



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
Departamento de Obras Civiles

ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE NIEVE EN LA ZONA CENTRO Y CENTRO SUR DE CHILE MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

Memoria de Título presentada por

GONZALO ANDRÉS FIGUEROA DIÉGUEZ

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil en Obras Civiles

Profesor Guía
Ph.Dr. Lina Mabel Castro Heredia

Agosto 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: Estimación de la profundidad de nieve en la zona centro y centro sur de Chile mediante imágenes satelitales.

Nombre del candidato(a): Gonzalo Andrés Figueroa Diéguez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil en Obras Civiles

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Lina Mabel Castro Heredia, 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

☒ 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:

☐ 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: 1-0G-2025

; Firma:

Lina Mabel Castro H

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 1-09-2025

; Firma:

Gonzalo

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.

Resumen

En Chile el monitoreo de la cobertura nival es complejo debido a la baja densidad de estaciones nivometeorológicas en zonas de montaña, a tal magnitud que sólo se tienen 17 estaciones registradas por la DGA a lo largo de toda la cordillera de los Andes que son capaces de medir la profundidad de nieve. Es por esto por lo que, se requieren nuevas herramientas de observación, como la teledetección satelital, para ampliar la cobertura del monitoreo nival. En este estudio se estimó la profundidad de la nieve en la cordillera de los Andes chilena mediante imágenes Sentinel-2, calculando la fracción superficial cubierta de nieve (FSC) a partir de la reflectancia de la banda (B4) y aplicando una adaptación del método de (Romanov & Tarpley, 2004) para determinar la reflectancia característica de suelo descubierto ($R_{4_{land}}$) y de nieve pura ($R_{4_{snow}}$). Además, se aplicaron filtros para descartar píxeles afectados por sombras, nubes o baja calidad espectral, y se excluyeron valores de profundidad extrema (< 10 cm y > 100 cm). Las estimaciones resultantes se compararon con datos de cuatro estaciones nivometeorológicas de referencia (Portillo, Laguna Negra, Termas del Flaco y El Soldado). Los resultados muestran un error medio absoluto (MAE) entre 12,53 y 27,84 cm, y un porcentaje de error absoluto medio (MAPE) entre 29,26 % y 88,53 %. Las mejores estimaciones se obtuvieron en las estaciones de Termas del Flaco y Laguna Negra, con MAPE inferiores al 40 %, demostrando la potencialidad del método propuesto para extender el monitoreo de la nieve en áreas cordilleranas.

Contenido

1	Introducción.....	4
2	Objetivos.	5
	Objetivo General.	5
	Objetivos Específicos:.....	5
3	Zona de estudio y Base de datos.....	5
3.1	Zona de Estudio.	5
3.2	Base de datos.....	9
3.2.1	Estaciones nivometeorológicas.....	9
3.2.2	Sensores remotos.	10
4	Metodología.....	11
4.1	Filtrado y selección de imágenes.	12
4.2	Cálculo del NDSI y clasificación espectral.....	13
4.3	Calcular la Fracción superficial cubierta de nieve (FSC) del píxel ubicado en cada estación nivométrica, mediante Sentinel-2.....	13
4.4	Desarrollar una relación entre FSC y la profundidad de nieve.	14
4.5	Validar ecuación obtenida (OE2) con datos independientes.....	14
5	Resultados y Discusión.	14
5.1	Filtrado y cálculo del FSC.	14
5.2	Relación FSC y profundidad de nieve medida in situ.....	16
5.3	Validación y evaluación de las ecuaciones del OE2.....	17
6	Conclusión.....	19
7	Agradecimientos.....	21
8	Anexo.	22
9	Referencias.....	23

1 Introducción.

El agua es un recurso esencial para la vida, el desarrollo económico y social, así como para la conservación de los ecosistemas a nivel global (Daudt et al., 2023). En particular, en regiones montañosas de bajas temperaturas, la nieve actúa como un reservorio natural fundamental. La acumulación nival durante el invierno se convierte en una fuente hídrica crucial durante los períodos secos, llegando a satisfacer las necesidades de agua potable, agricultura y generación de energía de más de la mitad de la población mundial (Debarbieux & Price, 2012).

En Chile, el 60% de la población se concentra en la zona central del país, caracterizada por un clima mediterráneo con inviernos húmedos y veranos (BCN, 2017). En la última década, esta región ha experimentado una disminución preocupante de las precipitaciones anuales. Un ejemplo es la ciudad de Santiago, donde en 2019 se registraron solo 82 mm de lluvia, un valor significativamente inferior al promedio histórico de 286,3 mm (CR2, 2023). Esta situación ha aumentado la dependencia del agua proveniente del deshielo nival, recurso que actualmente aporta alrededor del 60% del caudal superficial en las cuencas del centro-sur de Chile (Ayala et al., 2020). Sin embargo, los efectos del cambio climático han alterado notablemente la dinámica del ciclo hidrológico y la disponibilidad hídrica en estas áreas, afectando el almacenamiento en embalses, el riego agrícola y la generación hidroeléctrica (Lievens et al., 2019). En este contexto, el monitoreo de la profundidad de nieve es fundamental para gestionar adecuadamente los recursos hídricos (Fassnacht et al., 2018) y comprender las variaciones en los procesos hidrológicos de cuencas nivales (Lievens et al., 2022). (Ayala et al., 2020)

La necesidad crítica de monitorear parámetros meteorológicos en Chile ha llevado a la instalación de alrededor de 740 estaciones a lo largo del país. Sin embargo, solo 17 de ellas miden parámetros nivales específicos como la profundidad de la nieve (DGA, 2024). Esta escasez de estaciones limita considerablemente la cobertura espacial y temporal de los registros de profundidad de nieve. Además, el monitoreo de la profundidad de nieve se complementa con mediciones en terreno, por lo que no se garantiza un monitoreo continuo en el tiempo. Esto dificulta la gestión y planificación hídrica regional, ya que impide seguir eficazmente la evolución espacio-temporal de la nieve y evaluar su sensibilidad al cambio climático (Fassnacht et al., 2018). Por lo tanto, la falta de un monitoreo preciso, continuo y de amplia cobertura espacial obstaculiza la comprensión de los cambios hidrológicos en las zonas montañosas (Lievens et al., 2022).

Diversos estudios han explorado métodos de teledetección para monitorear de forma continua la profundidad de nieve con amplia cobertura espacial (Daudt et al., 2023; Shaw et al., 2020; Romanov & Tarpley, 2007). Varias de estas investigaciones han empleado imágenes satelitales tanto de sensores pasivos como activos. (Romanov & Tarpley, 2007) desarrolló un algoritmo que emplea imágenes del satélite GOES (sensor pasivo) para estimar la profundidad de nieve en zonas con y sin cobertura forestal en América del Norte. Su método calcula la Fracción de Superficie Cubierta de Nieve (FSC) mediante una clasificación espectral de cada píxel (distinguiendo entre “superficie con nieve” y “superficie desnuda”), y luego compara esos valores con mediciones de profundidad de nieve en estaciones nivometeorológicas. Finalmente, establece una relación matemática entre la FSC y la profundidad de nieve en cada píxel. (Romanov & Tarpley, 2007) reportaron que sus estimaciones de profundidad de nieve presentaron un error de ~30% para profundidades inferiores a 30 cm, error que aumentaba a ~50% para profundidades entre 30 y 50 cm.

(Shaw et al., 2020) generó mapas de profundidad de nieve para la cuenca del río Yeso para las estaciones de invierno del año 2017 y 2019, en la zona semiárida de los Andes centrales. Este estudio empleó imágenes satelitales Pléiades (sensor pasivo), para luego aplicar fotogrametría triestereoscópica sobre dichas imágenes para derivar mapas de la profundidad de nieve, los cuales se compararon con un escaneo LiDAR terrestre (sensor activo) de la profundidad de nieve. Tras la comparación, se corrigieron las estimaciones derivadas de Pléiades, obteniéndose un valor promedio de profundidad de nieve de 1,66 m para la cuenca del río Yeso, con un error estimado de 0,36 m.

Esta memoria propone una solución al problema de que, en Chile, la profundidad de nieve es un parámetro nival, el cual no es monitoreado continuamente en el tiempo y además es medido de manera discontinua a lo largo de la cordillera de los Andes. Esta solución se basa en la teledetección pasiva utilizando imágenes del satélite Sentinel-2. Dicho sensor se caracteriza por su alta resolución espacial

(10 - 20 m), su alta frecuencia de adquisición (imágenes cada cinco días combinando ambos satélites) y su disponibilidad gratuita. Estas características permiten un monitoreo de la nieve más detallado, continuo y de amplia cobertura. El objetivo principal del estudio es desarrollar y validar una metodología confiable y replicable para estimar la profundidad de nieve en la zona centro-sur de Chile, mediante la relación entre la Fracción de Superficie Cubierta de Nieve (FSC) derivada de Sentinel-2 y los registros in situ de estaciones nivometeorológicas siguiendo la metodología planteada por (Romanov & Tarpley, 2007).

2 Objetivos.

Objetivo General.

Estimar la profundidad de nieve empleando sensores remotos pasivos en puntos de monitoreo nival de la cordillera central durante las temporadas de invierno para los años 2019 y 2024, mediante la fracción de superficie cubierta de nieve (FSC) aplicando la metodología de (Romanov et al., 2003).

Objetivos Específicos:

- OE1: Calcular la fracción superficial cubierta de nieve (FSC) del píxel donde se ubica cada estación nivometeorológica mediante imágenes Sentinel-2, durante las temporadas de invierno para el período [2020-2023].
- OE2: Desarrollar una ecuación que relacione la fracción superficial cubierta de nieve obtenida mediante Sentinel-2, con la profundidad de nieve medida en terreno para cada estación nivometeorológica estudiada.
- OE3: Validar y evaluar la profundidad de nieve obtenida para los años 2019 y 2024, empleando las ecuaciones obtenidas en el OE2 para cada una de las estaciones nivometeorológicas.

3 Zona de estudio y Base de datos.

3.1 Zona de Estudio.

Este estudio se enfoca en obtener una relación entre la “Fracción Superficial Cubierta de Nieve” (FSC) y profundidad de nieve en las diferentes estaciones nivométricas de la zona centro y zona centro sur de Chile.

