



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIÁN
Ilumina el futuro

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
SEDE CONCEPCIÓN**

**“Efecto de la Oscilación Antártica en la Dinámica Hidrológica del Lago Fagnano
en la Patagonia Chilena”**

Memoria para Optar el Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: MSc. Patricio Ignacio Fuentes Aguilera

Alumno: Martín Alonso Hermosilla Cuevas

Concepción, septiembre, 2025



© Martín Alonso Hermosilla Cuevas.

**Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines
académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y
cuando se incluya cita bibliográfica del documento.**



CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA.

En Concepción, el de de, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Martín Alonso Hermosilla Cuevas de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesor MSc. Patricio Fuentes Aguilera

Profesor MSc. Javiera Padilla Reyes



AGRADECIMIENTOS.

En este apartado quiero agradecer a cada una de las personas que formó parte de mi etapa universitaria, que de alguna u otra forma fueron dejando una enseñanza en mí. En este estudio convergen todas las experiencias vividas en estos años y es aquí donde comienza otra etapa en mi vida, es por eso que no es solo una entrega de documento, sino que conlleva todos los recuerdos y la finalización de esta linda etapa.

Dar gracias a mi familia, César, Karin, Beatriz, Isabel y Benjamín por siempre darme apoyo en los momentos en donde faltaban palabras de aliento, por estar unidos en cualquier tipo de situación y acompañarme en cada paso que doy.

Dar gracias a Isamar, que en este tiempo en donde muchas veces se torna estresante y caótica la conclusión de este proceso, estuvo conmigo de una forma incondicional, con amor y cariño.

Dar gracias a mis amistades, formadas en etapa pre universitaria y universitaria, gracias a ellos por hacer linda esta etapa, en años de continuo aprendizaje y anécdotas diarias.

Dar gracias a cada uno de los docentes que influyó en mi formación universitaria, de todos me llevo un gran aprendizaje y conocimiento. En especial, a mi profesor guía de tesis Patricio Fuentes Aguilera y a mí jefa de carrera Javiera Padilla Reyes, siempre mostrando una disponibilidad para el diálogo aportando conocimiento desde una mirada humanitaria y empática.

En fin, concluye una linda etapa en mi vida rodeado de gente que aportó de manera positiva para llegar a ser Ingeniero Civil.



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.	IX
1. Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Objetivos.	16
1.2.1 Objetivo general.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.	16
2. Capítulo 2 METODOLOGÍA.....	17
2.1 Área de estudio.	17
2.2 Obtención de Datos Altimétricos mediante ALTIS.	19
2.3 Compensación datos de nivel de ALTIS.	24
2.3.1 Niveles del lago Fagnano por la DGA.	24
2.3.2 Compensación de los datos.....	24
2.4 Datos Meteorológicos.....	26
2.4.1 Características de las estaciones meteorológicas utilizadas.	27
2.4.2 Relleno de datos faltantes en registros de precipitación.	27
2.5 Método de Interpolación Inversa del Cuadrado de la Distancia (IDW ²).	28
2.5.1 Centroide de la Cuenca.	28
2.5.2 Aplicación del Método IDW ² (<i>Inverse Distance Weighting Squared</i>).	28
2.6 Oscilación Antártica (AAO).	30
2.7 Validación de los datos mediante Spearman y Kling–Gupta Efficiency (KGE).32	32
2.7.1 Kling – Gupta Efficiency.	34
2.7.2 Spearman.	34



3. Capítulo 3 RESULTADOS	36
3.1.- Relleno de datos de precipitación.....	36
3.2.- Precipitación sobre la cuenca.....	42
3.2.1.- Análisis de las Precipitaciones en la Cuenca del Lago Fagnano	42
3.2.2.- Resumen estadístico.....	44
3.3 Datos de Nivel Dirección General de Aguas.....	46
3.4 Datos de Nivel ALTIS.....	47
3.5 Datos de Nivel ALTIS Corregido.....	52
3.6 Datos OAI.....	54
4. Capítulo 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
4.1 Relación entre AAO y precipitaciones registradas.....	60
4.2 Relación entre AAO y ALTIS.....	62
4.3 Relación entre precipitaciones registradas y ALTIS.....	64
5. Capítulo 5 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	65
5.1 Nivel corregido de ALTIS – Nivel de la DGA.....	65
5.1.2 Coeficiente de correlación de Spearman	65
5.1.3 Índice de eficiencia de Kling–Gupta (KGE)	66
5.2 Nivel corregido de ALTIS – Precipitaciones	67
5.3 AAO - Nivel corregido de ALTIS.....	70
5.4 AAO – Precipitaciones.....	73
5.5 Validación con estudios similares.....	75
6. Capítulo 6 CONCLUSIÓN	77
Capítulo 7 REFERENCIAS.....	79
Capítulo 8 ANEXOS	84



ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.-Características estaciones meteorológicas Lago Deseado, Pampa Huanaco, Río Betbeder y Río Azopardo. Fuente: Elaboración propia	27
Tabla 2.- Distancias al centroide, peso (w) y porcentaje de influencia al cálculo de precipitaciones. Fuente: Elaboración propia.....	29
Tabla 3.-Resumen estadístico de precipitaciones cuenca Lago Fagnano. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 4.- Valores de nivel del Lago Fagnano sin corregir: promedios, máximos y mínimos. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 5.- Resumen estadístico de los datos de nivel para el Lago Fagnano en ALTIS corregido. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 6.- Datos AOI. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 7.- Parámetros para KGE. Fuente: Elaboración propia.....	66
Tabla 8.- Datos utilizados para correlación de Spearman entre nivel de ALTIS corregido y las precipitaciones de la cuenca del Lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.....	67
Tabla 9.-Datos utilizados para correlación de Spearman entre AAO y nivel de ALTIS corregido del Lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.....	70
Tabla 10.- Datos utilizados para correlación de Spearman entre AAO y precipitaciones de la cuenca del Lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 11.-Datos de precipitaciones completados estaciones Río Azopardo, Lago Deseado, Pampa Huanaco y Río Betbeder para el período abril 2016-octubre 2020.Fuente: Elaboración propia con datos del sistema hidrométrico de la DGA.	84
Tabla 12.- Precipitaciones en el centroide de la cuenca del Lago Fagnano para el periodo abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia	86
Tabla 13.-Nivel del Lago Fagnano tramo 1. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetría satelital.....	88



