glaciar Sub Zona Centro



*Figura 18: Mediciones de albedo glaciar Sub Zona Sur*

A modo general, del análisis de albedo para los 25 glaciares del gráfico de cajas de la Figura 15, es posible extraer un patrón de reducción sostenido de albedo entre el periodo 2010-2022 y observar variaciones interanuales en el comportamiento de la variable, posiblemente en respuesta a la intensificación de la sequía dentro del país desde el 2010. En términos generales, los valores medianos de albedo varían entre 0,2 y 0,35, lo que concuerda con los rangos característicos de los glaciares de los Andes Centrales descritos por Gómez (2022) y Shaw et al. (2020). Los glaciares ubicados en la subzona norte, como el conjunto Juncal y Olivares, presentan valores de albedo medianos menores a 0,3 y una dispersión moderadamente mayor en comparación al resto de glaciares, lo que podría explicarse por la clasificación de hielo con presencia de detritos y partículas finas determinada por el estudio de Gómez (2022). Por otro lado, dentro de la subzona norte se observa una particularidad en el comportamiento del glaciar Esmeralda, el cual presenta una variabilidad interanual reducida en comparación con otros glaciares del mismo grupo, pero con un rango de valores de albedo más elevado. Esta condición podría explicarse por su mayor altitud media y por las condiciones climáticas asociadas a dicha elevación, que favorecen una acumulación nival más persistente y una menor exposición a polvo superficial o material detrítico. Asimismo, su orientación geográfica, probablemente con menor incidencia directa de radiación solar durante el verano, contribuye a mantener valores de reflectancia más altos y estables a lo largo del periodo analizado, diferenciándolo del comportamiento observado en glaciares cercanos como Olivares Alfa o

Plomo. En la subzona centro se observa una variabilidad interanual reducida y valores medianos de albedo ligeramente menores en comparación con los glaciares de la subzona norte. Este comportamiento sugiere una menor presencia de hielo limpio y una mayor proporción de superficies cubiertas por material detrítico o con polvo superficial, lo que contribuye a mantener valores más estables pero en general más bajos de reflectancia. Dentro de esta zona destacan dos casos particulares: el glaciar Pirámide y el glaciar Yeso 1. El primero presenta los valores de albedo y la variabilidad más bajos del conjunto, lo cual se explica por su cobertura completa de detritos, que actúa como aislante térmico, reduciendo la interacción directa con la radiación solar y limitando las variaciones estacionales (Gómez, 2022). Por otro lado, el glaciar Yeso 1 muestra una variabilidad similar a la del resto de los glaciares del sector, pero con valores de albedo consistentemente inferiores, lo que probablemente se relaciona con su orientación y fuerte inclinación, ya que es el glaciar con mayor pendiente del grupo, condición que favorece una mayor exposición solar y una fusión más intensa en los meses estivales. Finalmente, en la subzona sur se evidencia que los glaciares presentan la menor variabilidad interanual y los valores medios de albedo más elevados de toda el área de estudio. Este comportamiento puede explicarse por su ubicación más austral, donde las condiciones climáticas son relativamente más frías y húmedas en comparación con las cuencas situadas al norte. Además, la menor influencia de actividades antrópicas y la reducida deposición de polvo mineral o contaminantes atmosféricos podría contribuir a mantener superficies más limpias y estables. Estos resultados coinciden con lo reportado por Gómez (2022) y Farías-Barahona et al. (2020), quienes destacan que los glaciares de la cuenca del río Rapel, como Palomo, Universidad, Cipreses y Cortaderal, conservan un comportamiento más estable del albedo y una mayor resiliencia frente a las variaciones climáticas extremas observadas durante la megasequía 2010–2020.

En cuanto a los gráficos correspondientes a los glaciares divididos en sub zona, se respalda de manera visual la tendencia a la disminución del albedo en cada una de estas, sin embargo, es posible visualizar que en la sub zona sur, Figura 18, se presentan valores con menor variabilidad entre cada uno de los glaciares contenidos, observándose un comportamiento más uniforme entre las mediciones en comparación a las otras dos zonas. De manera contraria, en la sub zona norte se presenta una mayor variabilidad visual interanual, con valores más elevados en comparación a la zona centro durante los primeros años, sin embargo, se observa una caída abrupta a partir del 2014 hasta la fecha. Por su parte, en la sub zona centro, Figura 17, es posible observar valores de albedo altos y estables hasta el 2010, pero con un abrupto descenso entre el año 2011 y 2014. Posteriormente se aprecia una cierta recuperación parcial aunque sin recuperar el nivel de años anteriores. Cabe mencionar que se observa un cambio abrupto en las mediciones de albedo al comparar los valores previos y posteriores al año 2010. Si bien dicho año coincide con el inicio de la denominada megasequía en Chile central,

este quiebre también podría estar asociado a un cambio instrumental, ya que, en ese periodo se efectuó la transición desde el satélite Landsat 4 hacia Landsat 8. Este cambio de sensor implica diferencias en la calibración radiométrica y en las bandas espectrales utilizadas, lo que podría traducirse en errores de compatibilidad o sesgos sistemáticos en la estimación del albedo, es decir, parte de la discontinuidad observada podría atribuirse no solo a condiciones climáticas, sino también a efectos del sensor y a la necesidad de aplicar ajustes de calibración entre plataformas satelitales.

## TENDENCIA MANN KENDALL Y PENDIENTE THIEL SEN

Considerando la posible tendencia observada en el comportamiento de la variable de albedo de los distintos glaciares analizados, se realizan los test estadísticos descritos al inicio del capítulo, obteniéndose los resultados en cuanto a tendencia y nivel de significancia para cada uno de ellos. A continuación, se presentan los gráficos obtenidos para los glaciares con mayores observaciones de cada sub zona, Figura 19-20-21-22-23. Por otro lado, que los demás resultados quedan expresados a modo de resumen en la Tabla 7, mientras que los gráficos correspondientes a los demás glaciares se presentan en ANEXO 9. De los gráfico, se pueden desprender 3 pendientes de Thiel-Sen, donde la línea de color rojo representa la tendencia para el total de datos, la línea punteada anaranjada representa la pendiente para los datos dentro del periodo 2000-2011 y la línea punteada verde para los datos que toman lugar entre 2014-2022.

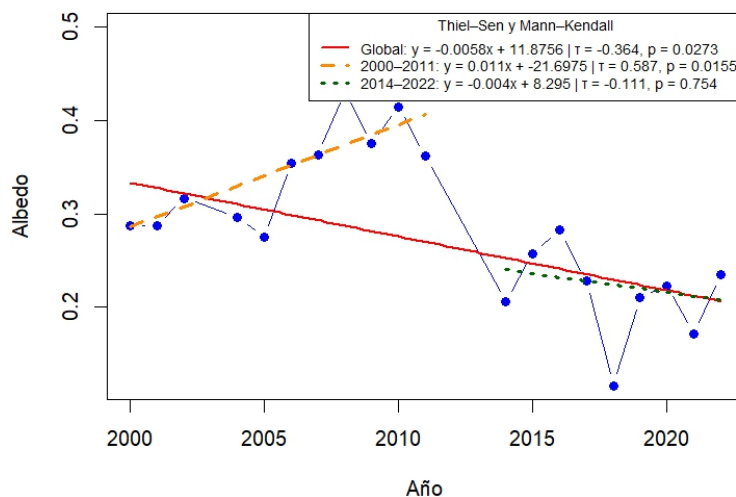


Figura 19: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Olivares Alfa.

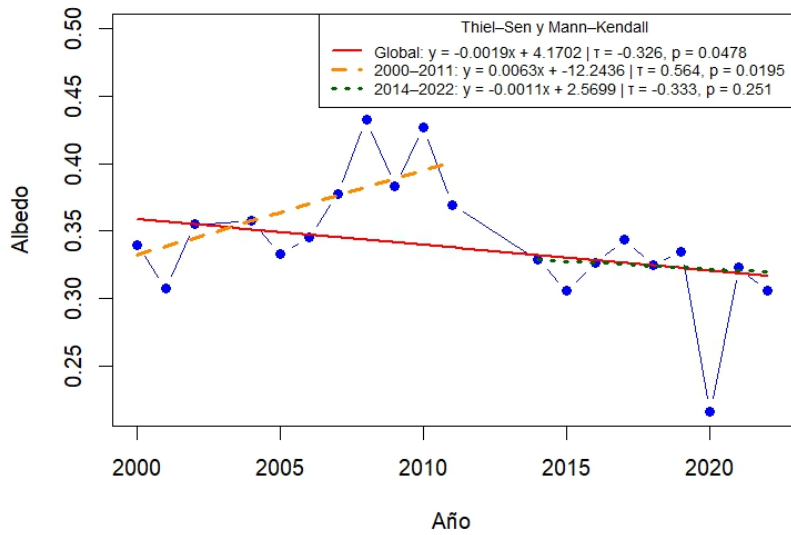


Figura 20: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Esmeralda.

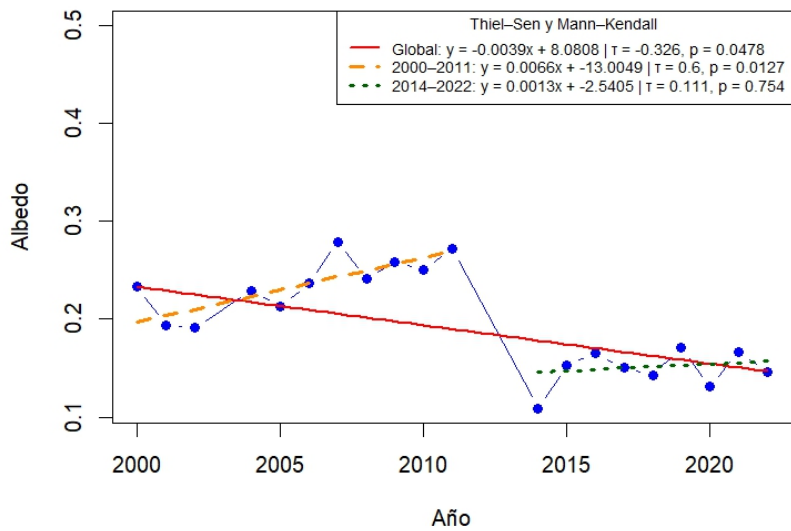


Figura 21: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Yeso 1.