En la Zona Central de Chile se identifica un clima templado, donde las lluvias y nevazones tienden a concentrarse en los meses de invierno y las estaciones del año se encuentran bien marcadas y diferenciadas. Por otra parte, en la macrozona centro sur del país, se inicia una transición de climas más fríos y lluviosos (BCN, 2005). Es por estas razones que se seleccionó dichas zonas, ya que en las temporadas de invierno hay gran cantidad de nevazones y además la vegetación presente en estas zonas, principalmente arbustos bajos y xerófitos, facilita la detección satelital de la nieve, pues presenta escasa interferencia en la señal espectral captada por los sensores.

Entre la zona centro y centro-sur existen 17 estaciones nivometeorológicas, las cuales van desde los 3600 hasta los 1720 msnm. En la figura 1 se presenta recalculadas la zona centro y centro-sur de Chile y la distribución de todas las estaciones nivométricas del país. Mientras que en la tabla 1 se indica a que estación pertenece cada ID mostrado en el mapa. Las estaciones utilizadas en este estudio presentan profundidades de nieve entre los 80 y 300 cm de nieve desde 2015 hasta enero del 2025. La estación que presenta mayor profundidad de nieve es la de Termas del Flaco alcanzando un máximo de 300 centímetros en el invierno de 2024. Esto se debe a que es la única estación que alcanza a estar en la zona centro-sur de Chile, mientras que las demás utilizadas están ubicadas en la zona centro. Por el contrario, en El Soldado es donde se obtuvo la menor profundidad máxima en una temporada, la cual fue de 40 cm en el año 2021. En la figura 2 y 3 podemos observar estas profundidades mencionadas, donde el eje X pertenece al período en donde se registró la profundidad de nieve y el eje Y tiene los valores de profundidad de nieve medida en centímetros. Además, en el anexo se pueden observar los datos registrados para Portillo y Laguna Negra.

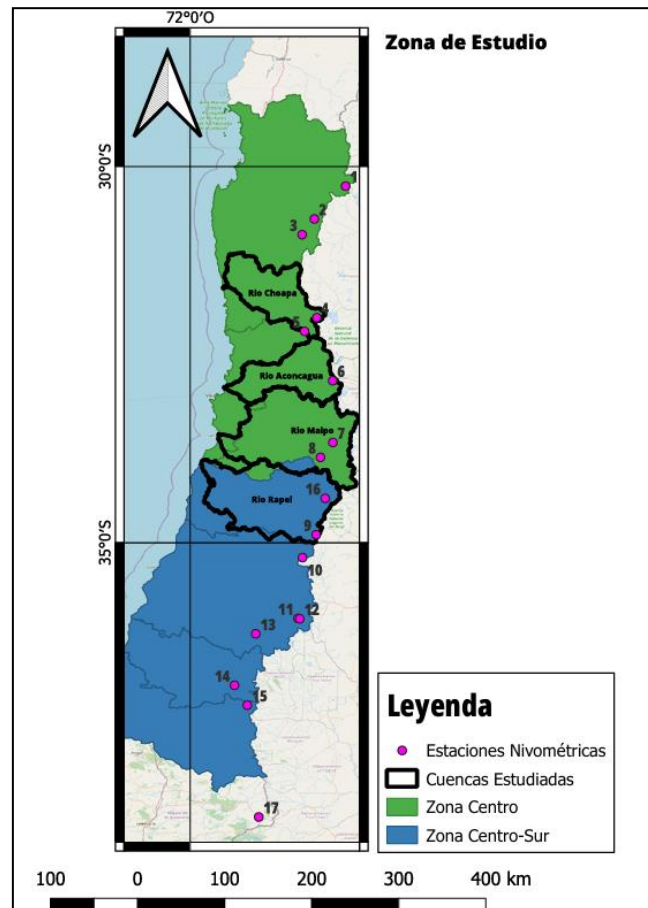


Figura 1: En esta figura se presenta la zona de estudio, la cual pertenece a la zona centro y centro-sur de Chile de color verde y azul respectivamente. De magenta se observan todas las estaciones nivométricas del país con su respectivo indicador. Recalcadas en negro se observan las cuencas abarcadas por nuestras estaciones utilizadas.

Tabla 1. Estaciones nivometeorológicas dentro de la zona de estudio, junto a su indicador.

ID	Estación nivométrica
1	Cerro Olivares
2	Quebrada Larga
3	Cerro Vega Negra
4	El Soldado
5	Nacimiento el Sob.
6	Portillo
7	Laguna Negra
8	Las Melosas
9	Termas del Flaco
10	Paso Vergara
11	Lo Aguirre
12	Los Condores
13	Nevados Longaví
14	Volcán Chillán

ID	Estación nivométrica
15	Alto Mallines
16	Laguna el Yeso
17	Liucura

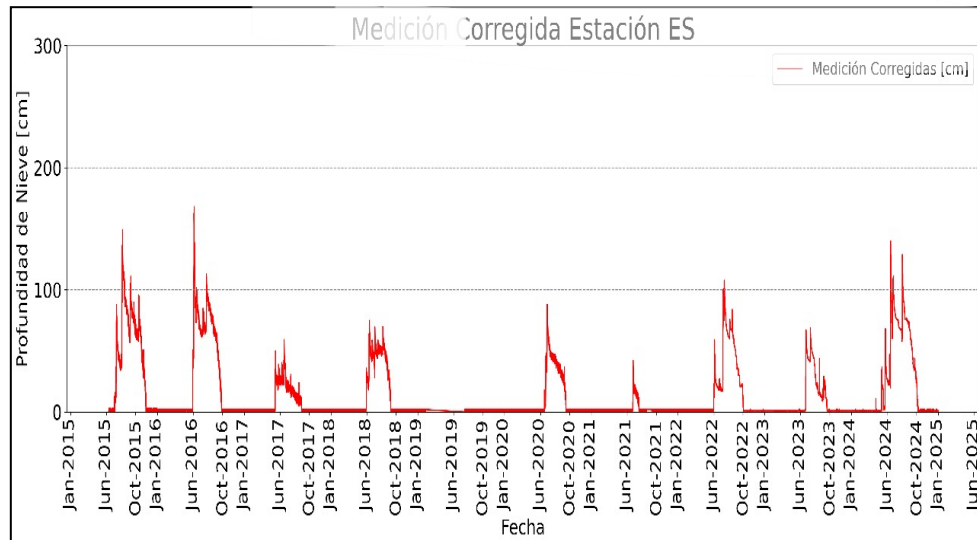


Figura 2: Registro de profundidades de nieve medidas por la DGA para la estación El Soldado en el período [2015-2024].

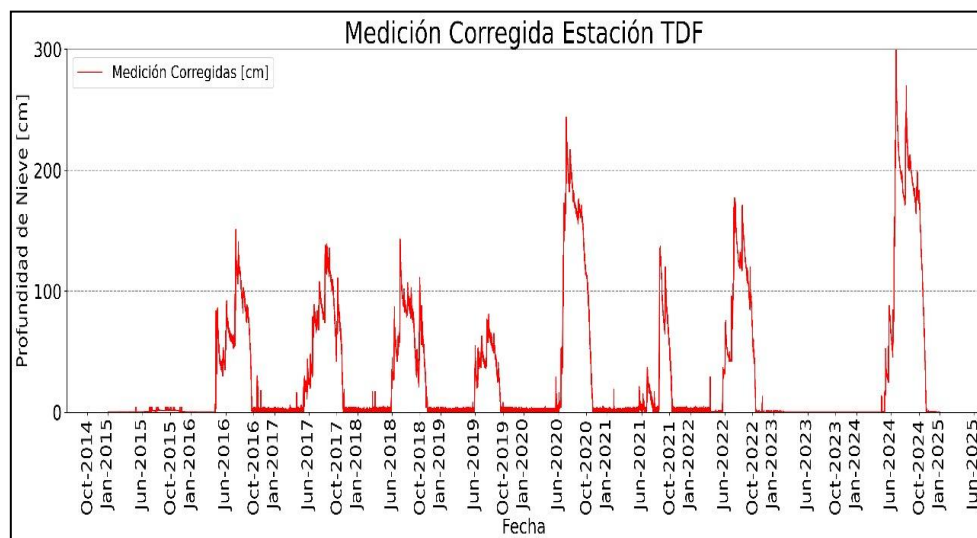


Figura 3: Registro de profundidades de nieve medidas por la DGA para la estación Termas Del Flaco en el período [2016-2024].

Por último, respecto a la zona de estudio, también hay que entender como se comporta en clima en nuestras cuencas. De esta manera se realizaron 4 climogramas uno para cada cuenca abarcada por las estaciones nivométricas a utilizar, Río Choapa, Río Aconcagua, Río Maipo y Río Rapel. Estos se pueden observar en las figuras 4, 5, 6 y 7 respectivamente, los cuales fueron extraídos de productos grillados CR2MET, donde se presenta la precipitación media mensual y temperatura media mensual en el período [1979 – 2020]. Las mayores precipitaciones mensuales en nuestras cuencas van desde los 70 mm hasta los 310 mm donde la cuenca con menores precipitaciones corresponde a Río Choapa, la cual es la

ubicada mas al norte entre todas las estaciones y por otra parte la cuenca con mayores precipitaciones fue en la cuenca Rio Rapel, siendo la única ubicada en la zona centro-sur. En términos de la temperatura, los valores medios en las temporadas de invierno van desde los -2°C hasta los 3°C . Idealmente para mantenerse la nieve en su estado y que no exista derretimiento la temperatura debe ser bajo 0°C . Sin embargo, este rango obtenido junto a otras condiciones, de igual manera puede mantener la nieve en su estado.