Tabla 14.-Nivel del Lago Fagnano tramo 2. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetría satelital.....	91
Tabla 15.-Nivel del Lago Fagnano tramo 3. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetría satelital.....	94
Tabla 16.-Nivel del Lago Fagnano tramo 4. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetría satelital.....	97
Tabla 17.- Nivel del Lago Fagnano compensado con datos de la DGA y valores de ALTIS para el periodo abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.	100
Tabla 18.- Datos utilizados para correlación de Spearman entre nivel de ALTIS corregido y el nivel del Lago Fagnano según la DGA para el periodo abril 2016 –octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.....	106
Tabla 19.- Comparativa de las variables para el período abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.....	111



ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.-Ubicación de la cuenca Lago Fagnano. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 2.- Ejemplo de procesamiento de datos altimétricos en ALTIS. Fuente: Elaboración Propia	22
Figura 3.- Serie de tiempo. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 4.- Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Azopardo-Lago Deseado. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 5.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Azopardo-Río Betbeder. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 6.- Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Pampa Huanaco- Lago Deseado. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 7.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Pampa Huanaco-Río Betbeder. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 8.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Pampa Huanaco-Río Azopardo. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 9.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Betbeder-Lago Deseado. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 10.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Betbeder-Río Azopardo. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 11.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Betbeder-Pampa Huanaco. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 12.- Precipitaciones cuenca lago Fagnano periodo abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos desde Sistema Hidrométrico en línea, DGA.....	42
Figura 13.-Datos de Nivel Lago Fagnano por la DGA. Fuente: Elaboración Propia	46
Figura 14.-Tramo 1 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.	47
Figura 15.-Series temporal 1 entregada por ALTIS. Fuente: Elaboración Propia. ..	47
Figura 16.-Tramo 2 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.	48
Figura 17.-Series temporal 2 entregada por ALTIS. Fuente: Elaboración Propia. ..	48
Figura 18.-Tramo 3 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.	48



Figura 19.-Series temporal 3 entregada por ALTIS. Fuente: Elaboración Propia. ..	49
Figura 20.-Tramo 4 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.	49
Figura 21.-Series temporal 4 entregada por ALTIS. Fuente: Elaboración Propia. ..	49
Figura 22.-Niveles del Lago Fagnano en el Tiempo por ALTIS. Fuente: Elaboración Propia ..	50
Figura 23.-Datos de Nivel Lago Fagnano Corregidos. Fuente: Elaboración Propia.	52
Figura 24.- Datos AOI. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 25.-Precipitaciones, nivel del agua y oscilación antártica para la cuenca del lago Fagnano durante el periodo abril 2016 - octubre 2020.....	59
Figura 26.- Oscilación antártica y precipitaciones registradas en la cuenca del lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 27.-Oscilación antártica y niveles según ALTIS en la cuenca del lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.	62

RESUMEN.

En el presente estudio se analiza el efecto de la Oscilación Antártica (AAO) sobre el territorio nacional, con foco específico en el Lago Fagnano (o Lago Khami), ubicado en la Isla Grande de Tierra del Fuego, en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Para ello, se evaluaron tres variables principales: precipitaciones en la cuenca, niveles del lago, e índices de la AAO.

Las precipitaciones fueron estimadas mediante el método de interpolación inversa del cuadrado de la distancia (IDW²), utilizando datos de las estaciones Río Betbeder, Lago Deseado, Pampa Guanaco y Río Azopardo. Los niveles del lago fueron obtenidos a partir de datos altimétricos del satélite Sentinel-3A, procesados mediante el software ALTIS y ajustados con registros *in situ* proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA). Por su parte, el índice de la Oscilación Antártica se calculó a partir de la diferencia de presiones normalizadas entre las latitudes 40°S y 65°S.

Las relaciones entre variables se evaluaron mediante el coeficiente de correlación de Spearman y el índice de eficiencia Kling-Gupta (KGE), este último aplicado exclusivamente para la comparación entre variables con unidades y escalas compatibles (niveles del lago). En los demás casos, se empleó únicamente Spearman por tratarse de variables con diferentes unidades de medida.

Los resultados muestran una fuerte correlación entre los niveles corregidos de ALTIS y los registros de la DGA ($r = 0,736$; KGE = 0,713). En contraste, la correlación entre niveles del lago y precipitaciones fue moderada ($r = 0,350$), mientras que la relación entre la AAO y el nivel del lago corregido fue baja ($r = 0,069$). Finalmente, la correlación entre la AAO y las precipitaciones también fue débil ($r = 0,108$).

Comprender la variación de los niveles del Lago Fagnano resulta fundamental para evaluar los efectos del cambio climático en el territorio austral de Chile. Asimismo, los resultados estadísticos obtenidos a partir del análisis de las variables consideradas permiten reconstruir los niveles históricos del lago mediante altimetría satelital.

ABSTRACT.

This study analyzes the effect of the Antarctic Oscillation (AAO) on the national territory, with a specific focus on Lake Fagnano (or Lake Khami), located on Isla Grande de Tierra del Fuego, in the Magallanes and Chilean Antarctic Region. To this end, three main variables were evaluated: precipitation in the basin, lake levels, and AAO indices.

Precipitation was estimated using the inverse distance squared (IDW²) interpolation method, using data from the Río Betbeder, Lago Deseado, Pampa Guanaco, and Río Azopardo stations. Lake levels were obtained from altimetric data from the Sentinel-3A satellite, processed using AlTiS software and adjusted with in situ records provided by the General Water Directorate (DGA). The Antarctic Oscillation index was calculated from the difference in normalized pressures between latitudes 40°S and 65°S.

The relationships between variables were evaluated using Spearman's correlation coefficient and the Kling-Gupta efficiency index (KGE), the latter applied exclusively for the comparison between variables with compatible units and scales (lake levels). In all other cases, only Spearman's was used because the variables had different units of measurement.

The results show a strong correlation between the corrected AlTiS levels and the DGA records ($r = 0.736$; $KGE = 0.713$). In contrast, the correlation between lake levels and precipitation was moderate ($r = 0.350$), while the relationship between AAO and corrected lake level was low ($r = 0.069$). Finally, the correlation between AAO and precipitation was also weak ($r = 0.108$).

Understanding the variation in Lake Fagnano levels is essential for assessing the effects of climate change in southern Chile. Likewise, the statistical results obtained from the analysis of the variables considered allow the historical levels of the lake to be reconstructed using satellite altimetry.



1. Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Introducción.

La Oscilación Antártica (AAO, por sus siglas en inglés), también conocida como Modo Anular del Sur, es un patrón climático que describe la variabilidad en la intensidad y posición de los vientos del oeste que circulan alrededor del continente antártico, es decir representa las fluctuaciones en la fuerza del vórtice circumpolar (Jones & Widmann, 2004). Este fenómeno presenta dos fases principales: una fase positiva, en la que los vientos circumpolares se intensifican y se contraen hacia el polo, y una fase negativa, en la que dichos vientos se debilitan y se desplazan hacia latitudes más bajas (Silvestri & Vera, 2003).