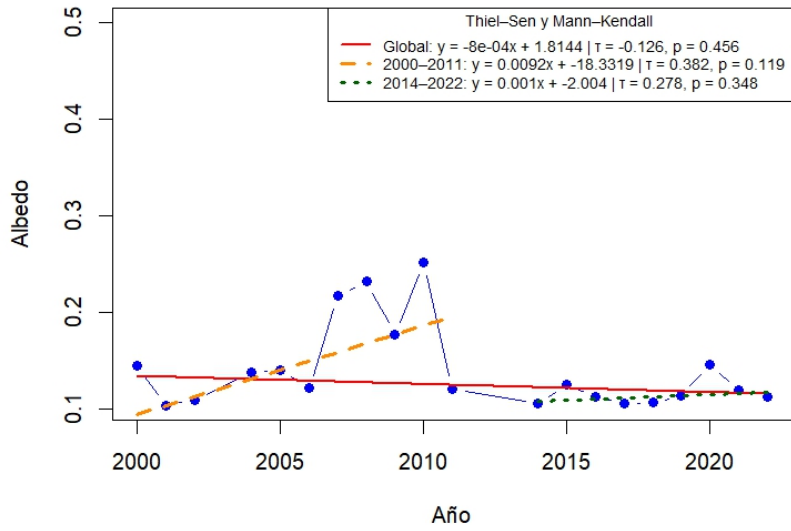


Figura 22: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Pirámide.

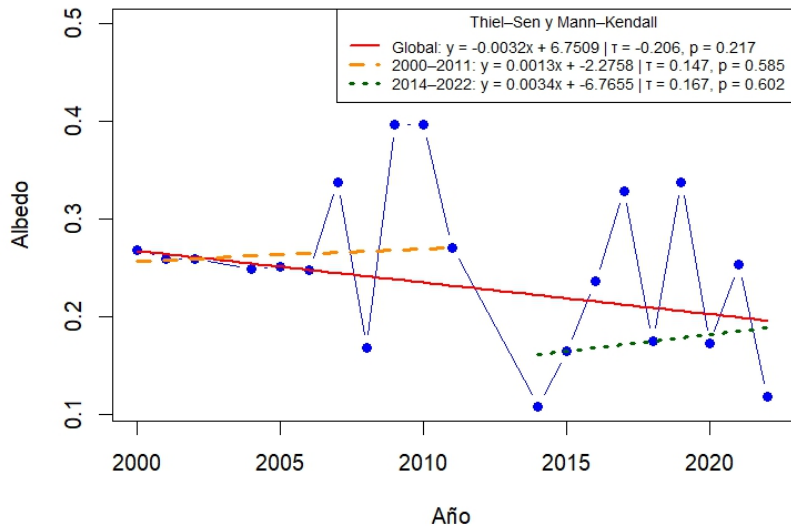


Figura 23: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Tinguiririca 3.

Tabla 7: Tabla resumen de valores de pendiente de Thiel Sen y test de Mann Kendall para 25 glaciares trabajados.

| Glaciar     | Global |         |        | 2000-2011 |         |        | 2014-2022 |         |        |
|-------------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|-----------|---------|--------|
|             | $\tau$ | p-value | p<0.05 | $\tau$    | p-value | p<0.05 | $\tau$    | p-value | p<0.05 |
| M.de Agua   | -0,251 | 0,142   | No     | 0,556     | 0,0318  | Si     | -0,389    | 0,175   | No     |
| Jun. Norte  | -0,427 | 0,00941 | Si     | 0,44      | 0,0725  | No     | -0,222    | 0,466   | No     |
| Jun. Sur    | -0,343 | 0,0378  | Si     | 0,624     | 0,00997 | Si     | -0,167    | 0,602   | No     |
| Ol. Gamma   | -0,332 | 0,0442  | Si     | 0,771     | 0,00137 | Si     | -0,278    | 0,348   | No     |
| Ol. Beta    | -0,354 | 0,0322  | Si     | 0,697     | 0,00386 | Si     | -0,333    | 0,251   | No     |
| Ol. Alfa    | -0,364 | 0,0273  | Si     | 0,587     | 0,0155  | Si     | -0,111    | 0,754   | No     |
| Paloma      | -0,339 | 0,0407  | Si     | 0,55      | 0,0235  | Si     | 0,141     | 0,675   | No     |
| Rincon      | -0,328 | 0,0476  | Si     | 0,55      | 0,0235  | Si     | 0,028     | 1       | No     |
| Esmeralda   | -0,326 | 0,0478  | Si     | 0,564     | 0,0195  | Si     | -0,333    | 0,251   | No     |
| Plomo       | -0,316 | 0,0556  | No     | 0,636     | 0,00812 | Si     | -0,333    | 0,466   | No     |
| Bello       | -0,326 | 0,0478  | Si     | 0,418     | 0,0868  | No     | -0,056    | 0,917   | No     |
| Yeso        | -0,379 | 0,0212  | Si     | 0,564     | 0,0195  | Si     | -0,167    | 0,602   | No     |
| Yeso 1      | -0,326 | 0,0478  | Si     | 0,6       | 0,0127  | Si     | 0,111     | 0,754   | No     |
| Yeso 2      | -0,389 | 0,0179  | Si     | 0,273     | 0,276   | No     | -0,111    | 0,754   | No     |
| Piramide    | -0,126 | 0,456   | No     | 0,382     | 0,119   | No     | 0,278     | 0,348   | No     |
| Ech. Norte  | -0,415 | 0,0143  | Si     | 0,378     | 0,152   | No     | 0         | 1       | No     |
| Sn.Francis. | -0,462 | 0,00636 | Si     | 0,467     | 0,0736  | No     | -0,278    | 0,348   | No     |
| Palomo      | -0,459 | 0,00524 | Si     | 0,33      | 0,184   | No     | -0,389    | 0,175   | No     |
| Cip. Norte  | -0,495 | 0,00255 | Si     | 0,418     | 0,0868  | No     | -0,5      | 0,0763  | No     |
| Cip. Sur    | -0,432 | 0,00859 | Si     | 0,345     | 0,161   | No     | -0,444    | 0,118   | No     |
| Cortaderal  | -0,337 | 0,041   | Si     | 0,382     | 0,119   | No     | -0,333    | 0,251   | No     |
| Universidad | -0,575 | 0,0004  | Si     | 0         | 1       | No     | -0,278    | 0,348   | No     |
| Ting. 1     | -0,311 | 0,0597  | No     | 0,257     | 0,31    | No     | 0,056     | 0,917   | No     |
| Ting. 3     | -0,206 | 0,217   | No     | 0,147     | 0,585   | No     | 0,167     | 0,602   | No     |
| Ting. 4     | -0,28  | 0,0914  | No     | 0,147     | 0,585   | No     | 0,111     | 0,754   | No     |

De los gráficos mostrados anteriormente, es posible observar que dentro del período de tiempo evaluado, existe un patrón regional claro de disminución del albedo que, en la mayoría de los casos, es estadísticamente significativo (p valor < 0,05), como se aprecia en la Tabla 7. Los resultados muestran pendientes negativas a nivel global que varían entre  $\approx -0,002$  y  $\approx -0,009$  por año, lo que es equivalente a una reducción del orden de  $\approx -0,02$  y  $\approx -0,09$  por década, en la mayoría de los casos. Dichos resultados se encuentran en la línea de estudios

previos realizados por Shaw et al. (2020) y Farías-Barahona et al. (2020), quienes registraron disminuciones de albedo del orden de  $\approx -0,02$  y  $\approx -0,03$  por década y la intensificación en el periodo de la megasequía 2010-2020. Del mismo modo, en Dussailant et al. (2019) se documenta un incremento en la pérdida de la masa glaciaria en los Andes, estrechamente vinculado a la reducción de nevadas en periodos invernales, y, por ende, en el albedo estival de cada glaciar. Por otro lado, de la tesis realizada por Felipe Gómez (2022), es posible extraer que existen glaciares como el Olivares, Paloma y Tinguiririca como principales focos de degradación acelerada, presentando balances negativos y reducciones de albedo en los periodos 2009-2015, confirmando que las tendencias negativas encontradas en este estudio reflejan el proceso de degradación del glaciar y con esto, la reducción del albedo de cada cuerpo de hielo a partir del año 2010. De manera específica es posible observar que existe una tendencia a la disminución de albedo dentro de los gráficos de Olivares Alfa (Figura 19) y Esmeralda (Figura 20) considerando los datos completos, sin embargo, haciendo análisis de los periodos antes y después del 2010, se observa que la tendencia es significativa con pendiente positiva para el periodo previo a este año, mientras que para años posteriores se mantiene una tendencia sin significancia de manera negativa en los datos. Lo anterior podría ser resultado de el cambio de sensor utilizado en los equipos Landsat y a la baja cantidad de datos para el análisis de la tendencia. Por otro lado, es posible evidenciar del gráfico de glaciar Pirámide (Figura 22), un comportamiento más bien constante en cuanto a su pendiente para ambos periodos de tiempo, esto debido a que se caracteriza por ser un glaciar cubierto por detritos, por lo que sus niveles de albedo no se ven modificados de manera severa. Finalmente de los gráficos de los glaciares Yeso 1 (Figura 21) y Tinguiririca 3 (Figura 23) es posible evidenciar que se presentan tendencias positivas en ambos periodos, analizados de manera independiente, pero sin significancia estadística, por lo que no es posible determinar que su albedo se encuentre en el alza. Aun así, analizando sus valores de manera global, es posible evidenciar una tendencia negativa en ambos glaciares.

Con el fin de respaldar los resultados obtenidos en cuanto a la tendencia del albedo, se analizaron las diferencias y factores climáticos que influyen en cada sub-zona estudiada. Para ello, se utilizaron las estaciones meteorológicas y la grilla de datos meteorológicos de CR2MET para representar las condiciones climáticas de cada glaciar de manera fidedigna, considerando tanto la distancia de cada glaciar con respecto a las estaciones como la altitud a la que estas se encuentran. La finalidad de utilizar esta variable es analizar si el factor de la sequía y la escasez de precipitación son agentes efectivos en la baja de albedo durante las mediciones en época estival.

## ANÁLISIS SUB ZONA NORTE

En cuanto a las diferencias y a los factores climáticos que afectan en la sub-zona Norte (glaciares cuenca Aconcagua y sector norte de la cuenca del Maipo), se consideran las mediciones de precipitación acumulada durante el invierno registradas por la EM del Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal (5721017) y por los datos de CR2MET de la zona. En la Tabla 8 se expresan las alturas de las EM y la distancia comprendida entre cada EM y los glaciares. Por otro lado, en la Figura 24 se presentan los resultados de precipitación en comparación con el comportamiento del albedo durante el mismo período de tiempo.