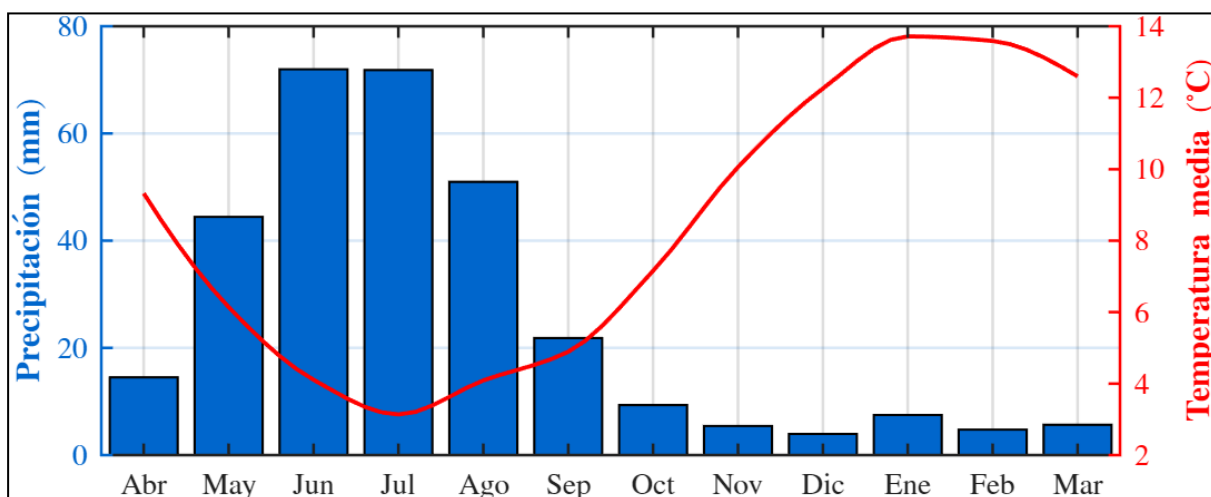


Figura 4: Climograma cuenca Rio Choapa 1979 - 2020. El eje Y izquierdo (barras azules) presentan la precipitación media mensual y el derecho (línea roja) presenta las temperaturas medias mensuales. El eje X presenta los meses del año.

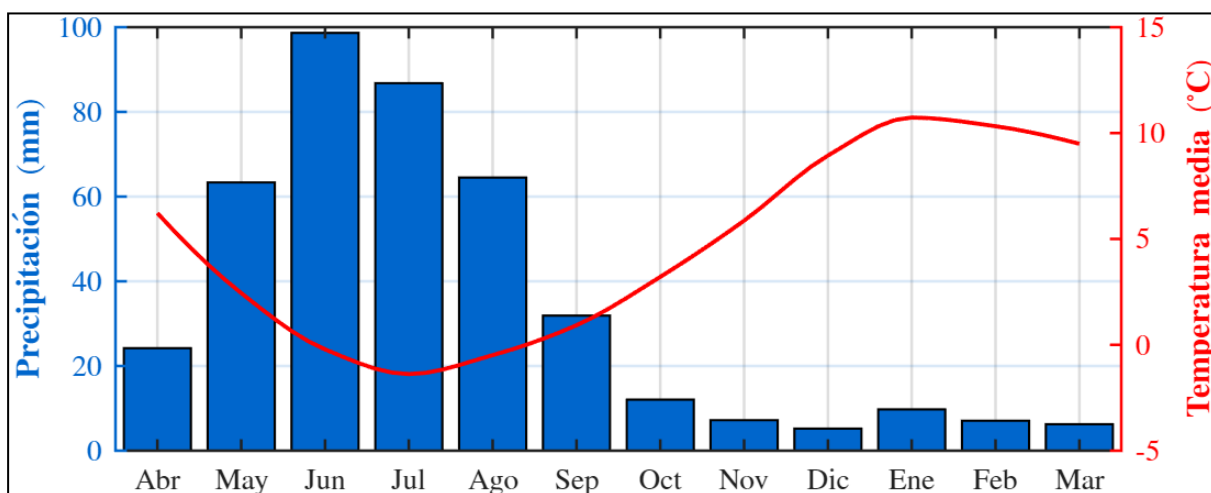


Figura 5: Climograma cuenca Rio Aconcagua 1979 - 2020. El eje Y izquierdo (barras azules) presentan la precipitación media mensual y el derecho (línea roja) presenta las temperaturas medias mensuales. El eje X presenta los meses del año.

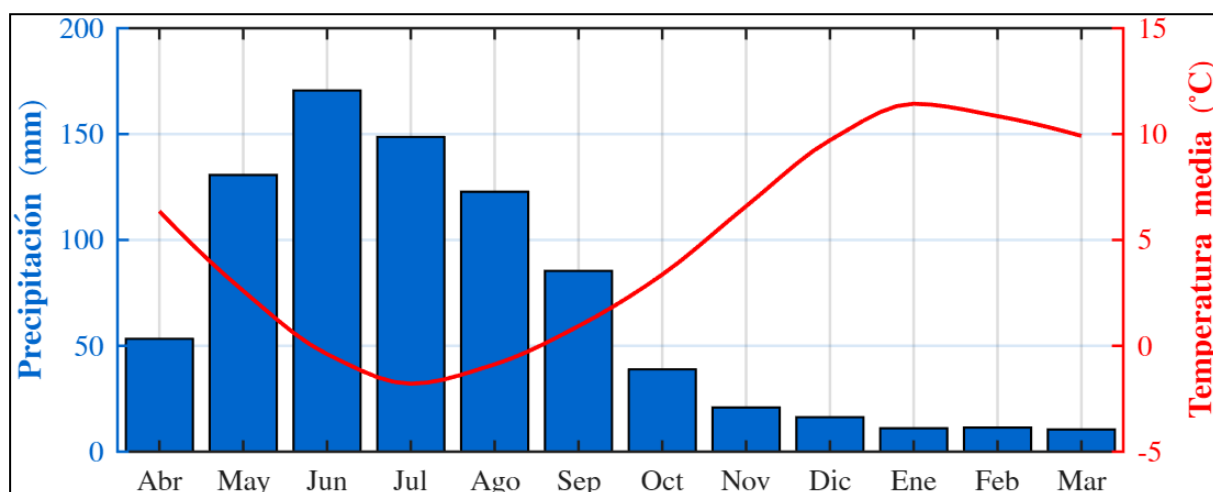


Figura 6: Climograma cuenca Río Maipo 1979 - 2020. El eje Y izquierdo (barras azules) presentan la precipitación media mensual y el derecho (línea roja) presenta las temperaturas medias mensuales. El eje X presenta los meses del año.

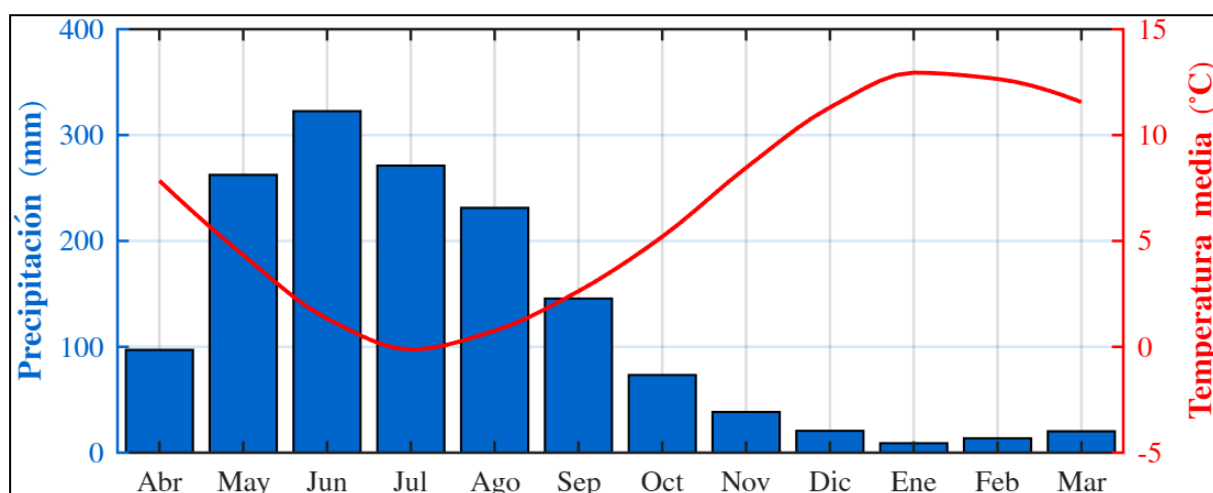


Figura 7: Climograma cuenca Río Rapel 1979 - 2020. El eje Y izquierdo (barras azules) presentan la precipitación media mensual y el derecho (línea roja) presenta las temperaturas medias mensuales. El eje X presenta los meses del año.

3.2 Base de datos.

Para llevar a cabo este estudio se emplearon principalmente dos fuentes de datos esenciales: las mediciones in situ de profundidad de nieve realizadas por la Dirección General de Aguas (DGA), y las imágenes satelitales obtenidas desde la plataforma Copernicus Browser y Google Earth Engine.

3.2.1 Estaciones nivometeorológicas.

En Chile existen diversas estaciones nivometeorológicas encargadas de medir parámetros meteorológicos y nivales tales como temperaturas extremas, humedad relativa del aire, precipitación, transporte eólico de nieve, y profundidad total del manto de nieve. La profundidad de nieve es medida principalmente mediante sensores láser de alta precisión (Sensores Laser Lufft SHM-30), en la figura 8 se puede ver una imagen de estos sensores. Estos dispositivos funcionan con tecnología láser de tiempo de recorrido, midiendo la distancia entre el sensor y la superficie nival, que posteriormente es comparada con una distancia base sin nieve, permitiendo calcular la profundidad del manto nivoso con una precisión de ± 5 mm y capaces de medir hasta 10 metros de profundidad de nieve. Además, deben recibir mantenimiento periódico y calibraciones regulares para asegurar la calidad y fiabilidad de los datos (Lufft, 2025).



Figura 8: Sensor de profundidad de nieve SHM-30 (Lufft, 2025).

Para este estudio, se seleccionaron 4 estaciones nivométricas de las 17 mostradas en la figura 1 dentro de las zonas de estudio. Se seleccionaron solo las estaciones de El Soldado (4), Portillo (6), Laguna Negra (7) y Termas del Flaco (9). Estas fueron consideradas principalmente por sus registros continuos de profundidades desde el año 2015 al 2024, también porque la vegetación alrededor de estas estaciones sigue siendo solo arbustos que no suelen afectar a la reflectancia satelital. Todas estas estaciones son administradas por la DGA y sus datos de profundidad de nieve fueron obtenidos mediante solicitudes amparadas por la Ley de Transparencia. En la tabla 2 se presenta las estaciones nivométricas utilizadas junto a su respectivo ID de la figura 1 y con sus descripciones, tales como código DGA, Lat/long, altura, frecuencia de medición, período de funcionamiento y cuenca abarcada.