El índice de la Oscilación Antártica (AAO) se representa mediante valores numéricos que indican su fase. Valores positivos corresponden a una fase activa, caracterizada por vientos del oeste más intensos y concentrados alrededor de la Antártica. En cambio, valores negativos reflejan un debilitamiento de estos vientos y un ensanchamiento hacia el norte del cinturón de vientos del oeste, lo que facilita la incursión de frentes fríos y sistemas de precipitación provenientes de latitudes polares (Justino & Peltier, 2008). Esta dinámica atmosférica influye directamente en la trayectoria de las masas de aire frío, que durante las fases negativas tienden a expandirse hacia el sur de Sudamérica, afectando la frecuencia e intensidad de los sistemas frontales que impactan al extremo austral y centro-sur de Chile (Quintana & Aceituno, 2012).

Dentro de los ecosistemas de agua dulce, los lagos de montaña destacan por su alta sensibilidad a los cambios ambientales, respondiendo con rapidez a variaciones en la temperatura y en las fuentes de aporte hídrico, esta condición los convierte en verdaderos centinelas del cambio climático (Handler et al., 2025). Además, cumplen un rol estratégico como reservas de agua dulce que permiten enfrentar períodos prolongados de sequía, especialmente aquellos que se encuentran alejados de la influencia directa de las actividades humanas (Bahamondez Provoste, 2021).



Según Cordero (Montes, 2024), la Oscilación Antártica (AAO) ha mostrado una tendencia positiva en las últimas cuatro décadas, asociada al cambio climático y al adelgazamiento de la capa de ozono, lo que ha modificado la circulación atmosférica del hemisferio sur. En este escenario, el análisis de los niveles lacustres adquiere especial relevancia, no solo para cuantificar los efectos del cambio climático, sino también por la importancia ecológica y socioeconómica de estos cuerpos de agua: actúan como reservorios de agua dulce, regulan el clima local, almacenan carbono y ofrecen oportunidades para el turismo y la recreación (Magee et al., 2019).

Sin embargo, su respuesta es difícil de predecir, ya que depende de factores propios de cada lago, como la morfometría, la cobertura terrestre y la transparencia del agua, así como de la influencia de procesos como la eutrofización, la acidificación o el uso del suelo (Adrián et al., 2009). Estas particularidades determinan qué indicadores resultan más eficaces en distintas regiones, y pueden generar efectos significativos en los regímenes de precipitación, como ocurre en el lago Fagnano, cuya cuenca está expuesta a oscilaciones climáticas de gran escala.

En este contexto, el presente estudio se propone analizar la variabilidad de los niveles del Lago Fagnano en relación con las precipitaciones influenciadas por la AAO. Para ello, se utilizarán datos altimétricos provenientes del satélite Sentinel-3A, procesados mediante el software AITIS, junto con los registros hidrométricos proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA). Asimismo, se incorporarán datos de precipitación registrados en estaciones meteorológicas ubicadas cercanas a la cuenca del lago, con el fin de establecer posibles correlaciones y tendencias.

El fortalecimiento del monitoreo de los lagos, junto con el desarrollo de técnicas avanzadas de modelado para predecir los procesos lacustres, resulta fundamental para mejorar la comprensión global de sus respuestas frente al cambio climático (Woolway et al., 2020). En particular, el seguimiento del nivel del agua aporta información valiosa sobre el estado ecológico de los ecosistemas lacustres y sobre los factores que impulsan las transformaciones que experimentan (Wantzen et al., 2008). Este tipo de monitoreo es esencial no solo para entender la dinámica de los lagos, sino también para gestionar de



manera sostenible los beneficios que proporcionan al ambiente y a la sociedad (Aminjafari et al., 2024).

Este enfoque busca aportar a la reconstrucción de series de niveles lacustres en aquellos períodos donde los datos oficiales presentan vacíos, fortaleciendo la comprensión del comportamiento hidrológico del sistema. Además, se pretende evaluar el posible impacto de la AAO sobre esta dinámica, con miras a mejorar la toma de decisiones en contextos de incertidumbre climática, especialmente en una zona de relevancia ecológica, turística y binacional.



1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

Analizar la influencia de la Oscilación Antártica sobre las precipitaciones en la cuenca del Lago Fagnano y su relación con la variabilidad de los niveles hídricos en el área de estudio.

1.2.2 Objetivos específicos.

1. Estimar las precipitaciones mensuales en la cuenca del Lago Fagnano mediante el método *Inverse Distance Weighting Squared (IDW²)*, utilizando datos meteorológicos de las estaciones Río Azopardo, Pampa Guanaco, Río Betbeder y Lago Deseado, proporcionados por la DGA.
2. Obtener los niveles del Lago Fagnano a partir de altimetría satelital utilizando el software AlTiS, y comparar estos datos con los niveles registrados por la DGA para aplicar un proceso de compensación.
3. Caracterizar el comportamiento de la AAO y analizar su relación con las precipitaciones y los niveles del Lago Fagnano.
4. Correlacionar las variables de niveles hídricos, precipitaciones e índices de la AAO mediante el coeficiente de Spearman, y evaluar la similitud entre los registros altimétricos y los de la DGA utilizando el índice de Kling-Gupta.
5. Validar el uso de altimetría satelital como herramienta para la reconstrucción de niveles históricos del Lago Fagnano ante vacíos de información en los registros oficiales.

2. Capítulo 2 METODOLOGÍA.

2.1 Área de estudio.

El Lago Fagnano, también conocido como Lago Khami en lengua selk'nam que significa “agua grande”, es un cuerpo de agua binacional compartido por Argentina y Chile. Se ubica en el centro-sur de la isla Grande de Tierra del Fuego, extendiéndose longitudinalmente de oeste a este a lo largo de aproximadamente 117 kilómetros, entre las coordenadas 54°26'–54°37' de latitud sur y 66°42'–68°35' de longitud oeste (Coronato et al., 2009). Su superficie total alcanza los 593 km², de los cuales una parte se encuentra en territorio chileno (7 %), en la comuna de Timaukel, provincia de Tierra del Fuego, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, y otra parte en la provincia argentina (93%) de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur. El lago desemboca en territorio chileno a través del río Azopardo (Gobierno de Argentina, 2015).