*Tabla 8:* Altura de EM y distancias entre glaciares y EM DGA en Km, sub zona norte.

| EM                     | Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal<br>(5721017) | CR2MET Norte  |
|------------------------|---|---------------|
| Altitud EM (m)         | 3250  | Dato grillado |
| Glaciar Monos de Agua  | 21,3  | Dato grillado |
| Glaciar Juncal Norte   | 34,5  | Dato grillado |
| Glaciar Juncal Sur     | 26,3  | Dato grillado |
| Glaciar Olivares Gamma | 14,2  | Dato grillado |
| Glaciar Olivares Beta  | 10,5  | Dato grillado |
| Glaciar Olivares alfa  | 5,1   | Dato grillado |
| Glaciar Paloma         | 4,1   | Dato grillado |
| Glaciar Rincon         | 3,7   | Dato grillado |
| Glaciar Esmeralda      | 5,2   | Dato grillado |
| Glaciar Plomo          | 4,5   | Dato grillado |

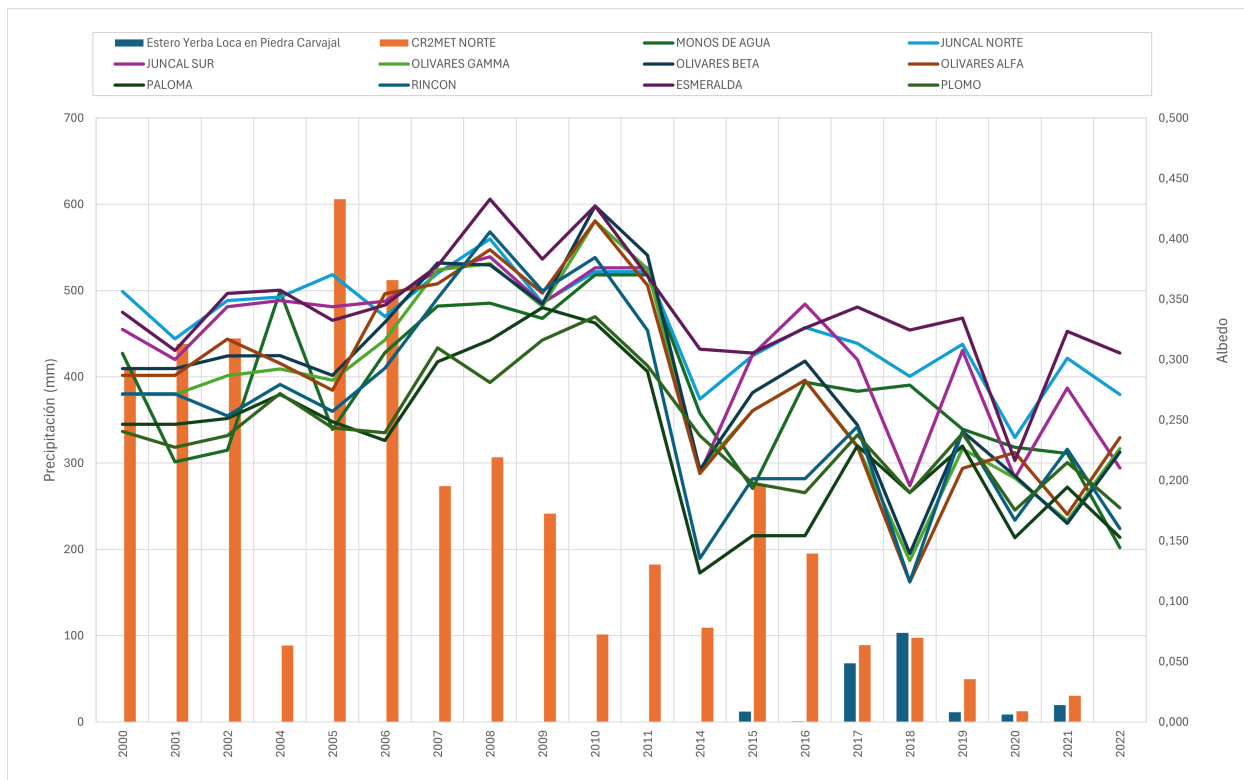


Figura 24: Comparación albedo con precipitación de estaciones pluviométricas, sub zona norte.

Del gráfico expuesto en la Figura 24, se realiza el análisis del comportamiento de las variables de albedo y precipitación. Si bien no fue posible adquirir mayor información de precipitación por la zona proveniente de EM, si se tienen en cuenta los datos grillados para hacer el análisis de precipitación de la zona. De lo anterior es posible observar una disminución estrepitosa en los valores de precipitación para el año para el año 2010, aun cuando se observa que los valores van a la baja y es posible observar que la tendencia de los glaciares monitoreados es concordante con la baja de precipitaciones registrada entre 2015 y 2022. Por otro lado, los glaciares de hielo limpio y mayor altitud como Juncal Norte, Esmeralda y Plomo muestran incrementos de albedo en los años previos al 2010, mientras que glaciares con mayor influencia de detritos, como Paloma y el conjunto Olivares Alfa, Beta y Gamma, mantienen valores persistentemente bajos de albedo, con escasa recuperación incluso tras inviernos relativamente húmedos. De lo observado en el analisis de la zona, los resultados expuestos son coherentes con la tesis de Gómez (2022), que señala la pérdida generalizada de hielo limpio en verano y la mayor presencia de superficies oscurcidas en glaciares como Paloma, y con estudios previos en Olivares–Juncal (Farías-Barahona 2020; Shaw 2020), que documentan descensos sostenidos del albedo asociados tanto a la variabilidad climática como

al depósito de impurezas producto de mineras cercanas a la zona glaciar.

## ANÁLISIS SUB ZONA CENTRO

En cuanto a las diferencias y a los factores climáticos que afectan en la sub-zona centro, se consideran las mediciones de precipitación acumulada durante el invierno registradas por las estaciones meteorológicas (EM) del Embalse El Yeso (5703008), Río Olivares antes Junta Río Colorado (5706001) y Glaciar San Francisco en Aguas Panimávidas (5702011). En la Tabla 9 se expresan las alturas de cada EM y la distancia comprendida entre cada EM y los glaciares. Por otro lado, en la Figura 25 se presentan los resultados de precipitación en comparación con el comportamiento del albedo durante el mismo período de tiempo.

*Tabla 9:* Altura de EM y distancias entre glaciares y EM DGA en Km, sub zona centro.

| EM                      | Embalse El Yeso (5703008) | Río Olivares Antes Junta Colorado (5706001) | Glaciar San Francisco en Aguas Panimávidas (5702011) | CR2MET Centro |
|-------------------------|---------------------------|---|--|---------------|
| Altitud EM (m)          | 2475                      | 1500  | 2220   | Dato grillado |
| Glaciar Bello           | 21,3                      | 17,2  | 32,7   | Dato grillado |
| Glaciar Yeso            | 22,5                      | 20,6  | 33,2   | Dato grillado |
| Glaciar Pirámide        | 21,1                      | 22,9  | 31,3   | Dato grillado |
| Glaciar Echaurren Norte | 8,9                       | 7,9   | 24,8   | Dato grillado |
| Glaciar San Francisco   | 7,2                       | 28,1  | 5,1  | Dato grillado |

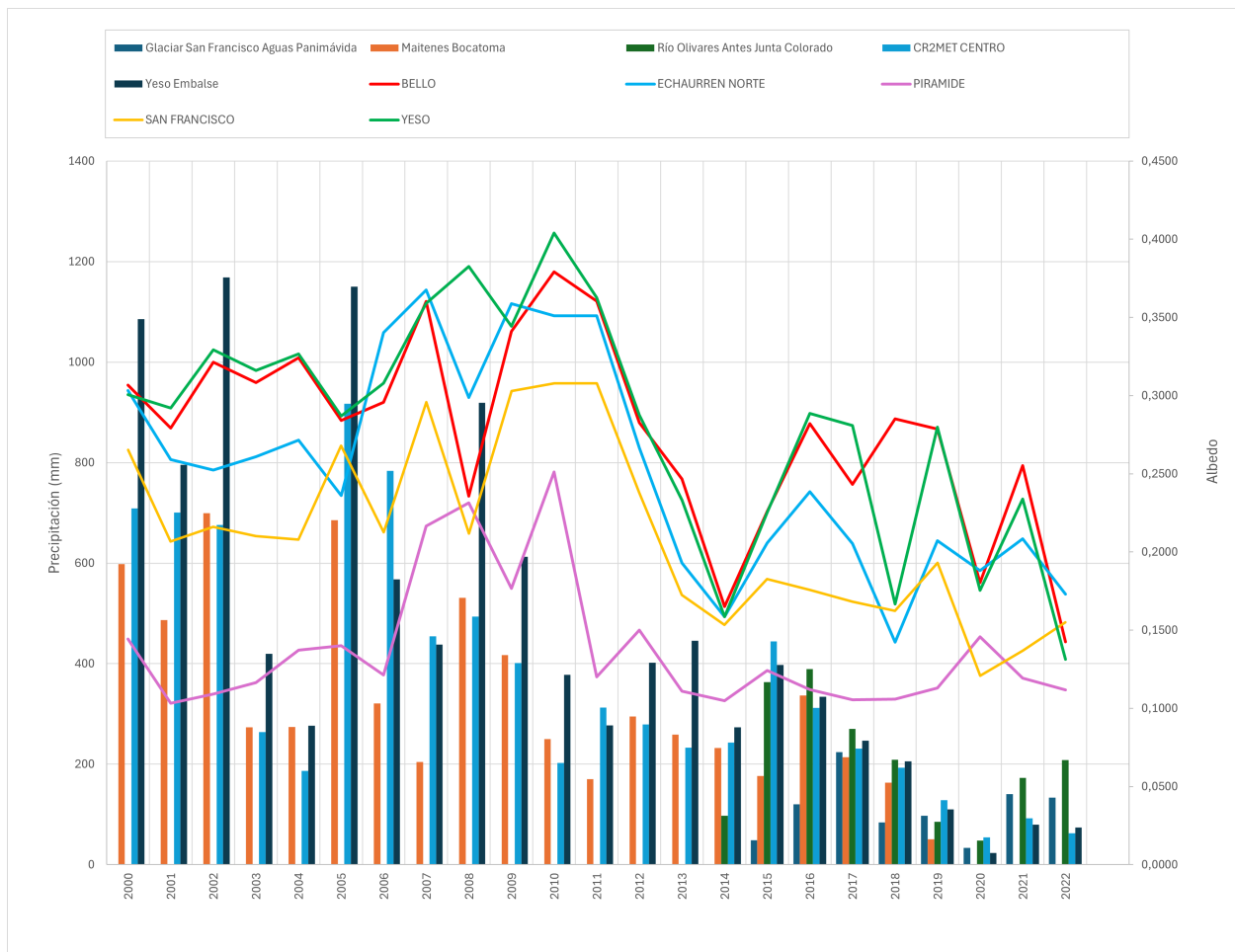


Figura 25: Comparación albedo con precipitación de estaciones pluviométricas, sub zona centro.