Tabla 2. Estaciones nivométricas utilizadas con sus descripciones.

ID	Código	Estación nivométrica	Lat/Lon	Altura [msnm]	Frecuencia	Período	Cuenca
4	04700000-5	El Soldado	-32.00°/-70.19°	3200	Horaria	1969-2025	Río Choapa
6	05401007-9	Portillo	-32.50°/-70.07°	3000	Horaria	1951-2025	Río Aconcagua
7	05703009-7	Laguna Negra	-33.39°/-70.06°	2780	Horaria	1965-2025	Río Maipo
9	06020001-7	Termas del Flaco	-34.53°/-70.19°	2650	Horaria	2000-2025	Río Rapel

3.2.2 Sensores remotos.

Para estimar la “Fracción Superficial Cubierta de Nieve (FSC)”, este estudio utilizó datos de sensores remotos. Los sensores remotos son instrumentos utilizados para captar información de un objeto a distancia. Pueden medir múltiples variables, como temperatura, humedad, presión atmosférica, nivel de radiación, entre otros (Kogut, 2021). Existen dos tipos de sensores remotos los pasivos y activos, para este estudio se utilizará exclusivamente sensores remotos pasivos, los cuales no transmiten energía propia al objeto estudiado, sino estos detectan la energía proveniente de una fuente natural (Sol) reflejada por los diferentes objetos de la superficie terrestre (Kogut, 2021). Esta información puede ser procesada e interpretada mediante el uso de “Sistemas de Información Geográfica (SIG)” o lenguajes de programación como R o matlab, para tener una mejor comprensión de la superficie terrestre junto a sus respectivos cambios.

El sensor remoto utilizado en este estudio es Sentinel-2. Este es una misión proporcionada por dos satélites, “Sentinel 2A” y “Sentinel 2B”, estos satélites entraron en operación el 22 de junio del 2015 y 2017, es decir hay disponibilidad de imágenes desde esas fechas hasta la actualidad. Estos satélites son capaces de medir la reflectancia de múltiples combinaciones de bandas y cada una con una longitud de onda distinta. Estas imágenes se pueden obtener a una resolución de 10, 20 y 60 metros, con una

frecuencia de 10 días por cada satélite por separado, pero si se combinan se consigue una frecuencia de 5 días. La información de cada una de las bandas de este sensor remoto está descrita en la tabla 3, donde se muestra la longitud de onda y resolución de cada una de estas. La misión Sentinel-2 entrega producto de 13 bandas de longitud de onda, un mapa de clasificación de escenas “SCL”, imagen en color verdadero y una máscara de probabilidad de nube “MSK_CLDPB”. En este caso se extraerá exclusivamente las bandas B03, B04, B11, donde la banda 3 y 11 se utiliza para calcular el NDSI mientras que la banda 4 es utilizada para obtener el FSC. Además, será necesario el producto de clasificación de escenas (SCL) para tener un filtro inicial de nubes y sombras. Este producto de clasificación de escenas (SCL), es presentado en la tabla 4 donde se muestra el valor de cada parámetro y su respectiva descripción (CS team, 2024). La descarga de estas imágenes se realizó a través de Copernicus Browser y Google Earth Engine, específicamente desde el catálogo Image Collection (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED), cubriendo las temporadas invernales entre los años 2019 y 2024.

Tabla 3. Bandas de Sentinel-2 con su respectiva longitud de onda y resolución.

Sentinel-2		
NºBanda	Longitud de onda [μm]	Resolución [m]
1	0.43-0.45	60
2	0.45-0.52	10
3	0.54-0.57	10
4	0.65-0.68	10
5	0.69-0.71	20
6	0.73-0.74	20
7	0.77-0.79	20
8	0.78-0.90	10
8A	0.85-0.87	20
9	0.93-0.95	60
10	1.36-1.39	60
11	1.56-1.65	20
12	2.10-2.28	20

Tabla 4. Valores del producto de clasificación de escenas (SCL) y su respectiva descripción.

Sentinel-2	
Valor	Descripción
1	Saturado o defectuoso
2	Píxeles de área oscura
3	Sombras de nubes
4	Vegetación
5	Suelos desnudos
6	Agua
7	Nubes de baja probabilidad
8	Probabilidad media de nubes
9	Probabilidad alta de nubes
10	Cirro
11	Nieve o hielo

4 Metodología.

La Figura 9 muestra el esquema metodológico a realizar para cumplir con nuestros objetivos. Este consiste en tres etapas principales. Primero se debe calcular el FSC a partir de imágenes de Sentinel-2 aplicando la metodología de (Romanov et al., 2003) para las temporadas de invierno desde el 2020 al 2023. Una vez ya calculado este parámetro se busca la mejor correlación que exista entre la profundidad

de nieve medida in situ y el FSC calculado, aplicando la metodología propuesta por (Romanov & Tarpley, 2007). Por último, se debe validar y evaluar las ecuaciones obtenidas en el OE2, estimando la profundidad de nieve durante las temporadas de invierno de los años 2019 y 2024. En las siguientes subsecciones se explicarán más a detalle las actividades marcadas en rojo en la figura 8.

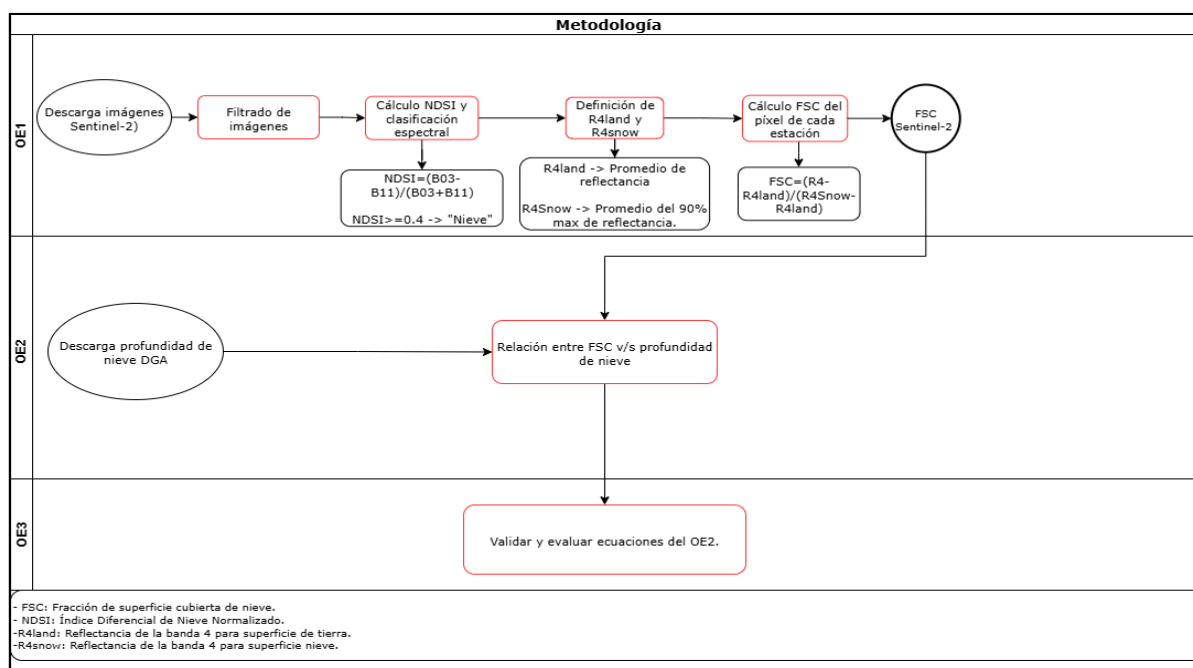


Figura 9. Esquema metodológico. Primera etapa calcular FSC. Segunda etapa obtener relación entre FSC y profundidad de nieve. Tercera etapa validar y ecuaciones obtenidas en el OE2.

4.1 Filtrado y selección de imágenes.

Primero se descargan todas las imágenes disponibles para cada estación durante los meses de invernales (mayo - septiembre) durante el período [2020 - 2023]. Estas imágenes pasaron por diversos filtros para asegurar la calidad del FSC. En primer lugar, se descartaron de inmediato todas las imágenes en las que el píxel de estudio presentaba valores 3, 8 o 9 en la banda SCL, ya que, tales valores indican nubes o sombras como se muestra en la tabla 4 y afectan negativamente la reflectancia de la imagen. Este filtro fue complementado con una inspección visual mediante QGIS, donde se eliminaron las imágenes afectadas por nubes, sombras u otros factores externos visualizados que puedan afectar a la reflectancia. Esto se realizó, dado que la banda SCL no es totalmente efectiva y puede fallar en detectar esos fenómenos. En tercer lugar, se descartaron aquellas imágenes capturadas más de 5 días después de un evento nival, con el fin de evitar reflectancias asociadas a nieve envejecida. Por último, se restringió el análisis a un rango de profundidades de nieve entre 10 y 100 cm, considerando que las capas menores a 10 cm no generan una señal satelital estable, mientras que acumulaciones mayores a 100 cm producen reflectancias saturadas y poco diferenciadas. En la tabla 4 se presenta cada uno de los filtros a utilizar y cual fue el recurso necesario para verificarlos, como el navegador de “Copernicus” que entrega las imágenes Sentinel-2 con el producto SCL, QGIS para lograr visualizar estas imágenes afectadas por nubes o sombras y la “Dirección General de Aguas”, de la cual se obtuvo tanto las profundidades de nieve como que día fue el que nevó.

Tabla 5. Base de datos utilizadas en el filtrado y selección de imágenes.

Filtro	Copernicus Browser (Sentinel-2)	QGIS	Dirección General de Aguas (DGA)
Valores 3,8 y 9 banda SCL	X		
Eliminación visual	X	X	
Derretimiento nival			X
Profundidad de nieve			X

4.2 Cálculo del NDSI y clasificación espectral.

Una vez filtradas y seleccionadas las imágenes a utilizar, se procede a calcular el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) definido por (Dozier, 1989), índice basado en la diferencia de reflectancias entre la banda visible (Verde, B03) y la banda de infrarrojo de onda corta (SWIR, B11). La ecuación planteada por (Dozier, 1989), se muestra en Ec. (1), donde “GREEN” es la banda B03 de Sentinel-2 y “SWIR” es la banda B11 de Sentinel-2. Una vez calculado el NDSI de cada imagen, se realiza la clasificación espectral, la cual consiste en utilizar un umbral definido por (Hall et al., 1995), el cual indica que cada píxel con un NDSI mayor o igual a 0,4 será clasificado como “Nieve”, por el contrario, será “No nieve”. Este proceso se muestra en la figura 10, el cual es un breve diagrama de flujo donde indica la obtención del NDSI y luego como se define cada píxel según la clasificación espectral.