El Lago Fagnano es de origen glaciar y está considerado uno de los más extensos del mundo en su tipo. Rodeado por paisajes cordilleranos, bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) y coigüe (*Nothofagus dombeyi*), se integra a diversas áreas protegidas, como la Reserva Provincial Corazón de la Isla (Argentina) y el Parque Nacional Tierra del Fuego en su sector occidental (Instituto Fueguino de Turismo, 2025). La cuenca hidrográfica del lago posee una superficie aproximada de 3.470 km² y un perímetro de 639 km, tal y como se aprecia en la Figura 1.

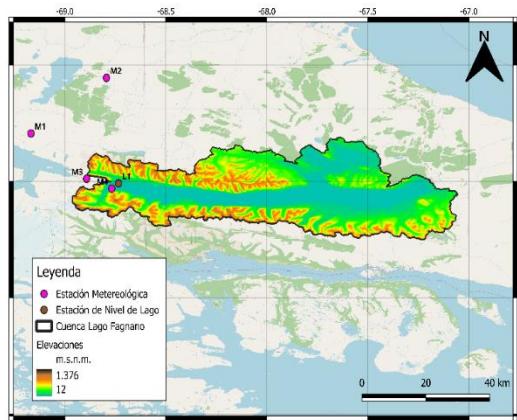


Figura 1.-Ubicación de la cuenca Lago Fagnano. Fuente: Elaboración propia



Una característica destacada del Lago Fagnano es su ubicación sobre la falla tectónica Magallanes-Fagnano, la cual marca el límite entre las placas Sudamericana y de Scotia. Esta fractura geológica atraviesa el fondo del lago, generando un desplazamiento promedio de cinco milímetros por año en dirección este-oeste, y es clave en la configuración morfológica del territorio fueguino (La Lupa, 2019).

El clima en la región del Lago Fagnano corresponde al tipo tundra polar (ET) o clima de tundra según la clasificación de Köppen-Geiger, caracterizado por inviernos largos, oscuros y fríos, y los veranos cortos y frescos, con precipitaciones distribuidas a lo largo de todo el año sin una estación seca. Cabe mencionar que la mayor parte de las precipitaciones cae en forma de nieve (Kottek et al., 2006). En este tipo de clima, las temperaturas oscilan entre los 0°C y los 10°C, con al menos un mes lo suficientemente cálido para derretir la nieve. Las temperaturas en esta zona son tan frías que existe una capa de suelo permanentemente congelado bajo la superficie, llamada permafrost. Entre los meses de noviembre a abril, la región tiene de entre 12 y 17 horas de luz solar diaria, mientras que, en los meses de junio a agosto, la duración de la luz natural se reduce a cerca de 7 horas diarias. Durante el invierno, las temperaturas pueden descender considerablemente, dando lugar a intensas nevadas. El viento es un factor predominante en la región entre diciembre y marzo, y las precipitaciones son más frecuentes en el período comprendido entre mayo y septiembre (Filmagallanes, Gobierno Regional de Magallanes y CORFO, 2025).

El lago y su entorno también tienen relevancia cultural y turística. La localidad argentina de Tolhuin, cercana a su extremo oriental, sirve como principal punto de acceso. En la zona se pueden realizar actividades como senderismo, pesca deportiva, avistamiento de aves y fotografía de paisajes. Las costas del lago ofrecen servicios turísticos limitados, como hosterías, cabañas y zonas de camping (Ministerio de Turismo y Deportes, 2025).



2.2 Obtención de Datos Altimétricos mediante ALTiS.

ALTiS (Altimetry Time Series) es un software especializado para el procesamiento de datos altimétricos provenientes de satélites, cuyo objetivo principal es generar series temporales de elevación de cuerpos de agua, como ríos y lagos. Su mayor utilidad radica en el análisis hidrológico de regiones sin estaciones de monitoreo in situ o con acceso restringido. Para ello, ALTiS aprovecha la tecnología de altimetría satelital para derivar niveles de agua a partir de datos orbitales, constituyéndose en una herramienta fundamental para estudios hidrológicos, climáticos y de monitoreo de recursos hídricos (Aminjafari et al., 2024).

El software se ejecuta dentro del entorno de programación Anaconda, mediante la activación de un ambiente virtual que contiene todos los paquetes necesarios. Desde allí es posible importar, visualizar, depurar y analizar los datos descargados desde plataformas oficiales, como la correspondiente al satélite Sentinel-3A.

Para cumplir sus objetivos, ALTiS se fundamenta en el principio de la altimetría satelital. En este proceso, un satélite emite pulsos de microondas que rebotan en la superficie terrestre y, midiendo el tiempo que tarda en regresar, se determina la distancia entre el satélite y la superficie. Esta medición se ajusta considerando la altura del geoide terrestre y se corrige por efectos atmosféricos, como nubes y vapor de agua (Oularé et al., 2022). Por ende, ALTiS ofrece la visualización de diversas variables contenidas en los registros geofísicos (GDR) de cada misión, tales como la altura del satélite (H), el alcance del radar (R_0), las correcciones aplicadas (ΣR) y el nivel estimado de superficie libre ($h = H - R_0 - \Sigma R$). También incluye parámetros adicionales, como coeficientes de retrodispersión, intensidad del pulso y temperaturas de brillo del radiómetro. Estas funcionalidades, combinadas con herramientas de selección y limpieza de datos, permiten construir series temporales basadas en estadísticos centrales (mediana, media y desviaciones), reduciendo la influencia de valores atípicos (Fuentes-Aguilera et al., 2024).

El resultado son series de elevación georreferenciadas, cuya frecuencia depende del ciclo orbital de cada misión, generalmente entre 6 y 27 días. Estas series permiten analizar variaciones en lagos o ríos y compararlas con variables climáticas e hidrológicas, como precipitaciones, deshielo o fenómenos como la AAO.



El software es compatible con datos de múltiples misiones satelitales de altimetría radar, lo que posibilita extender y combinar registros de nivel desde principios de la década de 1990 hasta la actualidad. Entre las misiones integradas se incluyen: TOPEX/Poseidon (1992–2006), primera dedicada a altimetría oceánica de precisión; ERS-2 (1995–2003) y ENVISAT (2002–2010), que garantizaron continuidad en banda Ku en modo LRM; la serie Jason-1 (2001–2013), Jason-2 (2008–2019) y Jason-3 (2016–presente), sucesoras de TOPEX en la misma órbita de referencia; Sentinel-6/Jason-CS (2020–presente), que asegura la continuidad del registro Jason; SARAL/AltiKa (2013–2016), primera misión en operar en banda Ka sobre aguas continentales; CryoSat-2 (2010–presente), que incorporó el modo SAR (delay-Doppler); y Sentinel-3A (2016–presente) y Sentinel-3B (2018–presente), que mejoraron la precisión sobre lagos medianos y pequeños mediante modo SAR. Más recientemente, SWOT (2022–presente) introdujo el instrumento KaRIn, capaz de mapear en dos dimensiones la superficie completa de los cuerpos de agua (Blarel et al., 2023; Frappart et al., 2018, 2021).