De los resultados expuestos en la Figura 25 donde se muestra la relación entre las precipitaciones invernales y los valores estivales de albedo para los glaciares de la sub zona central de estudio, es posible evidenciar un patrón de dependencia directa entre ambas variables. En los años con mayor precipitación invernal se registran valores de albedo más elevados, lo que corresponde a una mayor acumulación nival que protege al hielo glaciar de la radiación y mantiene una alta reflectancia. Por el contrario, durante los periodos de sequía registrados a partir del 2010, se observa una importante disminución de los valores de albedo, resultado de la baja cobertura de nieve y de la exposición temprana de hielo a la radiación solar en la época estival. Por otro lado, cabe destacar que, según lo expuesto por Felipe Gómez (2022), los glaciares como el Bello y el Yeso corresponden a cuerpos de hielo limpio con escasa cobertura de detritos en sus zonas terminales, lo que los vuelve especialmente sensibles a las variaciones de la precipitación nival de la zona y, por ende, a las fluctuaciones de albedo

en los años más secos. En cambio, glaciares como San Francisco y Pirámide corresponden a cuerpos de hielo cubiertos por detritos, tendiendo a presentar un albedo más bajo y menos dependiente de las variaciones interanuales de precipitación, como se muestra en la Figura mencionada. Dichos resultados son consistentes con lo mencionado en los estudios de Haw et al. (2020) y Farías-Barahona et al. (2020), quienes identificaron a los glaciares de hielo limpio como los más vulnerables a los descensos de precipitación registrados durante la sequía en comparación a aquellos cubiertos parcialmente por detritos.

## ANÁLISIS SUB ZONA SUR

Por su parte, las diferencias y los factores climáticos que afectan en la sub-zona sur, se consideran las mediciones de precipitación acumulada durante el invierno registradas por la EM de Cipreses (6003004) y los datos grillados de CR2MET de la zona. En la Tabla 10 se expresan las alturas de las EM y la distancia comprendida entre esta y los glaciares. Por otro lado, en la Figura 26 se presentan los resultados de precipitación en comparación con el comportamiento del albedo durante el mismo período de tiempo.

*Tabla 10:* Altura de EM y distancias entre glaciares y EM DGA en Km, sub zona sur.

| EM                     | Cipreses<br>(6003004) | CR2MET Sur    |
|------------------------|-----------------------|---------------|
| Altitud EM (m)         | 1880                  | Dato grillado |
| Glaciar Palomo         | 9,4                   | Dato grillado |
| Glaciar Cipreses Norte | 4,6                   | Dato grillado |
| Glaciar Cipreses Sur   | 8,1                   | Dato grillado |
| Glaciar Cortaderal     | 11,4                  | Dato grillado |
| Glaciar Universidad    | 14,1                  | Dato grillado |
| Glaciar Tinguiririca 1 | 32,1                  | Dato grillado |
| Glaciar Tinguiririca 3 | 28,7                  | Dato grillado |
| Glaciar Tinguiririca 4 | 30,2                  | Dato grillado |

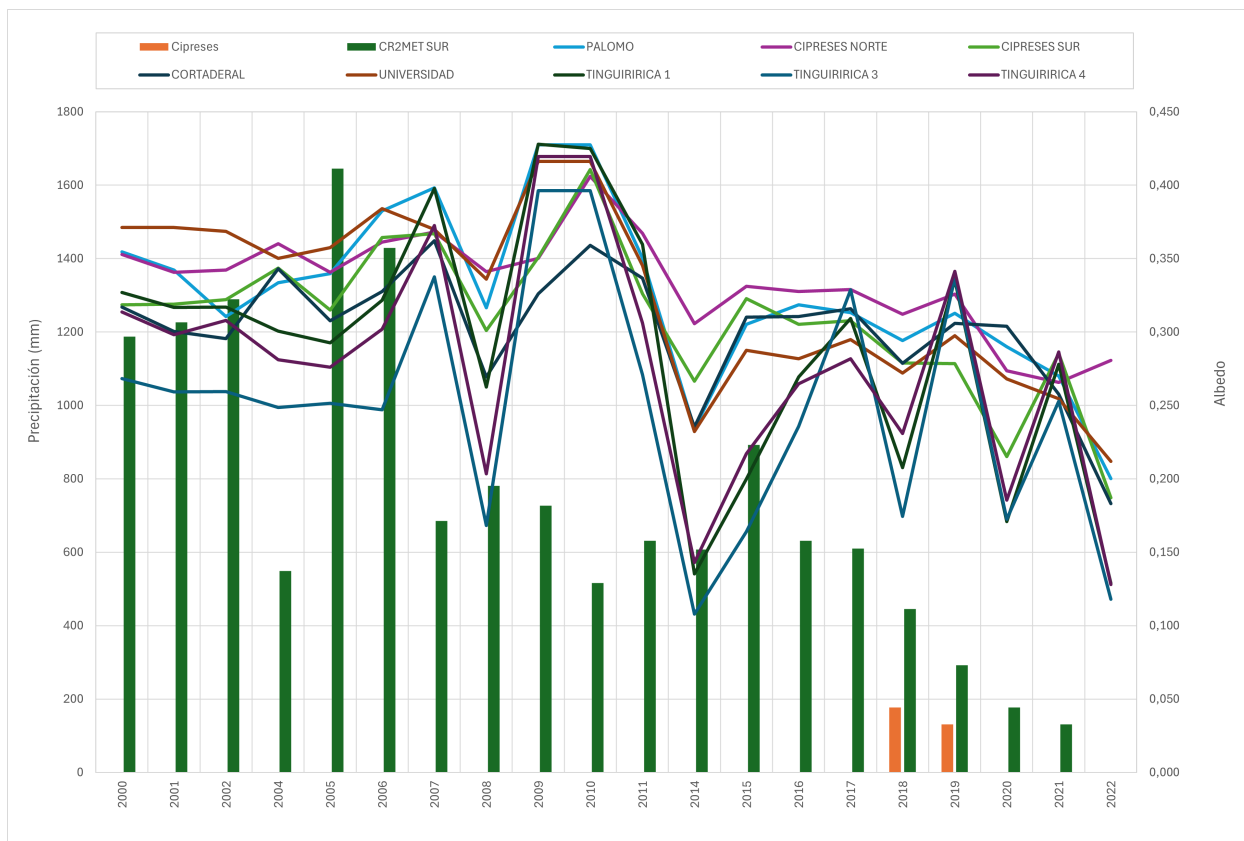


Figura 26: Comparación albedo con precipitación de estaciones pluviométricas, sub zona sur.

Del resultado del gráfico presente en la Figura 26, al igual que lo sucedido en cuanto a las mediciones de precipitación de la sub zona norte, para la actual zona de estudio no fue posible obtener mayores registros de precipitación para años anteriores al 2015. Sin embargo, utilizando los datos de la grilla CR2MET, fue posible evidenciar valores de precipitación altos para los primeros años de medición, lo que es concordante a lo observado en los niveles de albedo para esas fechas en específico. Por otro lado, es posible evidenciar un descenso abrupto en las precipitaciones durante el periodo 2011-2014, coincidente con la intensificación de la sequía en Chile, mencionada anteriormente, lo cual también se ve reflejado en la baja abrupta de los niveles de albedo por esa fecha. Posteriormente, se aprecia una recuperación parcial del albedo en algunos años puntuales, como el 2017 y 2019, aunque sin retornar a los niveles iniciales. Este patrón confirma la alta dependencia de estos glaciares respecto de la acumulación nival invernal, en línea con lo evidenciado en las Figuras 25 y 24. Además, en cuanto a la naturaleza glaciar de esta zona, según lo expuesto por la tesis de Felipe Gómez (2022), se señala que los glaciares Universidad, Palomo y Cipreses corresponden a glaciares de hielo limpio, caracterizados por una gran extensión y localización a mayor altitud, lo

que se traduce en una alta sensibilidad a la variabilidad de la precipitación, reflejada en descensos abruptos de albedo en los años más secos, mientras que glaciares como Tinguiririca y Cortaderal presentan zonas con mayor complejidad superficial y aporte de detritos, donde el albedo tiende a mantenerse en valores más bajos y con menor recuperación interanual. Este contraste refuerza lo documentado por estudios como Dussailant et al. (2019), quienes reportaron balances de masa negativos más marcados en glaciares de menor altitud y con superficies más heterogéneas, y por Farías-Barahona et al. (2020), que identificaron descensos significativos de albedo asociados a menor precipitación nival en toda la región.

## PROXIMIDAD DE INSTALACIONES MINERAS

Otro factor a considerar en el análisis de albedo es la presencia de mineras en la región, debido a la cercanía que presentan las faenas con respecto a los cuerpos de hielo y su constante actividad. Utilizando el sistema en línea del Sernageomin, fue posible ubicar espacialmente las instalaciones mineras dentro del área de estudio trabajada, de donde se obtuvieron los siguientes mapas.

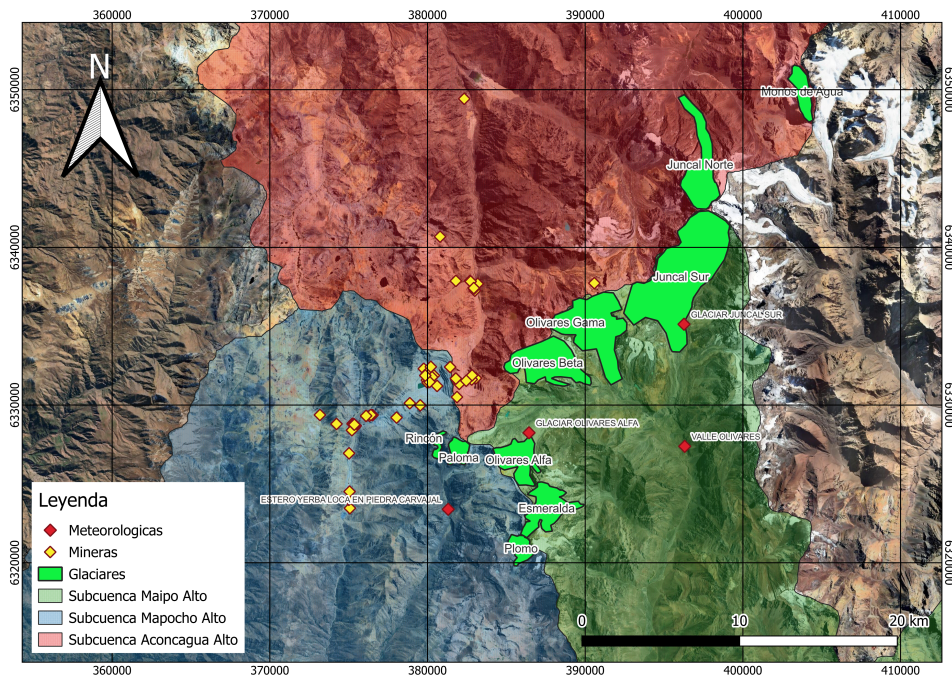


Figura 27: Ubicación espacial de establecimientos mineros en sub zona norte.