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (1)$$

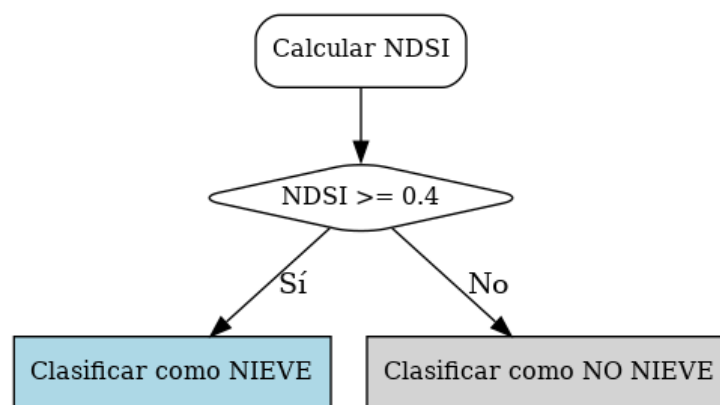


Figura 10. Diagrama de flujo para el proceso de clasificación espectral.

4.3 Calcular la Fracción superficial cubierta de nieve (FSC) del píxel ubicado en cada estación nivométrica, mediante Sentinel-2.

La FSC se calculó utilizando una adaptación de la ecuación empírica propuesta por (Romanov et al., 2003), originalmente desarrollada para la banda visible (canal 1, 0,52 - 0,75 μm) del satélite GOES. En nuestro caso, dicha banda visible fue reemplazada por la banda roja B04 de Sentinel-2 (0,65 - 0,68 μm), aprovechando su alta resolución espacial (10 m) que permite estimar con precisión la cobertura de nieve en píxeles pequeños (20 x 20 m). La ecuación adaptada resultante se muestra en la Ec. (2). En esta fórmula, R4 es la reflectancia observada en el píxel; R4snow es la reflectancia promedio correspondiente al percentil 90 de píxeles completamente cubiertos de nieve pura; y R4land es la reflectancia promedio de verano en píxeles sin nieve. De esta manera R4snow se identifica como un píxel totalmente cubierto de nieve y R4land como un píxel totalmente libre de nieve.

$$FSC = \frac{R4 - R4_{land}}{R4_{snow} - R4_{land}} \quad (2)$$

4.4 Desarrollar una relación entre FSC y la profundidad de nieve.

Se solicitó a la Dirección General de Aguas (DGA) los datos horarios de profundidad de nieve registrados por las estaciones nivometeorológicas estudiadas, abarcando el período 2015–2024. Antes de desarrollar la ecuación, se filtraron estos registros para descartar datos erróneos. Se graficó la profundidad de nieve en función del tiempo para identificar y eliminar tanto los valores negativos como aquellos que no seguían el comportamiento esperado de la serie.

Una vez con los datos de profundidad de nieve correctos, se procedió a desarrollar la relación empírica entre el FSC y la profundidad de nieve según la metodología planteada por (Romanov & Tarpley, 2007). Se ensayaron distintos ajustes de regresión (lineal, exponencial y logarítmico) y se seleccionó el que entregó el mayor coeficiente de determinación (R^2).

4.5 Validar ecuación obtenida (OE2) con datos independientes.

Para validar las ecuaciones obtenidas, se debe estimar la profundidad de nieve con las imágenes satelitales para los años 2019 y 2024, los cuales no fueron utilizados para obtener la ecuación del OE2 y además estos años son los que presencian una mejor lectura de profundidades de nieve y se tienen imágenes de Sentinel-2 disponibles. De esta manera se comparan las profundidades de nieve medias in situ con las estimadas mediante la relación obtenida en el objetivo específico 2 y se calculan los respectivos errores medios absolutos (MAE) y errores medios absolutos porcentual (MAPE) para cada una de las estaciones nivometeorológicas utilizadas. El MAE indica en promedio cuanto varía el valor estimado al real, mientras que el MAPE indica el porcentaje de error que se está teniendo al calcular la profundidad de nieve. El cálculo necesario para obtener el MAE y MAPE, se presentan en las Ec. (3) y Ec. (4) respectivamente, donde “n” es el número total de datos considerados, y_{real} es la profundidad de nieve medida in situ, y $y_{estimado}$ es la profundidad estimada mediante la ecuación desarrollada.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{real} - y_{estimado}| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{real} - y_{estimado}|}{y_{real}} \quad (4)$$

5 Resultados y Discusión.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del método de (Romanov et al., 2003) y (Romanov & Tarpley, 2007) adaptado a imágenes Sentinel-2 para la estimación de la profundidad de nieve en cuatro estaciones nivométricas de la cordillera de los Andes. Los datos satelitales, previamente filtrados por nubosidad, sombra y calidad espectral, fueron comparados con mediciones in situ con el fin de evaluar el desempeño del modelo. Se analizan tanto las métricas de error (MAE y MAPE) como los patrones espaciales y temporales de la nieve observados, discutiendo las posibles causas de las discrepancias y la capacidad de esta metodología para su uso en el monitoreo nival de zonas cordilleranas

5.1 Filtrado y cálculo del FSC.

Inicialmente, se empleó un script de Google Earth Engine para calcular el FSC en cada estación a lo largo de un año hidrológico completo (2021–2022) antes de ser filtradas. En las figuras 10, 11, 12 y 13 podemos observar los distintos gráficos realizados de FSC v/s los meses del año hidrológico 2021-2022. Este proceso fue realizado principalmente para verificar que la ecuación planteada por (Romanov et al.,

2003) es correctamente utilizada para topografías complejas como en la cordillera de los andes. En la estación de Portillo, se puede observar el comportamiento común del manto nival durante un año, es decir acumulación de nieve en los meses de invierno y derretimiento en las estaciones de primavera y verano. Este mismo comportamiento se puede ver en las demás estaciones, solo que con algunas deficiencias.

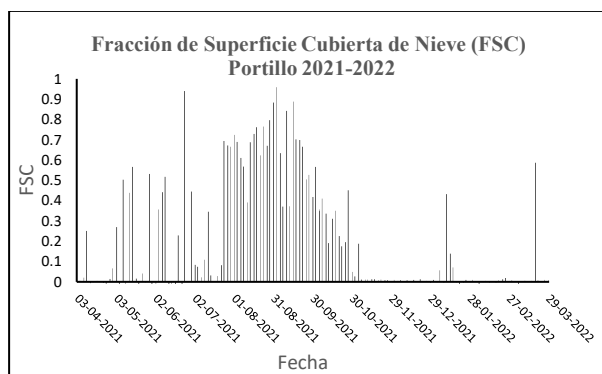


Figura 10. FSC año hidrológico 2021-2022 Portillo.

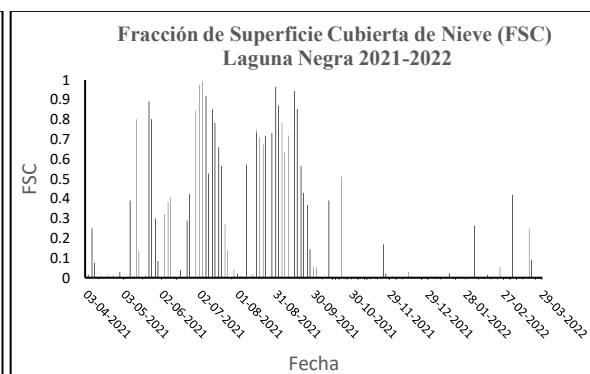


Figura 11. FSC año hidrológico 2021-2022 Laguna Negra.

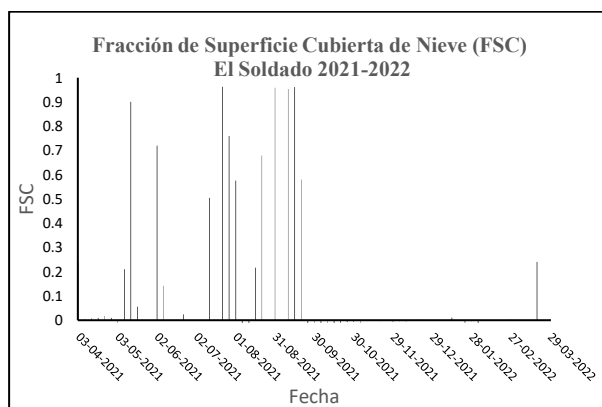


Figura 12. FSC año hidrológico 2021-2022 El Soldado.

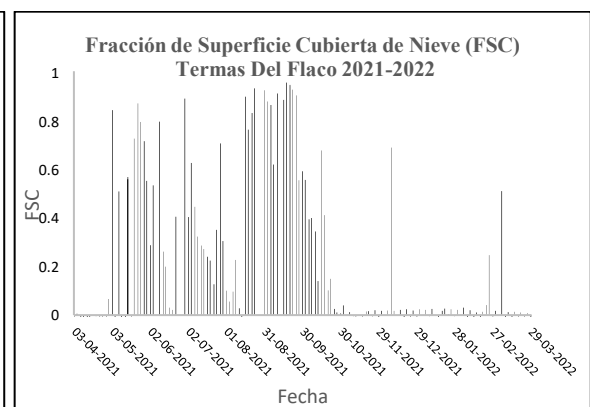


Figura 13. FSC año hidrológico 2021-2022 Termas del Flaco.

En las figuras 11 y 12, se pueden observar diversas deficiencias en el cálculo del FSC antes de ser filtradas las imágenes. Por ejemplo, en Laguna Negra que se puede observar FSC relativamente altos, de hasta 0,3 en meses del año que deberían estar totalmente libres de nieve, tales como enero, febrero, noviembre y abril. Por estos valores que se desvían del comportamiento ideal del manto nival en la zona centro y centro-sur del país es por lo que se procedió a buscar distintas razones y así definir los filtros necesarios para obtener un correcto valor del FSC.