En este estudio, los datos procesados mediante AlTiS provienen del satélite Sentinel-3A, lanzado el 16 de febrero de 2016 por la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del programa Copernicus. Este satélite opera en una órbita heliosíncrona a 815 km de altitud, con inclinación de 98,65°, ciclo de repetición de 27 días y separación ecuatorial aproximada de 105 km (The European Space Agency, 2025). Su vida útil estimada supera los siete años, con planes de lanzar las unidades S3C y S3D para garantizar continuidad y coherencia en la serie de datos climáticos por más de 15 años (Quarly et al., 2020).

Entre los instrumentos a bordo destacan:

- SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*): mide la temperatura superficial del mar y de la tierra.
- OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*): monitorea el color de océanos y superficies continentales.
- SRAL (*SAR Radar Altimeter*): altímetro de radar de apertura sintética que provee mediciones precisas de nivel.



- MWR (*Microwave Radiometer*): permite la corrección atmosférica de las señales altimétricas.
- DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*): determina la órbita con alta precisión (Frery et al., 2020).

Los principales servicios de Sentinel-3A están orientados al monitoreo ambiental de océanos, costas y superficies continentales, además de la gestión de riesgos naturales y estudios físico-biogeoquímicos. En el presente trabajo se emplean exclusivamente los datos altimétricos del instrumento SRAL (Deng & Peng, 2020), con el objetivo de analizar la evolución del nivel del Lago Fagnano en relación con variables climáticas regionales, particularmente la AAO, que incide directamente en la dinámica atmosférica y de precipitaciones.

Dado que la órbita de Sentinel-3A cruza el Lago Fagnano en cuatro secciones diferentes, el análisis se segmenta en tramos correspondientes a estas intersecciones orbitales, permitiendo obtener estimaciones más precisas de los niveles del lago mediante el software.

A continuación, se detalla el procedimiento seguido para la ejecución de ALTiS y el procesamiento de los datos altimétricos utilizados en este estudio.

1. Preparación y carga de datos

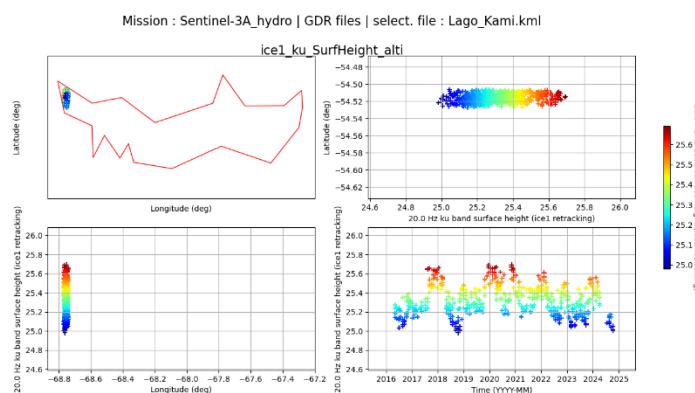
1. Desde la base de datos de CTOH (Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère), descargar los datos altimétricos del satélite (Sentinel-3A), seleccionando un área rectangular que incluya el cuerpo de agua de interés (Lago Fagnano).
2. Cada archivo descargado representa una pasada del satélite, proporcionando datos de un día específico.
3. En Google Earth, delinear un polígono que englobe el lago (usando la herramienta “polígono”) y exportarlo en formato .KML, compatible con ALTiS.

2. Procesamiento en ALTiS

1. En el software ALTiS, importar los datos descargados.

2. Seleccionar la opción “GDR TRACKS”.
 3. Elegir el satélite Sentinel-3A.
 4. Indicar que se está trabajando con un río o lago.
 5. Cargar el archivo .KML que contiene el polígono del área de estudio.
 6. Activar la capa superior ICE1, y luego activar la opción "ríos y lagos con líneas costeras" para facilitar la visualización de los datos.
3. Delimitación y validación del área de interés
1. Utilizar la herramienta “*Data Select*” para seleccionar manualmente el área exacta del lago que contiene datos relevantes.
 2. Validar la selección presionando la tecla “V”.
 3. Aplicar las opciones “*Refresh*” y “*Rescale*” para ajustar visualmente los datos.
4. Limpieza y filtrado de datos
1. Identificar puntos anómalos, como valores negativos (elevaciones bajo 0 que no corresponden a un lago).
 2. Seleccionar estos datos con la herramienta *Data Select*, presionar la tecla “R” (reversa), luego validar nuevamente con “V”, aplicar *Refresh* y *Rescale*.
 3. Repetir este proceso para todos los valores que estén fuera del rango normal (valores muy dispersos o atípicos).

En la Figura 2, se muestra un ejemplo de un tramo depurado.



*Figura 2.- Ejemplo de procesamiento de datos altimétricos en AlTiS. Fuente:
Elaboración Propia*



5. Generación de la serie de tiempo

1. Una vez depurada la base de datos, ingresar a la opción “Series de Tiempo”.
2. Interpretar la visualización: La línea azul representa los datos medidos in situ (por ejemplo, registros de la Dirección General de Aguas - DGA). Los puntos rojos representan los datos obtenidos del satélite con AlTiS.

En la Figura 3, se muestra un ejemplo del “time series”.

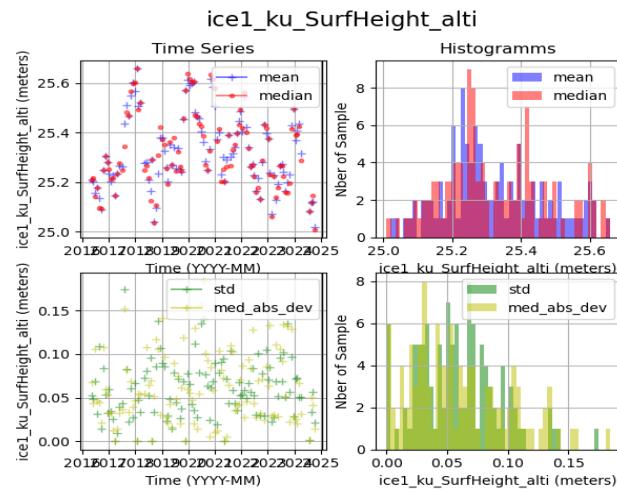


Figura 3.- Serie de tiempo. Fuente: Elaboración propia.