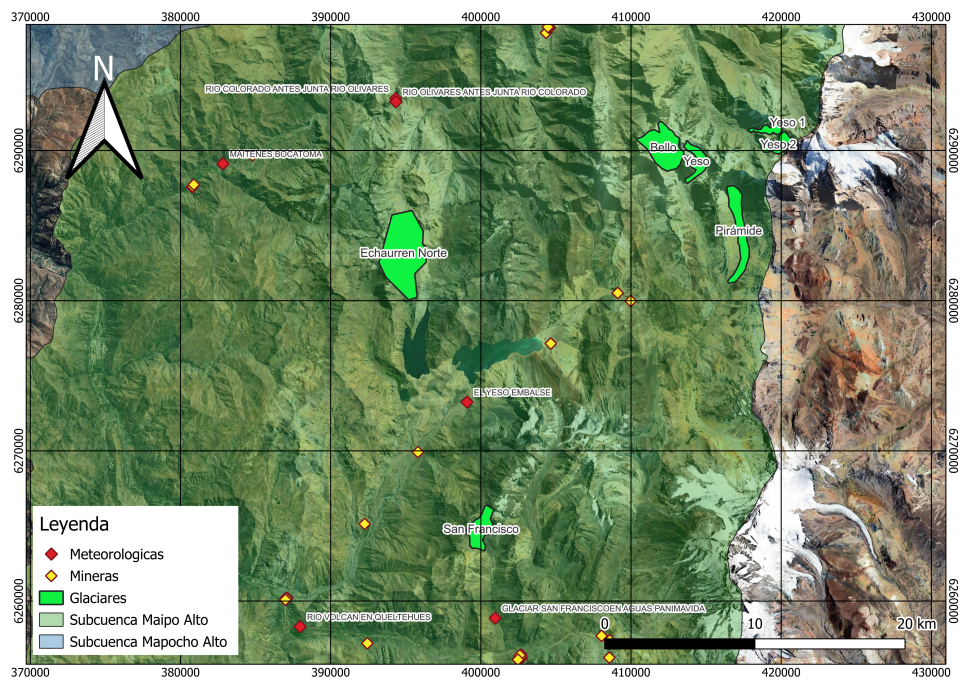


Figura 28: Ubicación espacial de establecimientos mineros en sub zona centro.

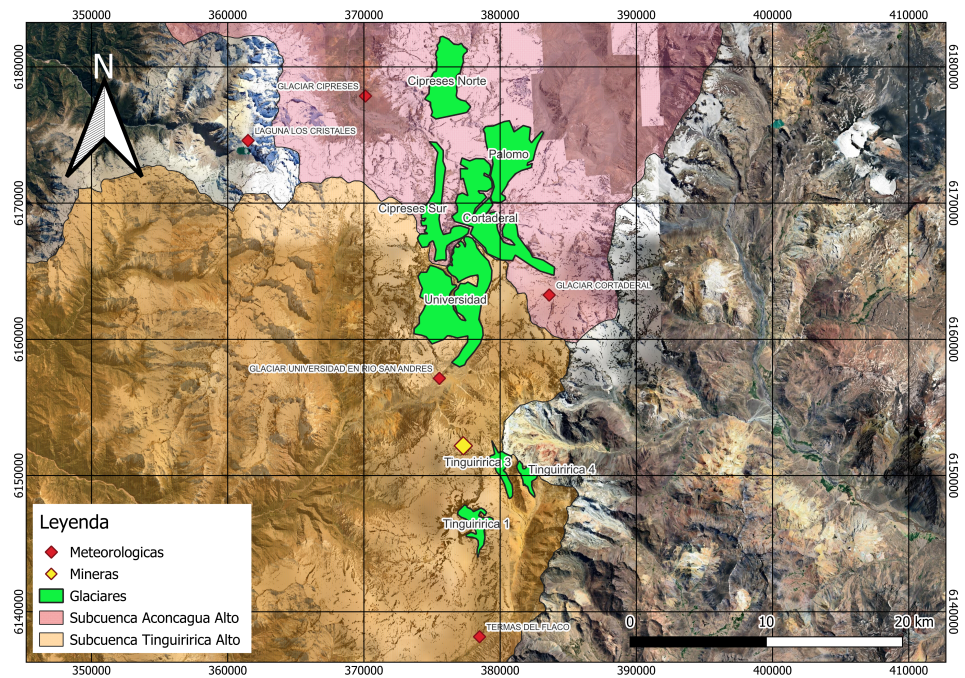


Figura 29: Ubicación espacial de establecimientos mineros en sub zona sur.

De los mapas expuestos en las Figuras 28, 27 y 29 es posible evidenciar la estrecha proximidad entre varios glaciares y las instalaciones mineras en las cuencas de estudio. Esta cercanía constituye un factor relevante para interpretar la disminución observada en los valores de albedo, ya que la actividad minera genera emisiones de polvo mineral y partículas absorbentes de luz (principalmente Black Carbon), que al depositarse sobre la nieve y el hielo reducen la reflectancia superficial e intensifican la absorción de radiación solar. Este proceso ha sido documentado en la Memoria de Nicholas Parker (2023), donde se demostró que la deposición de contaminantes particulados puede explicar la pérdida de reflectancia en glaciares de la zona central. Además, en el estudio específico sobre Olivares–Juncal, se constató que glaciares como el conjunto Olivares y el glaciar Paloma Norte presentan altas concentraciones de impurezas y descensos acelerados de albedo en comparación con otros de la misma subzona (Fariás-Barahona et al., 2020). Por otra parte, la tesis de Felipe Gómez (2022) refuerza esta conclusión al mostrar cómo glaciares como Paloma y el conjunto Olivares han incrementado sus superficies con hielo cubierto por detritos en paralelo a la reducción del albedo registrada en este estudio.

Cabe destacar que, dentro del análisis es posible evidenciar que los glaciares mayormente expuestos a contaminantes externos son los ubicados en la sub zona norte 27, debido a la proximidad de los cuerpos de hielo con la actividad minera de Los Bronces Integrado, la cual abarca una zona amplia en el sector trabajado y corresponde al sector donde se presentan mayores variaciones de albedo y tendencia negativa dentro del análisis previo realizado. Por otro lado, en la cuenca del Maipo, cercana a los glaciares Echaurren Norte, Pirámide, San Francisco y Bello, se ubican los proyectos La Perla y El Rubí, asociados a la explotación de yeso, y el proyecto Escalones III, ubicado en el fundo Cruz de Piedra entre los 2.900 y 4.200 msnm, que se inserta en el área de influencia de los glaciares de alta montaña como Yeso y Plomo, lo que explica la tendencia a la baja de los glaciares trabajados en esta zona. Finalmente, en el caso de los glaciares de la sub zona sur, no se encontraron referencias específicas a faenas mineras de gran escala en las proximidades inmediatas de los glaciares del sector. La dinámica de reducción de albedo observada en estos glaciares parece estar dominada por factores climáticos, principalmente la disminución de la precipitación nival durante la sequía en Chile y por procesos locales asociados a su altitud y morfología, más que por la influencia directa de actividades extractivas. Sin embargo, no puede descartarse la existencia de concesiones menores de prospección minera (Figura 29) o la influencia indirecta de emisiones atmosféricas provenientes de otras faenas en la zona central.

## 7. Conclusión y comentarios

El presente estudio permitió evaluar de manera integrada los cambios interanuales de los 25 grandes glaciares de la zona central, ubicados entre las latitudes 32°-36°S, dentro del periodo 2000-2022, derivando y combinando mediciones satelitales Landsat con registros in situ (EMAM) de 5 glaciares piloto que sirvieron para respaldar y validar las mediciones realizadas vía remota.

Dentro de la validación de albedo determinada en el primer objetivo del presente estudio se determinó un patrón regional claro de reducción de albedo, además de una alta correspondencia entre los valores obtenidos de las EMAM y los registros de Landsat a modo general, Figura 8. Dicha correspondencia entre ambos métodos fue validada mediante la correlación de Spearman (contrastada con correlación de Pearson), para los valores totales de todos los glaciares como para cada glaciar en particular, en donde la gran mayoría de los glaciares superaron el  $\rho = 0,8$  y resultaron estadísticamente significativos. Esta concordancia demuestra que las observaciones satelitales constituyen una aproximación robusta y fiable de la realidad de cada glaciar, registrando valores consistentes de las tendencias y variaciones interanuales de cada uno en terreno. Sin embargo, como se mencionó en el acápite 6.1, es importante señalar que en glaciares como Echaurren Norte, Bello Alto y Yeso no se cuenta con una cantidad de registros de EMAM completa, lo que limita la densidad temporal de datos y reduce la certeza de las correlaciones obtenidas en estos glaciares. A pesar de esto último, al considerar el análisis de manera global, es decir, integrando todas las mediciones de las EMAM y los valores satelitales de todos los glaciares para todos los años disponibles, se confirma que Landsat ofrece una buena aproximación de la variabilidad del albedo en el sector trabajado.

Como recomendación, se sugiere implementar una campaña de mediciones in situ (instalaciones de EMAM) más amplia y sostenida en el tiempo, aumentando la mediciones a un mayor número de glaciares de distintas subzonas y aumentando la frecuencia de observaciones y revisión del equipo dispuesto. Esto permitiría mejorar la densidad de los datos de calibración, reducir las incertidumbres asociadas a glaciares con registros incompletos y validar de manera más robusta la aproximación satelital para representar la reflectancia glaciar a escala regional.

En cuanto a los valores obtenidos de las tendencias de albedo para los 25 grandes glaciares, como se mencionó anteriormente, se evidencia una tendencia de reducción de albedo con pendientes negativas estadísticamente significativas, que van desde los  $\approx -0,02$  y  $\approx -0,09$  por década en la mayoría de los glaciares. Dicha disminución refleja una baja en la cobertura

nival y/o una temprana desaparición de la nieve invernal en época estival, donde se ligan factores adicionales de mayor exposición de hielo oscuro y detritos, procesos que generan una mayor absorción de la radiación solar y, por ende, un mayor derretimiento de los glaciares. El análisis realizado por sub zonas permitió constatar diferencias relevantes entre cada una. En la sub zona norte es posible evidenciar una mayor caída de albedo debido a que se presentan glaciares caracterizados por ser de hielo limpio como el Juncal Norte, Esmeralda y Plomo, debido a que se caracterizan por mostrar una fuerte dependencia de la acumulación nival, mientras que glaciares como Paloma y el conjunto Olivares, si bien se clasifican como de hielo limpio, presentan un incremento de la superficie cubierta por detritos en verano, lo que explica sus bajos valores de albedo estival. En la subzona centro, los glaciares de menor altitud como el Echaurren Norte, San Francisco y Pirámide presentan coberturas considerables de detritos, lo que se traduce en albedos reducidos y en descensos abruptos de reflectancia durante los años más secos, confirmando su alta vulnerabilidad a la sequía registrada a partir del 2010. Finalmente, en la subzona sur, glaciares como Universidad, Cipreses y Palomo presentan una recuperación parcial tras el año 2015, aunque sin volver a los niveles iniciales, mientras que glaciares con mayor complejidad superficial como Tinguiririca y Cortaderal mantienen los menores valores de albedo con variaciones dentro de los últimos años.