Una vez aplicados los diversos filtros mencionados en la metodología, la tabla 6 muestra un resumen de las imágenes que se filtraron. En esta se observa que gran parte de las imágenes Sentinel-2 disponibles para las estaciones nivometeorológicas tuvo que ser descartada por distintos motivos; en el caso de la estación El Soldado, debió eliminarse hasta un 97% de las imágenes inicialmente obtenidas, donde el filtro que más afectó a estas imágenes fue el producto SCL, indicando que el píxel estaba cubierto de nubes o sombras. Por otra parte, en Portillo, se observa que se descartó el 96% de las imágenes originales, ya que, es la única ubicada en la ladera de una montaña. Esto involucró que, durante junio, julio y parte de agosto, el píxel correspondiente a Portillo aparecía constantemente cubierto de sombra debido al relieve, impidiendo así obtener una reflectancia adecuada.

El filtro que más imágenes en removió en general, fue el umbral de profundidad de nieve. Esto se explica porque en la mayoría de los años, durante abril y mayo la nieve acumulada no supera los 10 cm, mientras que en algunos inviernos se registraron nevazones tan abundantes que entre junio y septiembre la profundidad excedió reiteradamente los 100 cm. Estos resultados evidencian una limitación clave del método. A pesar de la alta frecuencia temporal de Sentinel-2, la disponibilidad efectiva de imágenes útiles se reduce drásticamente en invierno por la nubosidad, las sombras topográficas o la nieve

envejecida, lo que perjudica significativamente obtener una correlación adecuada entre el FSC y profundidad de nieve.

Tabla 6. Resumen de imágenes filtradas y seleccionadas.

Estación nivométrica	Imágenes sin filtrar	Filtradas por banda SCL	Nube o sombra visualizada por Qgis	Derretimiento nival	Profundidad de nieve	%Imágenes filtradas	Imágenes finales
Portillo	291	55	27	45	153	96	11
Laguna Negra	250	103	9	44	75	92	19
El Soldado	146	55	20	16	50	97	5
Termas del Flaco	221	62	10	4	123	90	22

5.2 Relación FSC y profundidad de nieve medida in situ.

Realizado el filtro y cálculo de FSC, se procedió a buscar la mejor correlación entre la profundidad de nieve y la fracción superficial cubierta de nieve. En la figura 14, se presenta la correlación lineal obtenida entre la profundidad de nieve y el FSC de “Portillo”, En la figura 15, se presenta la correlación lineal obtenida entre la profundidad de nieve y el FSC de “Laguna Negra”, En la figura 16, se presenta la correlación lineal obtenida entre la profundidad de nieve y el FSC de “El Soldado” y en la figura 17, se presenta la correlación lineal obtenida entre la profundidad de nieve y el FSC de “Termas del Flaco”. Aunque en todas las estaciones nivométricas se obtuvo una correlación lineal, en ninguna se superó un coeficiente de determinación mayor a 0,5. De esta manera, el mejor coeficiente de determinación obtenido fue en la estación de Portillo con un R^2 de 0,46, lo que indica que la variabilidad de la profundidad de nieve no es capaz de explicarse totalmente con el uso del FSC.

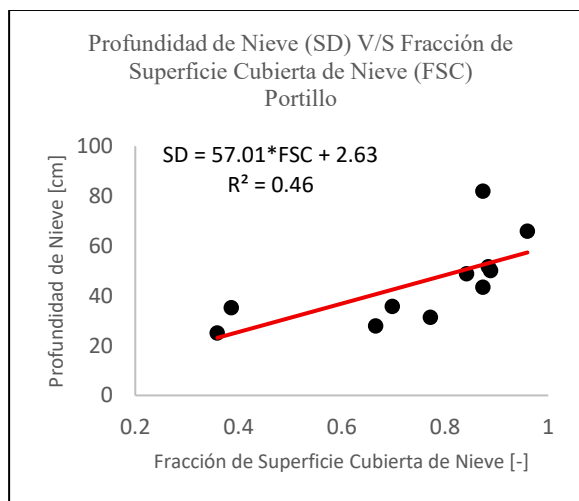


Figura 14. Profundidad de nieve v/s FSC Portillo.

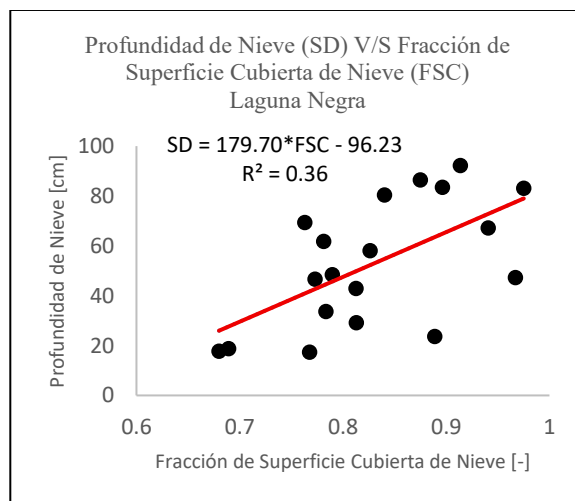


Figura 15. Profundidad de nieve v/s FSC Laguna Negra.

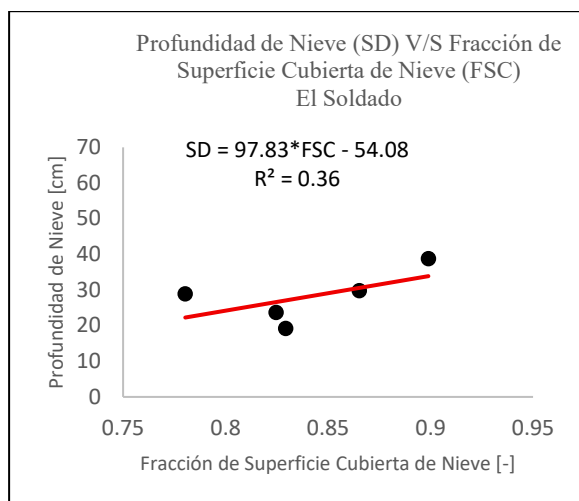


Figura 16. Profundidad de nieve v/s FSC El Soldado.

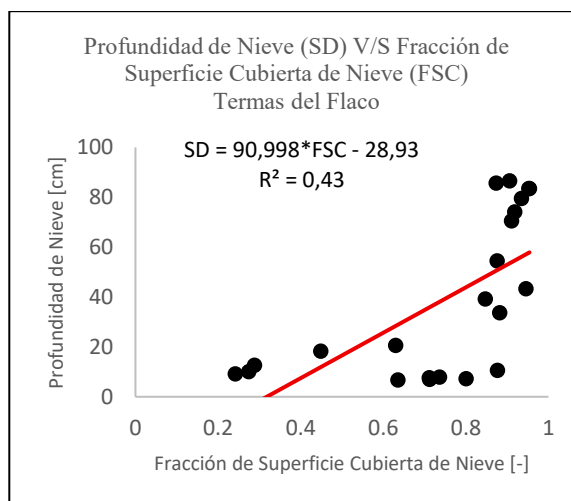


Figura 17. Profundidad de nieve v/s FSC Termas del Flaco.

Los bajos coeficientes de determinación pueden explicarse por varios factores, tales como la saturación de la reflectancia a grandes profundidades de nieve, la influencia de las características de la nieve (tipo y edad) o variaciones en el albedo superficial. Además, en Termas del Flaco figura 17, se puede observar cómo hay muchos valores de profundidad de nieve cercanos a los 15 cm de nieve, pero el FSC aumenta hasta un 0,85, valor excesivamente alto para dicha profundidad. Este escenario se debe a que estas profundidades bajas observadas, fueron todas capturadas en mayo, mes donde son las primeras precipitaciones nivales de la temporada y donde la reflectancia de la nieve fresca suele ser mayor, sobreestimando así el valor del FSC.

5.3 Validación y evaluación de las ecuaciones del OE2.

Se volvieron a aplicar todos los filtros a las nuevas imágenes descargadas, es decir del año 2019 y 2024, para así evaluar las relaciones obtenidas manteniendo las condiciones y escenarios mas favorables. En la figura 18, se presenta la relación obtenida entre profundidad de nieve estimada y la profundidad de nieve real para la estación de “Portillo”, en la figura 19, se presenta la relación obtenida entre profundidad de nieve estimada y la profundidad de nieve real para la estación de “Laguna Negra”, en la figura 20, se presenta la relación obtenida entre profundidad de nieve estimada y la profundidad de nieve real para la estación de “El Soldado” y en la figura 21, se presenta la relación obtenida entre profundidad de nieve estimada y la profundidad de nieve real para la estación de “Termas del Flaco”. Lo que se espera de estas relaciones es que deberían tener un coeficiente de determinación cercano a 1, debido a que los valores de ambas profundidades teóricamente deben ser lo más similares posibles. En la figura 18, en Portillo, la profundidad de nieve es cercana a los 15 cm, pero la profundidad estimada aumenta de 10 a 50 cm de nieve, esto se podría atribuir al mismo problema identificado anteriormente de ser los primeros eventos nivales de la temporada. Sin embargo, en todas las estaciones nivométricas se puede notar que la tendencia lineal se mantiene en nuestras estimaciones, lo que indica que sí existe una correlación entre el FSC y la profundidad de nieve.