6. Exportación de resultados

1. Exportar los datos procesados en formato Excel para su análisis externo y comparación con otras variables como precipitaciones y niveles registrados por la DGA del lago Fagnano. (Frappart et al., 2021)



2.3 Compensación datos de nivel de AITiS.

2.3.1 Niveles del lago Fagnano por la DGA.

Una vez obtenidos los niveles del Lago Fagnano a partir de datos satelitales mediante altimetría radar, es necesario compararlos con los registros oficiales proporcionados por la DGA, los cuales provienen de estaciones de monitoreo instaladas en terreno.

Cabe señalar que no todos los cuerpos lacustres del país cuentan con estaciones hidrométricas asociadas; sin embargo, para la zona de estudio correspondiente al Lago Fagnano sí existen registros disponibles. Por tanto, se procedió a solicitar por Ley de Transparencia esta información a la DGA con el fin de disponer de una base de datos confiable que permita contrastar y compensar los niveles estimados por satélite (Sentinel-3A) con las observaciones *in situ*, mejorando así la precisión y validez del análisis altimétrico.

2.3.2 Compensación de los datos.

Para llevar a cabo la compensación de los datos de nivel obtenidos mediante altimetría satelital, fue necesario ajustar y hacer coincidir los períodos temporales disponibles tanto de los registros satelitales como de los proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA). Los datos de nivel entregados por la DGA abarcan desde el 28 de noviembre de 2002 hasta el 31 de enero de 2021, mientras que los datos altimétricos del satélite Sentinel-3A corresponden al periodo comprendido entre el 14 de abril de 2016 y el 10 de octubre de 2024.

Con el fin de realizar una comparación adecuada entre ambas fuentes y además de tener concordancia con las demás variables a analizar, se definió un intervalo común de análisis desde el 14 de abril de 2016 hasta el 30 de octubre de 2020. Dentro de este rango, se identificaron las fechas en que existían datos altimétricos disponibles y se contrastaron con los registros diarios de la DGA. Cabe señalar que, aunque los datos de la DGA presentan una frecuencia diaria, existen ciertas fechas sin registros disponibles.

Por esta razón, en etapas posteriores se evaluará la correlación entre ambas series con el propósito de verificar la viabilidad de utilizar los datos altimétricos como base para la reconstrucción de los niveles del lago en los casos en que los registros de la DGA presenten vacíos.



Para obtener una serie de niveles corregidos a partir de los datos provenientes de ALTiS y de los registros de la DGA, se aplicó el siguiente procedimiento de compensación:

1. Emparejamiento temporal: Se agruparon los datos de nivel del lago obtenidos por ALTiS con los correspondientes registros diarios de la DGA, considerando únicamente aquellas fechas en que ambas fuentes presentaban información disponible.
2. Cálculo de diferencias: Para cada fecha coincidente, se calculó la diferencia entre el valor de nivel registrado por la DGA y el correspondiente valor altimétrico entregado por ALTiS.
3. Determinación del factor de corrección: A partir del conjunto de diferencias obtenidas, se calculó el valor promedio, el cual representa un factor de corrección sistemático entre ambas series.
4. Aplicación del ajuste: Este promedio fue sumado a todos los valores generados por ALTiS, obteniéndose así una serie de niveles compensados del lago Fagnano, ajustados respecto a la referencia de los datos proporcionados por la DGA.



2.4 Datos Meteorológicos.

Para analizar los niveles del Lago Fagnano, se utilizaron datos de precipitación provenientes de estaciones meteorológicas monitoreadas por la DGA cercanas al área de estudio. En este caso, se seleccionaron las estaciones de Pampa Guanaco, Lago Deseado, Río Betbeder y Río Azopardo.

Si bien existen otras estaciones en la región, estas no fueron consideradas debido a su lejanía, lo cual podría comprometer la representatividad de los datos en relación con el comportamiento real de la cuenca. A mayor cercanía de una estación respecto al lago, mayor será la relación esperada en la estimación de las precipitaciones que influyen directamente en sus niveles (Aragón-Hernández et al., 2019).

Los datos de precipitación utilizados en este trabajo corresponden a registros mensuales de las estaciones meteorológicas previamente mencionadas. Aunque estas estaciones presentan distintos períodos de operación, para mantener consistencia con los datos altimétricos obtenidos mediante el software ALTiS, se definió un intervalo de análisis común entre todas ellas, comprendido entre abril de 2016 y octubre de 2020. A pesar de que algunas estaciones continúan operando hasta el año 2025, los datos posteriores a octubre de 2020 son escasos o incompletos, por lo que se optó por trabajar exclusivamente con el periodo mencionado para asegurar mayor confiabilidad en los resultados.

La ubicación geográfica de las estaciones utilizadas se presenta en la Figura 1, y sus principales características se detallan en la Tabla 1.



Tabla 1.-Características estaciones meteorológicas Lago Deseado, Pampa Huanaco, Río Betbeder y Río Azopardo. Fuente:
Elaboración propia

Nombre Estación	Código BNA	Altitud (msnm)	UTM Este (m)	UTM Norte (m)
LAGO DESEADO	12879000-4	170	511336	3978576
PAMPA HUANACO	12876003-2	150	512883	4010794
RÍO BETBEDER EN DESEMBOCADURA	12825003-4	60	511924	3953912
RÍO AZOPARDO EN DESEMBOCADURA	12825002-6	32	511283	3960525

2.4.1 Características de las estaciones meteorológicas utilizadas.

La Tabla 1 presenta las características generales de las estaciones meteorológicas utilizadas para este estudio, cuyos datos fueron obtenidos desde el portal de la DGA. En la Tabla 1 se incluyen el nombre de la estación, código BNA, ubicación geográfica (coordenadas UTM), altitud, y códigos administrativos correspondientes a cuenca y subcuenca. Todas las estaciones seleccionadas se ubican dentro de la comuna de Timaukel, provincia de Tierra del Fuego, región de Magallanes y de la Antártica Chilena, y fueron escogidas por su cercanía con el Lago Fagnano.

2.4.2 Relleno de datos faltantes en registros de precipitación.

Para completar los datos faltantes dentro del periodo seleccionado, se aplicó un procedimiento de ajuste lineal utilizando como referencia las estaciones con registros completos. Posteriormente, se seleccionó la estación con el mayor R^2 para utilizar su ecuación de regresión como base para estimar los valores faltantes (Carrera-Villacrés et al., 2016). Este procedimiento fue aplicado mes a mes y año a año, asegurando que todos los datos de precipitación estuvieran alineados con el periodo de funcionamiento de los satélites utilizados para el análisis altimétrico (2016 en adelante).