Adicionalmente, del análisis espacial de la ubicación de faenas mineras extraído del Sernageomin figura 28, 27 y 29, se evidencia que una cantidad considerable de glaciares de la subzona norte y centro se encuentran bajo la influencia de la actividad de extracción de material de estas faenas, siendo la minera Los Bronces Integrado la más grande situada en la subzona norte, seguida de las mineras La Perla y El Rubí, las que le siguen en la subzona centro. En dichas zonas, el depósito de polvo y black carbon actúa como un factor adicional que acelera la pérdida de reflectancia de los glaciares. Este efecto ha sido documentado en la tesis de Felipe Gómez (2022), señalando que en glaciares como la Paloma y el conjunto Olivares presentan un mayor oscurecimiento y un incremento en la cobertura de detritos, reforzando la hipótesis de una interacción entre forzantes climáticos y antropogénicos en la degradación glaciar.

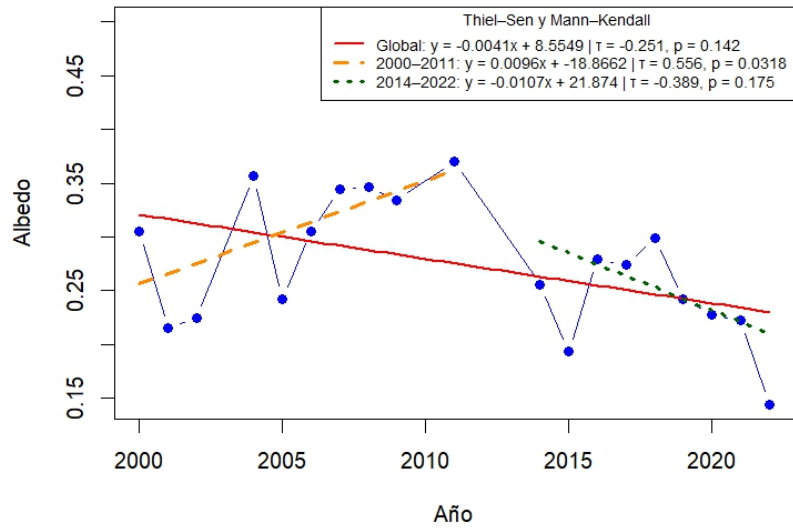
La comparación de los registros de precipitación invernal confirma la relación directa entre la acumulación de nieve con la reflectancia estival de los glaciares, confirmando el albedo como indicador de sensibilidad a la variabilidad climática, siendo en ese sentido la sequía registrada en Chile a partir de 2010 la principal forzante de disminución observada, coincidiendo con lo evidenciado por Shaw et al. (2020) y Farías-Barahona et al. (2020) y, en consecuencia, lo documentado en la tesis de Gómez (2022)

## 8. Bibliografía

- Alley, R., Clark, P. U., Huybrechts, P., & Joughin, I. (1997). Ice-sheet and sea-level changes. *Science*, 310(5747), 456–460.
- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., & McPhee, J. (2019). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, semiarid Andes of Chile. *The Cryosphere*, 13, 2003–2022.
- Barcaza, G., Nussbaumer, S., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75), 166–180.
- Benn, D. I., & Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and Glaciation* (2nd ed.). Hodder Education, London.
- Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The Physics of Glaciers* (4th ed.). Academic Press.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2009). *Glaciares de Chile: Antecedentes básicos para su gestión*. Ministerio de Obras Públicas, Santiago.
- Dirección General de Aeronáutica Civil <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., et al. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12, 802–808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., & López, D. (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude Andean watersheds. *Hydrological Processes*, 23, 466–475.
- Farías-Barahona, D., Shaw, T. E., McPhee, J., et al. (2020). Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986–2020. *Journal of Glaciology*, 66(260), 1–14.
- Fundación Glaciares Chilenos. (s.f.). ¿Qué es un glaciar? <https://www.glaciareschilenos.org>
- Gómez, F. (2022). Cambios recientes en la superficie y balance de masa de glaciares en los Andes
- González, C., et al. (2019). Caracterización de la criósfera en Chile central y su rol hídrico. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 55, 45–62.

- Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V., 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sens. Environ.* 54, 127–140
- Haw, T. E., et al. (2020). Snow albedo feedback and the hydrological cycle in the Andes. *Journal of Climate*, 33(12), 5025–5045.
- Hooke, R. L. (2005). *Principles of Glacier Mechanics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Kipp & Zonen. (s.f.). *Manual técnico del radiómetro neto CNR4*. Delft, Países Bajos.
- Liang, S. (2003). A direct algorithm for estimating land surface broadband albedos from MODIS imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(1), 136–145.
- Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., & Tagesson, T. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240–252. [https://doi.org/10,1016/j.rse,2018,02,072](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072)
- Martínez Ortega, A., et al. (2009). Análisis de correlación estadística en series hidrometeorológicas. *Revista de Climatología*, 9, 1–15.
- Mernild, S. H., et al. (2015). Mass balance and runoff modelling for selected glaciers in the Andes. *The Cryosphere*, 9, 1885–1902.
- Ming, J., et al. (2015). Black carbon and its effect on the albedo of glaciers in the Tibetan Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 12895–12907.
- Rivera, A., Casassa, G., Bown, F., & Rodríguez, J. L. (2000). Cambio climático y su influencia en los glaciares de Chile. *Revista de la Asociación Geológica de Argentina*, 55, 495–502.
- Shaw, T. E., Ulloa, G., Farías-Barahona, D., Fernandez, R., Lattus, J. M., & McPhee, J. (2020). Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986–2020. *Journal of Glaciology*, 66(260), 1–14.
- Tohsing, K., et al. (2023). Advances in net radiation measurements using radiometers. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 3001–3020.
- United States Geological Survey (USGS). (2022). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat>

## 9. ANEXO 1



*Figura 30:* Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Monos de Agua.

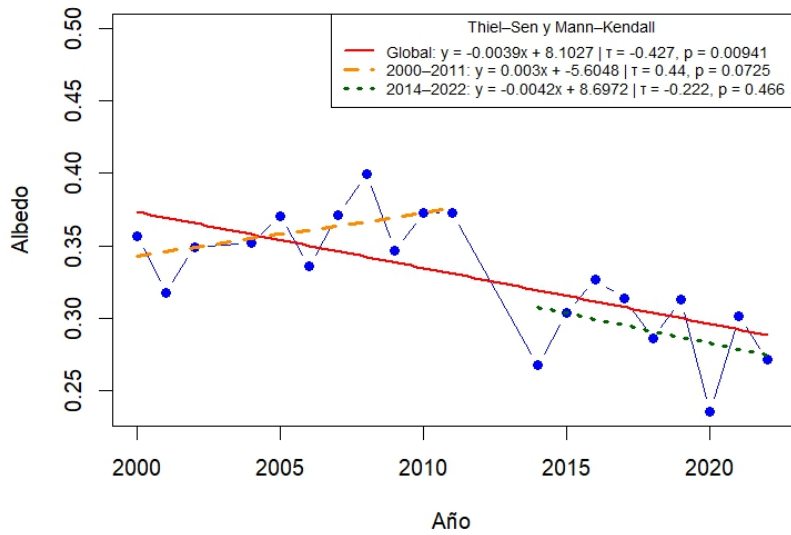


Figura 31: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Juncal Norte.

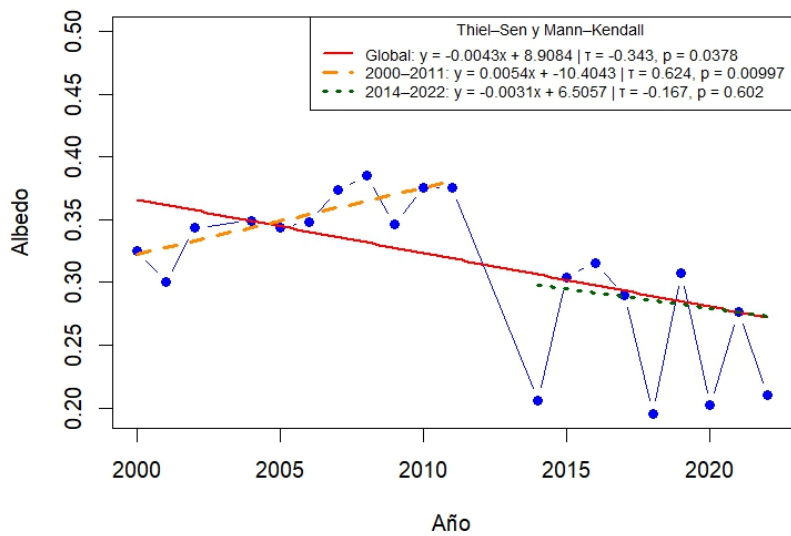


Figura 32: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Juncal Sur.

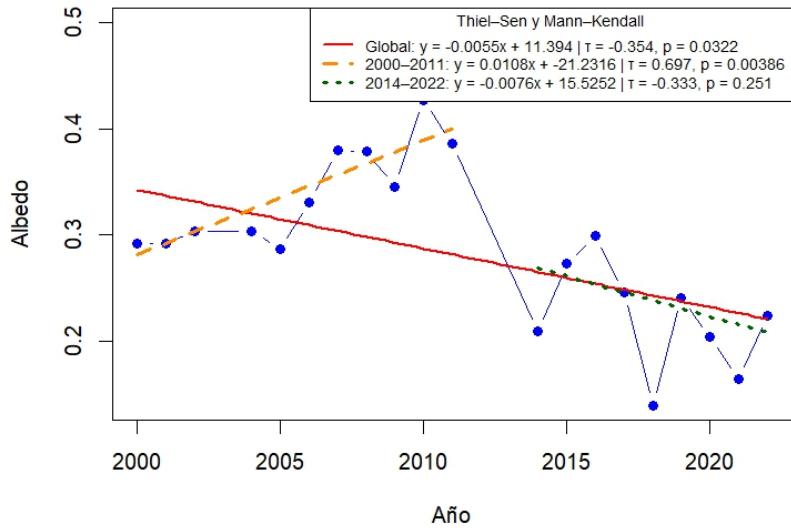


Figura 33: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Olivares Beta.