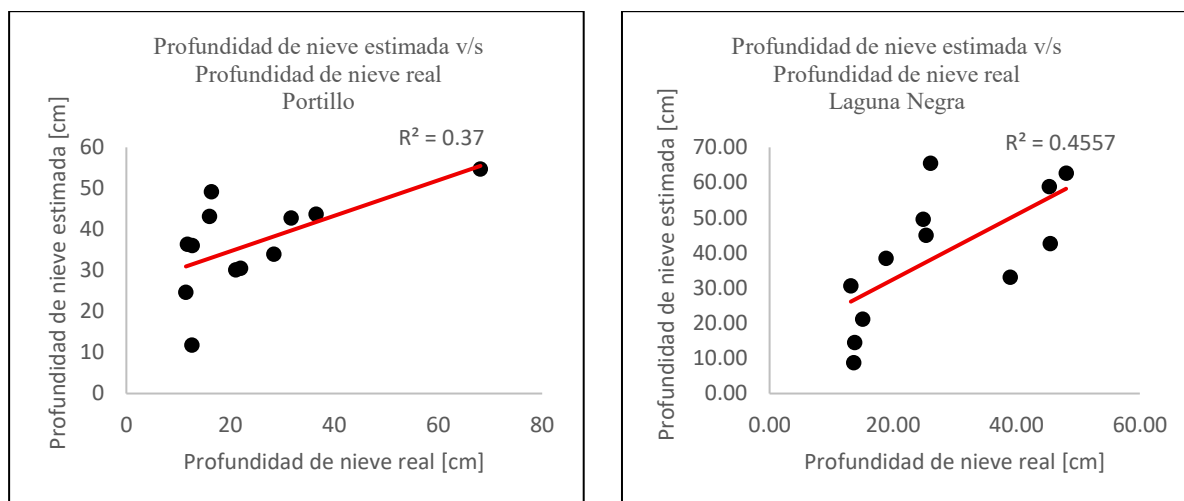


Figura 18 y 19. Relación entre profundidades de nieve estimada v/s profundidad de nieve real. Portillo y Laguna Negra.

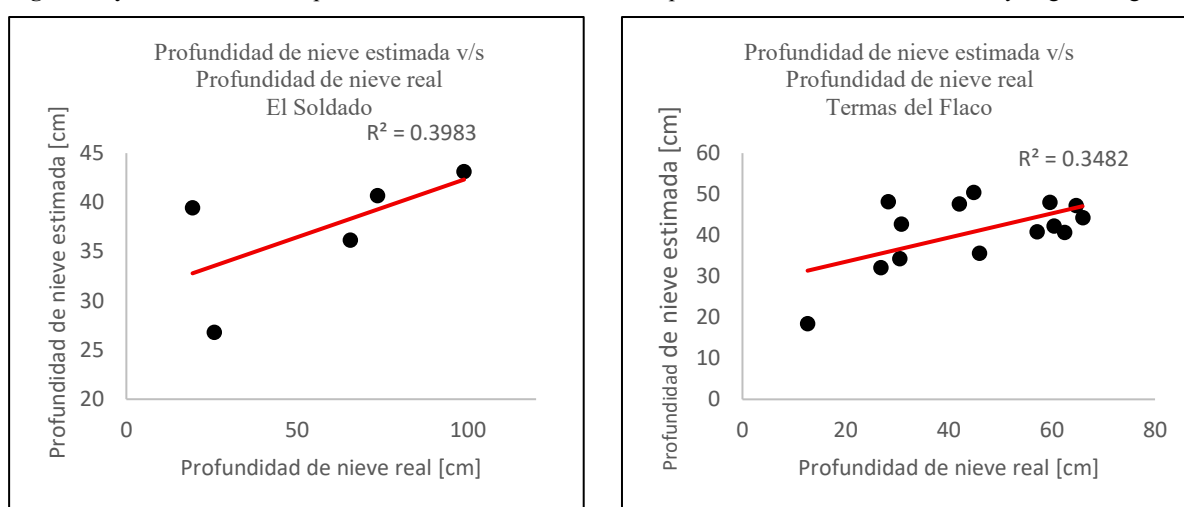


Figura 20 y 21. Relación entre profundidades de nieve estimada v/s profundidad de nieve real. El Soldado y Termas del Flaco.

Por último, se calculan los distintos errores medios absolutos (MAE) y errores medios absolutos porcentuales para cada una de las estaciones nivométrica, tal como se muestra en la tabla 7, donde se indica el nombre de la estación, el total de imágenes finales después de los filtros y sus respectivos MAE y MAPE luego de la validación de la ecuación obtenida en el OE2. En términos generales la estación que obtuvo los resultados mas satisfactorios fue Termas del Flaco, donde de un total de 14 datos, se obtuvo un error medio absoluto de tan solo 12,53 cm y un error porcentual de 29,26%, lo que indica que al menos en esta estación, la ecuación lineal estimada para predecir la profundidad de nieve mediante el FSC puede ser aplicable siempre y cuando se consideren todos los factores externos que pueden afectar a la reflectancia y visibilidad de las imágenes.

Tabla 7. Errores de estimación profundidad de nieve con Sentinel-2.

Estación Nivométrica	Total de datos (n)	MAE [cm]	MAPE [%]
Portillo	12	14,74	88,53
Laguna Negra	12	14,11	35,24
El Soldado	5	27,84	50,73
Termas del Flaco	14	12,53	29,26

Portillo exhibió un MAE de 14,74 cm, lo que indica que en promedio las estimaciones de profundidad de nieve difirieron de los valores observados por esa cantidad. Considerado aisladamente, este error

absoluto no parece excesivo. Sin embargo, el MAPE fue de 88,53%, evidenciando una desproporción significativa. Varios factores pueden explicar este comportamiento, como, por ejemplo, se aprecia en la figura 18, muchas mediciones in situ que rondan los 16 cm, pero sus correspondientes estimaciones van desde los 10 hasta 50 cm de profundidad, estas grandes diferencias incrementan sustancialmente el error porcentual. Además, la ubicación de la estación provoca con frecuencia sombra en las imágenes Sentinel-2 durante los meses de mayor acumulación nival (junio a agosto). Esa sombra reduce artificialmente la reflectancia registrada por el sensor, subestimando el FSC calculado. En conjunto, estos factores explican que, pese a un MAE aceptable, el MAPE resulte muy alto en Portillo. Esto sugiere que el modelo presenta limitaciones particulares en sitios con sombras topográficas persistentes o con nieve de poca profundidad. En el caso de Portillo, se recomienda aplicar métodos de corrección de sombras o incorporar sensores con mayor capacidad de penetración atmosférica (por ejemplo, radar) y también abarcar un mayor período de estudio donde se obtengan profundidades de nieve dentro de todo el umbral definido.

La estación Laguna Negra obtuvo un MAE de 14,11 cm y un MAPE de 35,24%, reflejando un desempeño intermedio pero aceptable del modelo. El error absoluto es similar al de Portillo, pero el error porcentual es sustancialmente menor. Esto indica que las estimaciones estuvieron relativamente cerca de los valores reales, especialmente considerando que las profundidades de nieve en Laguna Negra son mayores. Una nieve más profunda tiende a disminuir el impacto porcentual de desviaciones moderadas. Este satisfactorio resultado se puede deber a su ubicación topográfica, ya que esta estación está en una zona donde la topografía es plana y no tiene ninguna montaña alrededor, lo que permite una distribución más homogénea de la nieve.

En Termas del Flaco se obtuvo un MAE de 12,53 cm y un MAPE de 29,26%, los mejores resultados entre todas las estaciones evaluadas. Esto sugiere que en esta ubicación la relación FSC y profundidad de nieve resultó más estable y representativa. Una posible explicación es la distribución más homogénea de la nieve en Termas del Flaco, lo que permite que el FSC refleje mejor la profundidad de nieve. Además, la estación se encuentra en un valle amplio, sin pendientes ni sombras pronunciadas, lo cual facilita mediciones más limpias por parte del sensor pasivo.

Por último, El Soldado exhibió el mayor error absoluto de todas las estaciones, con un MAE de 27,84 cm y un MAPE de 50,73%. Estos valores indican que las estimaciones en este sitio fueron poco exactas tanto en términos absolutos como relativos, evidenciando una marcada debilidad del modelo para capturar la profundidad de nieve en la zona. Esta deficiencia puede atribuirse a varios factores. Primero, la cantidad de datos disponibles fue muy reducida, tras el filtrado solo se contaba con 5 observaciones, insuficientes para reflejar la variabilidad natural del fenómeno o para ajustar adecuadamente la relación empírica. Segundo, El Soldado se ubica en una zona de topografía irregular, lo que afecta significativamente la distribución de la nieve dentro del píxel y, por ende, dificulta la estimación del FSC.

6 Conclusión.

En este estudio se desarrolló y validó una metodología basada en teledetección pasiva (imágenes Sentinel-2) para estimar la profundidad de nieve en estaciones nivométricas de la zona centro y centro-sur de Chile, adaptando el algoritmo de (Romanov et al., 2003) para calcular la fracción superficial de cobertura nival (FSC). Los resultados confirman una correlación positiva entre la FSC estimada por satélite y la profundidad de nieve medida in situ. Sin embargo, un punto importante es que se tuvo que filtrar más del 90% de las imágenes, principalmente por nubosidad y condiciones desfavorables, lo que redujo bastante la cantidad de datos, afectando así a obtener una correlación con un alto coeficiente de determinación.

Aun así, se confirma que existe correlación entre la fracción cubierta y la profundidad de nieve, aunque con coeficientes de determinación relativamente bajos, donde ninguno superó el R^2 de 0,5 siendo Portillo la estación con el valor más alto, de 0,46, por lo que, no se puede definir la profundidad de nieve solo con el uso del valor de FSC, pero si se puede lograr obtener una estimación similar a la realidad. Estas correlaciones se vieron afectadas por factores como la saturación del FSC en profundidades altas,

la presencia de sombras que subestiman la reflectancia real y también por el efecto de las primeras nevadas del año.

A pesar de estas limitaciones, la metodología demostró ser capaz de estimar la profundidad de nieve con un error absoluto medio del orden de 12 -15 cm en dos de las cuatro estaciones (Laguna Negra y Termas del Flaco), las cuales presentan condiciones favorables (mayores acumulaciones de nieve, terreno abierto y topografía simple). En particular, Termas del Flaco alcanzó el mejor desempeño (MAE =12,5 cm; MAPE = 29%), lo que indica que en valles amplios con cobertura nival homogénea la técnica produce estimaciones confiables y consistentes con los valores observados. Este resultado es prometedor, ya que valida el uso de imágenes Sentinel-2 como herramienta complementaria para el monitoreo de la nieve en zonas donde la instrumentación in situ es escasa o inexistente. Por su parte, Laguna Negra también exhibió un porcentaje de error relativamente bajo (35%), lo que sugiere que el modelo funciona de manera aceptable cuando la capa de nieve es lo suficientemente profunda como para que errores del orden de 10 - 15 cm no representen desviaciones porcentuales extremas.