2.5 Método de Interpolación Inversa del Cuadrado de la Distancia (IDW²).

2.5.1 Centroide de la Cuenca.

Dado que el análisis de precipitaciones debe considerar toda el área que aporta escorrentía al Lago Fagnano, no es suficiente utilizar un punto ubicado directamente sobre el lago. Es necesario identificar un punto representativo de la cuenca hidrográfica completa, para lo cual se emplea el centroide de dicha cuenca como referencia. Este punto fue determinado mediante el software Global Mapper.

Una vez determinado el centroide de la cuenca se calculan las distancias que se tienen desde el centroide hasta cada estación mencionada en el punto 2.2, este procedimiento permite establecer un punto de referencia único y objetivo dentro de la cuenca, fundamental para la aplicación de la fórmula de ponderación de precipitaciones en función de la distancia.

2.5.2 Aplicación del Método IDW² (*Inverse Distance Weighting Squared*).

Si bien existen diversos métodos para estimar la precipitación en una cuenca, como el método de los polígonos de Thiessen, en este estudio se optó por utilizar el método de ponderación inversa al cuadrado de la distancia, debido a su alta confiabilidad reportada en la literatura y a las diferencias poco significativas que presenta en comparación con el método de Thiessen (Pizarro et al., 2003; Otieno et al., 2014).

Este método se basa en una fórmula de interpolación, mediante la cual se estima la precipitación media en la cuenca a partir de los valores registrados en las estaciones meteorológicas más cercanas. La fórmula asigna a cada estación un peso (w) inversamente proporcional al cuadrado de su distancia al centroide de la cuenca, previamente definido como punto representativo. Cada valor de precipitación mensual (obtenido desde la DGA) se multiplica por su respectivo peso (como se muestra en la ecuación 1), de modo que las estaciones más cercanas tienen una mayor influencia en el cálculo del valor final estimado (Pizarro et al., 2003).

Este método permite obtener una estimación más representativa de las precipitaciones mensuales que afectan directamente la cuenca del Lago Fagnano, a partir de los registros disponibles. Además, facilita el estudio de las variaciones temporales (en milímetros) de las precipitaciones en el área de interés, lo cual permite en el presente estudio analizar y



comparar la relación de las precipitaciones en la cuenca con los niveles del lago Fagnano. A continuación, se presenta en la ecuación (1) el Método IDW² (*Inverse Distance Weighting Squared*) (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2025.).

$$Precipitación\ Cuenca = \frac{\sum_{i=1}^n p_i * \frac{1}{D_{i^2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_{i^2}}} \quad (1)$$

En la Tabla 2 se presenta la contribución relativa de cada estación meteorológica, determinada en función de su distancia al centroide de la cuenca. A menor distancia, mayor es el peso asignado a la estación en el cálculo de la precipitación promedio.

Tabla 2.- Distancias al centroide, peso (w) y porcentaje de influencia al cálculo de precipitaciones. Fuente: Elaboración propia

Estación	Río Betbeder	Pampa Huanaco	Lago Deseado	Río Azopardo
Distancia a Centroide (km)	52,74	77,21	83,65	61,17
Peso (w)	0,000359517	0,000167746	0,000142912	0,000267253
% de Ponderación	38,35	17,89	15,25	28,51

Una vez obtenidas las distancias entre el centroide de la cuenca y cada estación meteorológica, se procede al cálculo de la precipitación mensual estimada para la cuenca, utilizando los registros de las cuatro estaciones seleccionadas.



2.6 Oscilación Antártica (AAO).

Con el fin de evaluar la influencia de los patrones de circulación atmosférica de gran escala sobre las precipitaciones y niveles del Lago Fagnano, en este estudio se incorpora el análisis de la Oscilación Antártica (*Antarctic Oscillation*, AAO). Este fenómeno representa una de las principales modalidades de variabilidad atmosférica del hemisferio sur y se caracteriza por un vaivén en la presión atmosférica a nivel del mar entre las latitudes medias (~40°S) y altas (~65°S), con efectos relevantes sobre el régimen de vientos, precipitaciones y temperatura en zonas australes (Hu et al., 2023).

La AAO constituye un modo de variabilidad atmosférica que se manifiesta desde la troposfera media-alta hasta la estratosfera polar, lo que refleja su carácter profundo dentro de la circulación del hemisferio sur (Thompson & Wallace, 2000). El fenómeno nace de la interacción entre el gradiente meridional de temperatura (entre latitudes subtropicales y polares) y el balance de viento térmico, que obliga a la intensificación de los vientos del oeste en la medida que dicho gradiente aumenta con la altura (Vallis, 2017). A este forzamiento térmico se suma la acción de los remolinos baroclínicos (eddies), que redistribuyen momento hacia los jets, reforzando y desplazando el cinturón del oeste. En el hemisferio sur, la ausencia de grandes barreras orográficas en el Océano Austral favorece que este patrón adquiera una configuración anular y persistente (Marshall, 2003).

El cinturón de los vientos del oeste tiene su origen en el contraste térmico entre los trópicos y la Antártica, la estructura de la célula de Ferrel y el transporte de calor y momento generado por la inestabilidad baroclínica (Holton & Hakim, 2013).

Según la definición propuesta por Gong y Wang (1999), la AAO describe un patrón anular de alternancia de presión superficial, en el cual fases positivas se asocian a mayor presión en latitudes medias y menor presión sobre la Antártica, generando un reforzamiento del cinturón de vientos del oeste que tiende a desplazar los sistemas frontales y de tormentas hacia latitudes más australes. En consecuencia, durante fases positivas se observa una disminución de precipitaciones en regiones como el sur de Chile continental y Tierra del Fuego. Por el contrario, en fases negativas la presión en latitudes medias es relativamente baja y se debilita la circulación zonal, permitiendo la incursión



más frecuente de sistemas húmedos hacia el norte, favoreciendo las precipitaciones en dichas zonas.

Para representar cuantitativamente la AAO, Gong y Wang (1999) definieron el Índice de Oscilación Antártica (AOI) como la diferencia entre la presión promedio zonal normalizada a nivel del mar en dos bandas latitudinales clave (2):

$$AOI = P_{40^{\circ}S} - P_{65^{\circ}S} \quad (2)$$

Donde $P_{40^{\circ}S}$ y $P_{65^{\circ}S}$ corresponden a las presiones mensuales promediadas zonalmente y normalizadas para cada latitud. Este índice fue construido a partir de análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) aplicadas a datos de presión superficial del reanálisis NCEP/NCAR, y permitió detectar un patrón persistente de oposición de presión entre ambas zonas.