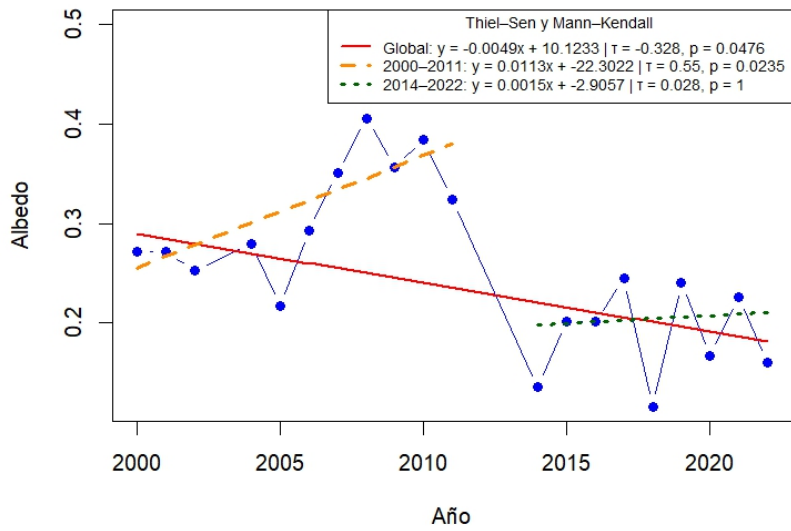


Figura 34: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Rincón.

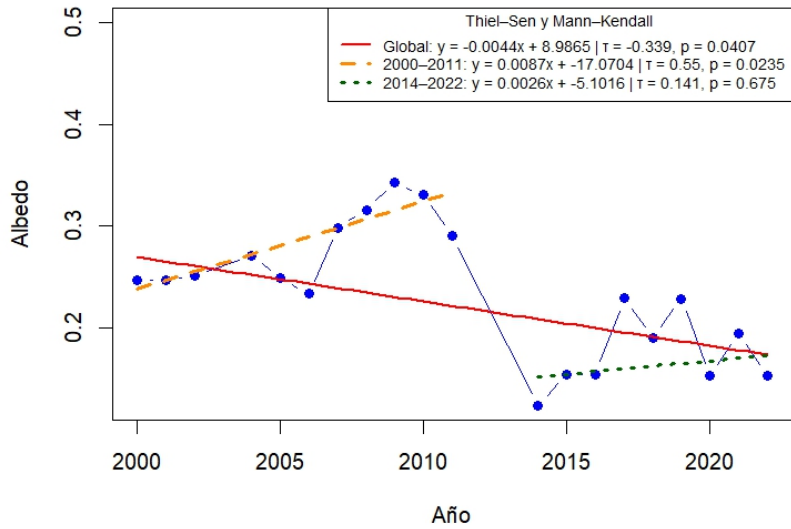


Figura 35: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Paloma.

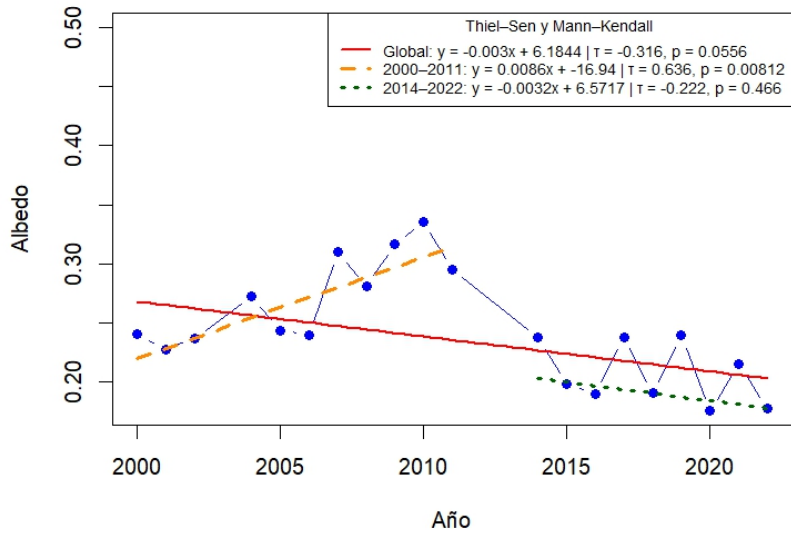


Figura 36: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Plomo.

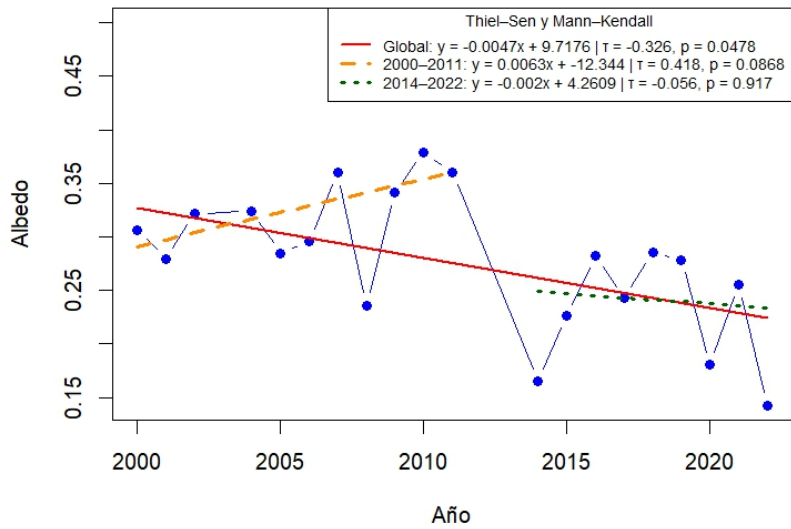


Figura 37: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Bello.

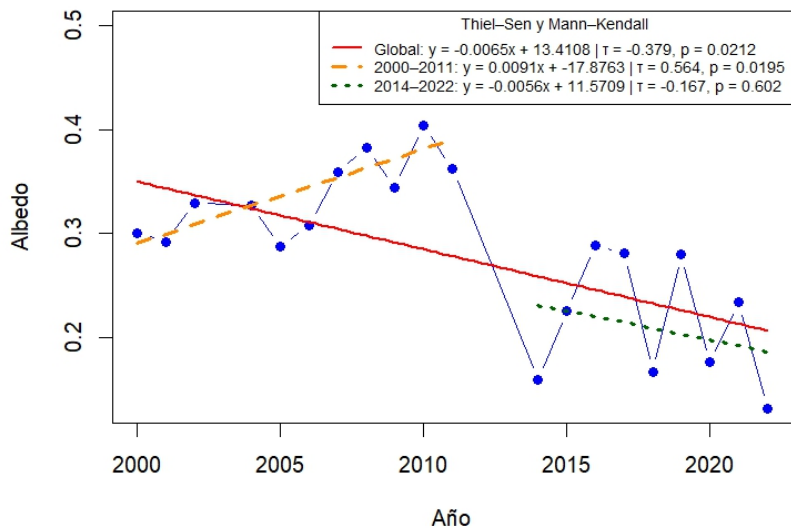


Figura 38: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Yeso.

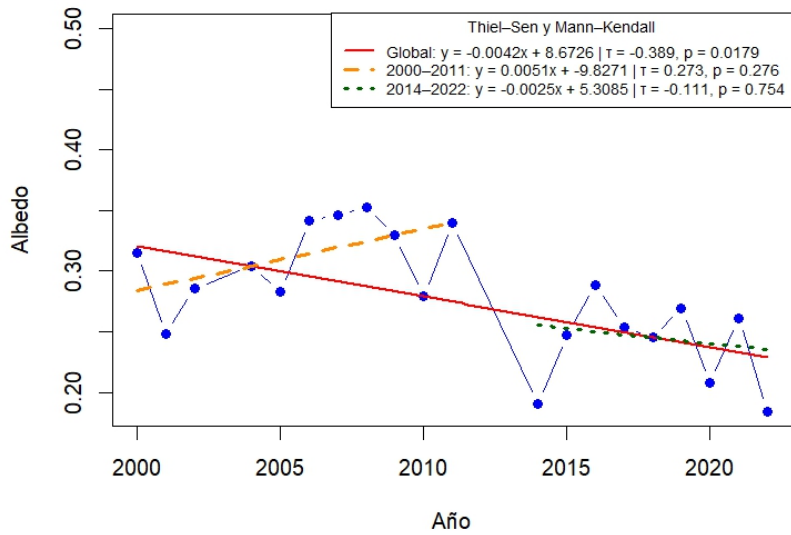


Figura 39: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Yeso 2.

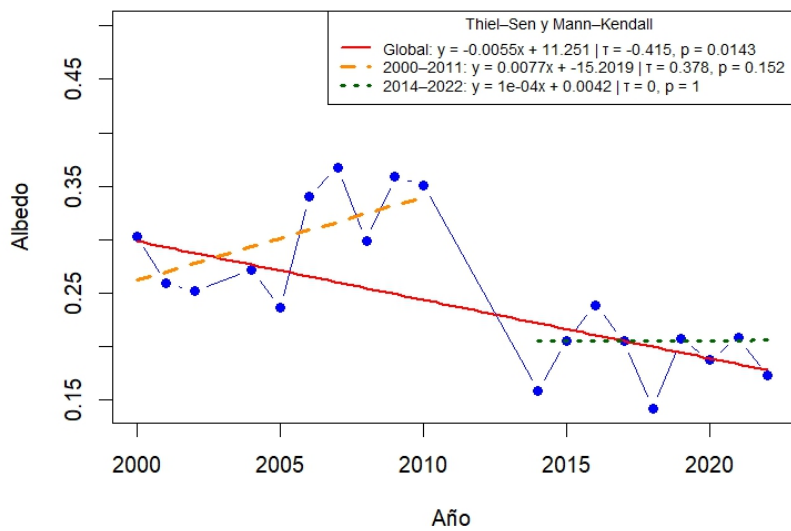


Figura 40: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Echaurren Norte.

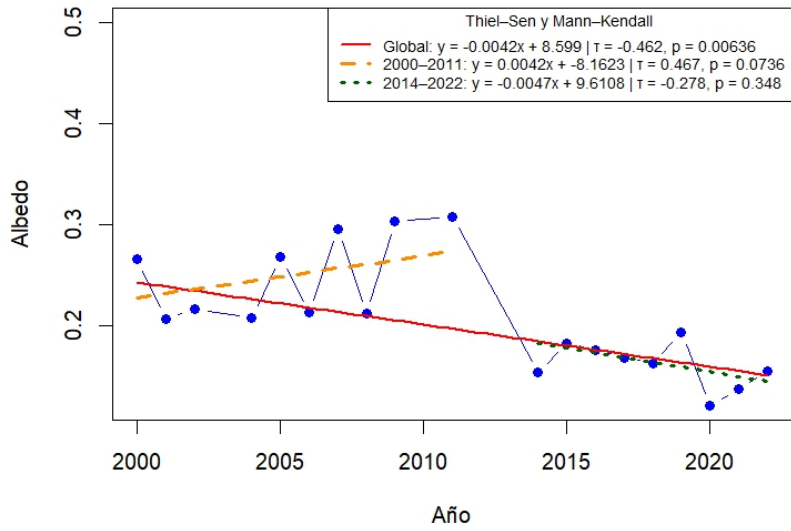


Figura 41: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar San Francisco.