Por otro lado, las estaciones con condiciones más desafiantes presentaron un desempeño limitado del método. En Portillo (ubicada en una ladera con sombras topográficas), el MAE (14,7 cm) fue similar al de las demás estaciones, pero el MAPE fue muy alto (88%). Esto se explica porque las profundidades reales en Portillo eran bajas (15 - 20 cm) y las sombras orográficas provocaron una subestimación del FSC. Sin aplicar correcciones adicionales, la metodología tiende por tanto a infraestimar la nieve en sitios con relieve pronunciado y escasa iluminación solar. Por su parte, en El Soldado (topografía irregular), la escasez de imágenes útiles derivó en un ajuste deficiente y estimaciones con altos errores (MAE $\approx$ 28 cm). Estos casos ponen en presencia las principales limitaciones del enfoque, su dependencia de datos ópticos satelitales que en invierno pueden ser muy escasos por nubosidad y sombras, y la suposición de homogeneidad del píxel, la cual se invalida en terrenos muy heterogéneos. Bajo estas condiciones, la relación FSC - profundidad exhibe una gran dispersión y errores considerables, especialmente en términos relativos.

Este estudio cumplió con el objetivo de formular un método replicable para estimar la profundidad de la nieve mediante el FSC obtenido por imágenes satelitales de alta resolución, ofreciendo una solución innovadora para el monitoreo nival en los Andes de Chile. Si bien los mejores resultados se obtienen solo bajo ciertas condiciones de terreno e iluminación. En conjunto, este trabajo sienta las bases para implementar sistemas operativos a futuro de seguimiento de la nieve mediante satélites en la región, lo que beneficiaría la gestión de los recursos hídricos frente a la variabilidad climática. No obstante, los hallazgos de este trabajo también evidencian la necesidad de continuar investigando y refinando la metodología. Por ejemplo, se requiere mejorar los algoritmos de detección de nieve en terrenos complejos y validar el enfoque en distintas cuencas, ya que, en este estudio se obtuvo la estimación sólo en el píxel donde se ubica la estación. Solo así se podrá avanzar hacia tener un monitoreo continuo espacial y temporalmente de la profundidad de nieve, fortaleciendo el conocimiento y la capacidad de adaptación frente al cambio climático, donde el monitoreo de este parámetro cada vez es más crítico.

7 Agradecimientos.

Esta memoria se realizó en el marco de dos proyectos de investigación: Proyecto FONDECYT Iniciación en investigación No.11220482 y el proyecto USM Interno Multidisciplinario PI_M_24_03. Este proyecto fue en conjunto con la Ph.D Lina Castro a quien agradezco por la compañía en todo el proceso y el acceso a facilidades para poder avanzar de mejor manera en este estudio.

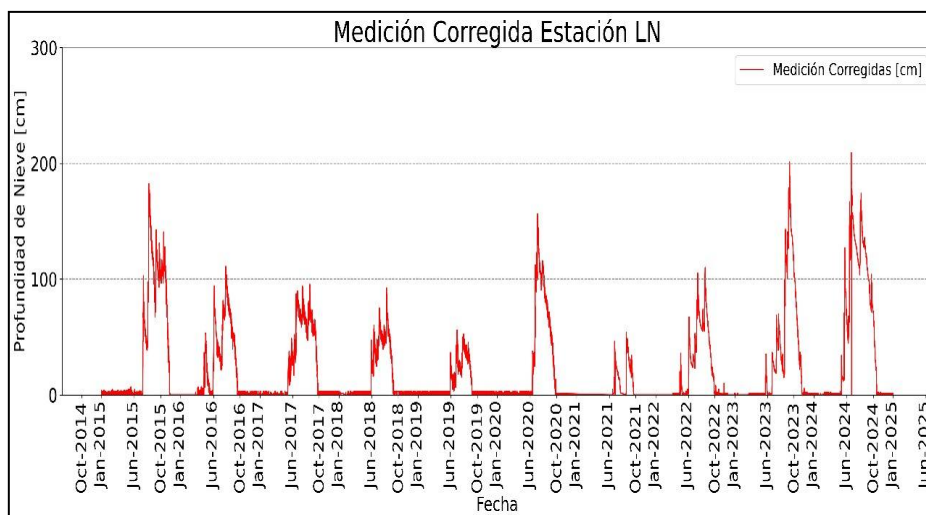
Agradezco profundamente a mi familia que siempre estuvo presente en todo momento que necesite algún tipo de ayuda o consejo durante mi carrera universitaria, además siempre estuvieron dispuestos a todo para que yo este lo mejor posible y por aguantarme estos 6 años de estrés constante.

También le agradezco a mi equipo de civil “UsoExclusivoFotos” (Cony, Josefa y Cris) que fuimos tremendo team para todas las tareas y trabajos en grupo de la carrera, por todas esas noches desvelándonos y las mañanas por zoom estudiando racional y también por las juntas fuera de estudiar que siempre sirvieron para distraerse un poquito.

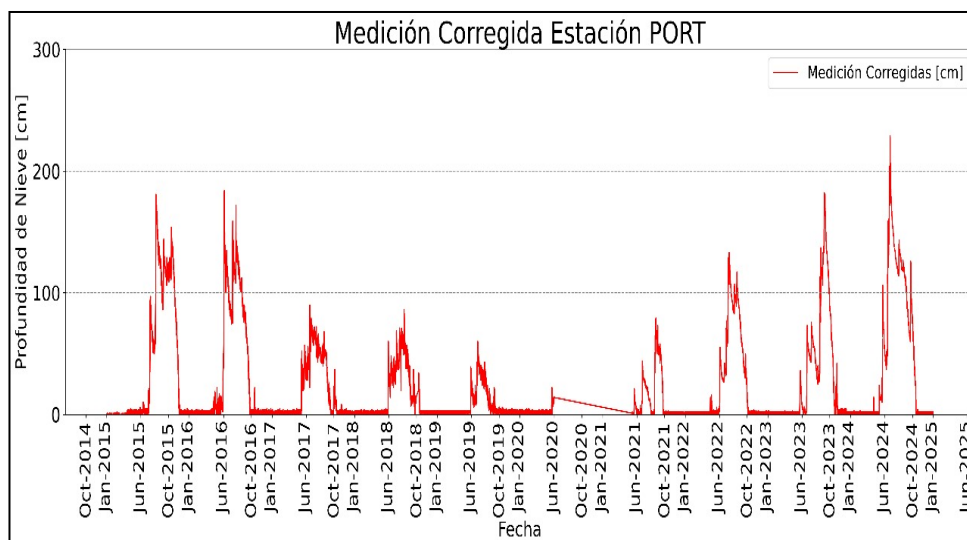
Por último, agradecerle al equipo mec (Nelo, Kathy, Diego y sumo a la Makita) que los conozco desde el 2019 y 2020 que, aunque no fueran de mi carrera igual nunca dudaron en integrarme a su grupo, siempre me ayudaron las veces que los necesité y también fueron clave para despejarme y no estar siempre atento a los ramos y la universidad. Aunque digan que su carrera es la mejor, todos sabemos que no es así porque Civil es la madre de todas las ingenierías

Los quiero mucho y muchísimas gracias por ser parte de este proceso tan especial junto a mí. Finalmente se logró terminar la carrera.

8 Anexo.



Anexo 1: Registro de profundidades de nieve medidas por la DGA para la estación Laguna Negra en el período [2015-2024].



Anexo 2: Registro de profundidades de nieve medidas por la DGA para la estación Portillo en el período [2015-2024].

9 Referencias.

- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *Cryosphere*, 14(6). <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- BCN. (2005, January 11). *Clima y vegetación*. Clima y Vegetación. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/clima.htm>
- BCN. (2017). *Censo 2017 y su dimensión demográfica comunal*.
- CR2. (2023, March 23). *Análisis (CR)2 | Un breve recuento de las lluvias en la zona central de Chile ante la retirada de La Niña*.
- CS team. (2024). *Sentinel-2 Products Specification Document*.
- Daudt, R. C., Wulf, H., Hafner, E. D., Bühler, Y., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2023). Snow depth estimation at country-scale with high spatial and temporal resolution. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 197, 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.01.017>
- Debarbieux, B., & Price, M. F. (2012). Mountain regions: A global common good? *Mountain Research and Development*, 32(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00034.S1>
- DGA. (2024). *Sistema Hidrométrico en Línea*. Selección de Estaciones y Parámetros.
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28(C), 9–22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Fassnacht, S. R., Brown, K. S. J., Blumberg, E. J., López Moreno, J. I., Covino, T. P., Kappas, M., Huang, Y., Leone, V., & Kashipazha, A. H. (2018). Distribution of snow depth variability. *Frontiers of Earth Science*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/s11707-018-0714-z>
- 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 Sensing of Environment*, 54(2), 127–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Kogut. (2021, November 9). *Teledetección Satelital: Tipos, Usos Y Aplicaciones*. EOS DATA ANALYTICS.
- Lievens, H., Brangers, I., Marshall, H. P., Jonas, T., Olefs, M., & De Lannoy, G. (2022). Sentinel-1 snow depth retrieval at sub-kilometer resolution over the European Alps. *Cryosphere*, 16(1). <https://doi.org/10.5194/tc-16-159-2022>
- Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H. P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I., de Rosnay, P., Dumont, M., Giroto, M., Immerzeel, W. W., Jonas, T., Kim, E. J., Koch, I., Marty, C., Saloranta, T., Schöber, J., & De Lannoy, G. J. M. (2019). Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12566-y>
- Lufft. (2025). *SHM 30 Snow Depth Sensor www.lufft.de User Manual English*. www.lufft.de
- Romanov, P., & Tarpley, D. (2004). Estimation of snow depth over open prairie environments using GOES imager observations. *Hydrological Processes*, 18(6). <https://doi.org/10.1002/hyp.5508>
- Romanov, P., & Tarpley, D. (2007). Enhanced algorithm for estimating snow depth from geostationary satellites. *Remote Sensing of Environment*, 108(1). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.013>
- Romanov, P., Tarpley, D., Gutman, G., & Carroll, T. (2003). Mapping and monitoring of the snow cover fraction over North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(16). <https://doi.org/10.1029/2002jd003142>
- Shaw, T. E., Gascoin, S., Mendoza, P. A., Pellicciotti, F., & McPhee, J. (2020). Snow Depth Patterns in a High Mountain Andean Catchment from Satellite Optical Tristereoscopic Remote Sensing. *Water Resources Research*, 56(2). <https://doi.org/10.1029/2019WR024880>