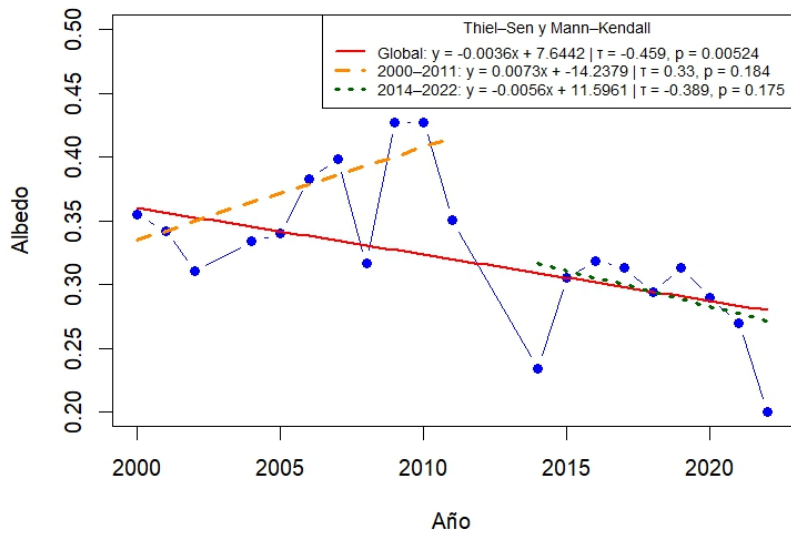


Figura 42: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Palomo.

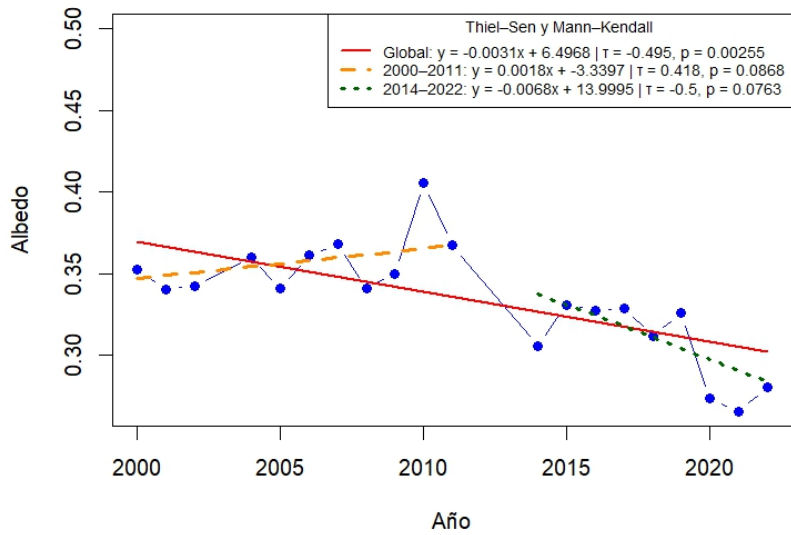


Figura 43: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Cypreses Norte.

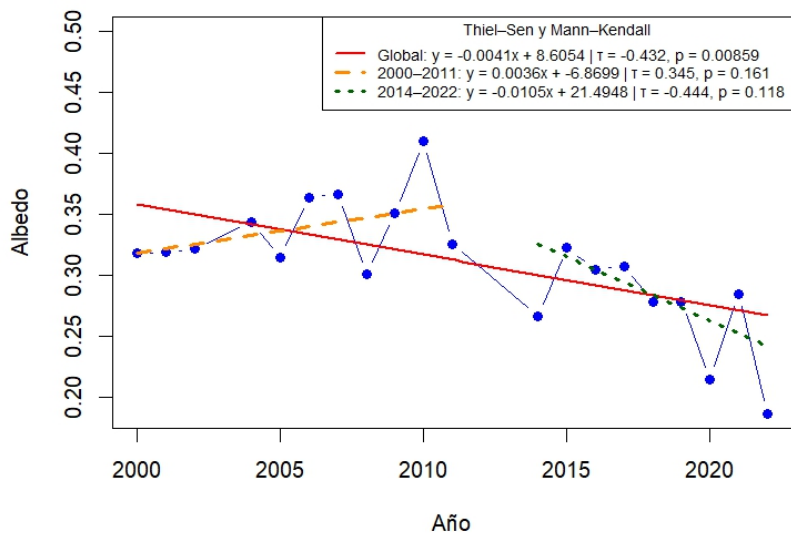


Figura 44: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Cypreses Sur.

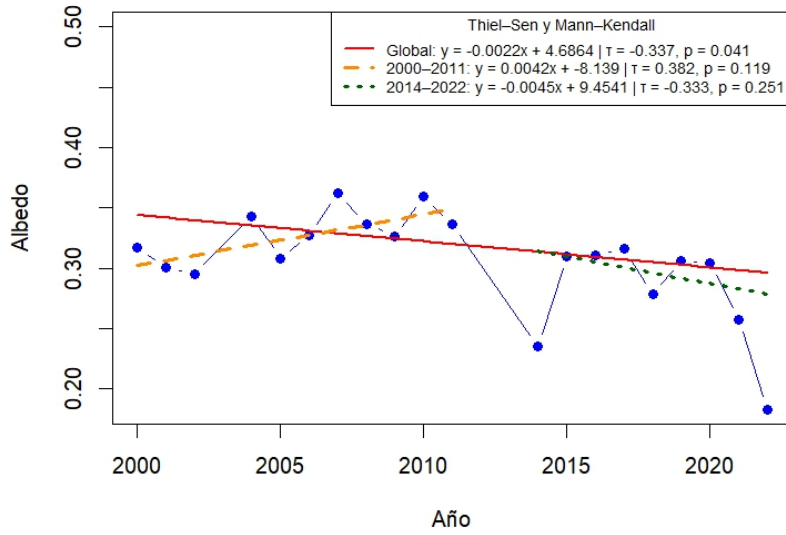


Figura 45: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Cortaderal.

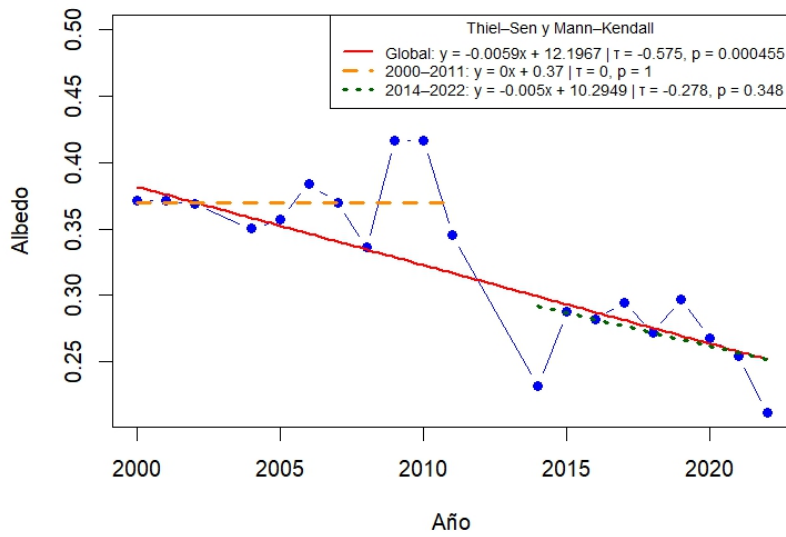


Figura 46: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Universidad.

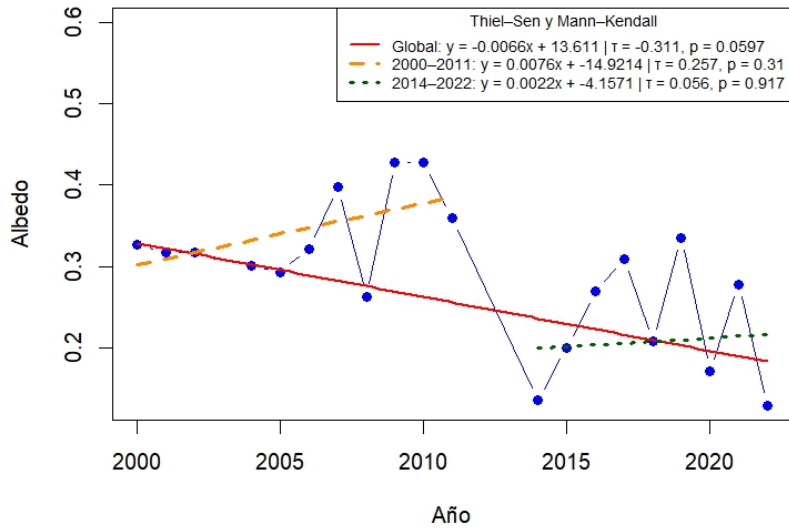


Figura 47: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Tinguiririca 1.

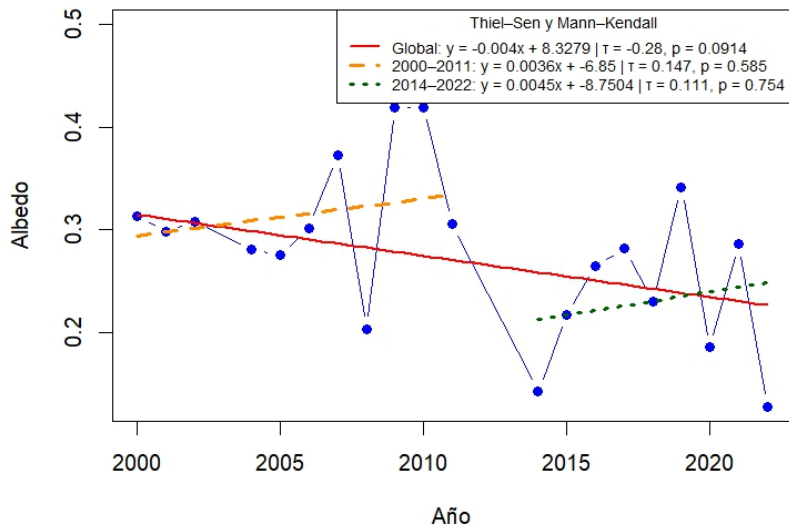


Figura 48: Resultado test Mann-Kendall y pendiente de Thiel-Sen para el glaciar Tinguiririca 4.