En este estudio, se analizará la variabilidad temporal del AOI y su posible relación con las precipitaciones observadas en estaciones ubicadas dentro y en las proximidades de la cuenca del Lago Fagnano, considerando también su impacto sobre los niveles altimétricos del lago obtenidos mediante altimetría satelital y posteriormente corregidos. La influencia de la AAO se considera un factor relevante para explicar las variaciones interanuales o estacionales en el nivel del lago. Así, se buscará establecer correlaciones estadísticas entre el AOI, las precipitaciones acumuladas y los niveles hídricos, con el fin de evaluar el grado de asociación entre la circulación atmosférica de gran escala y el comportamiento hidrológico local.



2.7 Validación de los datos mediante Spearman y Kling-Gupta Efficiency (KGE).

Con el fin de evaluar la consistencia y la relación entre las distintas variables analizadas en esta investigación, como los niveles del Lago Fagnano obtenidos mediante altimetría satelital (ALTIS), los registros observados por la DGA, los datos de precipitación y los índices climáticos como la AAO, se aplicaron dos enfoques estadísticos complementarios: el coeficiente de correlación de Spearman y el índice de eficiencia de Kling–Gupta (KGE).

El análisis de correlación constituye una metodología estadística descriptiva ampliamente utilizada en investigaciones aplicadas, cuyo objetivo principal es estimar el nivel de asociación entre las variables de estudio. A diferencia de las pruebas inferenciales, las medidas de correlación son indicadores descriptivos que permiten identificar la dirección, fuerza y grado de relación entre dos o más variables, sin implicar necesariamente causalidad (Morales & Rodríguez, 2016). Es decir, que dos variables se encuentren correlacionadas no significa que una sea causa de la otra, ya que la relación puede deberse al azar o a la intervención de una tercera variable (Kenny, 1979).

En términos generales, el coeficiente de correlación toma valores entre -1 y $+1$, donde los extremos indican asociación perfecta (negativa o positiva) y los valores cercanos a cero reflejan ausencia de relación (Martínez Ortega et al., 2009).

Existen tres coeficientes de correlación ampliamente utilizados en el análisis de datos: Pearson, Spearman y Kendall, cuya elección depende de la naturaleza de las variables. Pearson es adecuado para variables cuantitativas que cumplen supuestos de normalidad y escala de intervalo o razón. Por su parte, el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, propuesto en 1904, resulta especialmente útil cuando: Las variables presentan escalas de medida al menos ordinales o las variables cuantitativas no siguen una distribución normal (Morales & Rodríguez, 2016).

Spearman puede considerarse análogo al coeficiente de Pearson, pero calculado a partir de los rangos de los valores originales en lugar de los valores mismos, manteniendo el mismo rango de interpretación entre -1 y $+1$. En esta misma línea, cuando se aplica a variables cuantitativas, la asociación que refleja Spearman corresponde a las posiciones relativas o rangos de los datos, y no a sus valores absolutos (Morales & Rodríguez, 2016).



Por otro lado, el índice de eficiencia KGE surge como una alternativa a la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), ya que permite evaluar de manera equilibrada la correlación, el sesgo medio y la variabilidad de los datos estimados. A diferencia de un análisis que solo considera la tendencia reflejada en la correlación, el KGE integra además la coincidencia en magnitud, escala y variabilidad, lo que ofrece una visión más completa de la similitud entre dos series de datos. Así, aunque puedan presentar una correlación elevada, un valor bajo de KGE evidenciaría que no son directamente comparables en cuanto a su escala o unidades (Gupta et al., 2009).

En el caso específico de los niveles del lago Fagnano obtenidos desde registros de la DGA y los derivados del procesamiento ALTIS corregido, resulta válido aplicar una reconstrucción de niveles del lago solo si previamente se verifica que ambas series presentan resultados consistentes, es decir, una correlación significativa y un KGE favorable. Si se cumplen ambas condiciones, alta correlación y un KGE adecuado, se podría justificar la reconstrucción de los niveles del lago en aquellos períodos donde no existan datos disponibles por parte de la DGA.

No se aplicará el índice KGE para comparar las precipitaciones con los niveles del lago corregidos, ya que se trata de variables con unidades y escalas distintas, lo que invalida cualquier análisis basado en la similitud absoluta de magnitudes. Por esta razón, en estos casos se utilizará únicamente el coeficiente de correlación de Spearman, que permite evaluar la existencia de una relación estadística significativa entre variables, independientemente de su escala o unidad. Este mismo criterio se aplicará para analizar la relación entre la AAO y los niveles del lago corregidos, así como entre la AAO y las precipitaciones. En ambos casos, el uso del índice KGE no es adecuado, ya que la disparidad de escalas entre las variables podría arrojar valores negativos o no representativos. Por tanto, el análisis se limitará al uso del coeficiente de Spearman, con el objetivo de identificar posibles correlaciones significativas entre estas variables, sin evaluar similitudes en magnitud absoluta.



2.7.1 Kling – Gupta Efficiency.

Este indicador, ampliamente utilizado en hidrología, permite evaluar de manera integral el comportamiento del modelo en términos de correlación, sesgo y variabilidad, sin requerir un ajuste lineal previo.

El índice se calcula según la ecuación (3):

$$KGE = 1 - \sqrt{((r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2)} \quad (3)$$

donde:

- r es el coeficiente de correlación lineal entre los niveles estimados por ALTIS y los observados por la DGA.
- α representa la razón entre las desviaciones estándar de ambas series (variabilidad relativa).
- β es la razón entre los promedios de las dos series (sesgo).

Un valor de $KGE \geq 0.6$ se considera aceptable en la literatura para indicar una concordancia adecuada entre los datos comparados (Knoben et al., 2019). En este estudio, este índice se utiliza como medida complementaria a la correlación de Spearman, aportando una validación más robusta del proceso de compensación aplicado a los datos altimétricos (Fuentes-Aguilera et al., 2024).

2.7.2 Spearman.

Según Martínez Ortega et al. (2009) el coeficiente de correlación de Spearman (r), es un método estadístico paramétrico el cual mide la intensidad y dirección de la asociación monotónica entre dos variables, asignando valores entre -1 y 1. La correlación entre los datos medidos mediante r dependerá del valor obtenido y será:

- $r = 0$: No existe correlación, de haber valores cercanos a 0 (tanto positivos como negativos), se considera una relación neutra.
- $r > 0$: Al aumentar una de las variables, la otra aumenta (relación directa).



- $r < 0$: Al aumentar una de las variables, la otra disminuye (relación indirecta o inversa).
- $0 < r < 0,25$: Relación escasa o nula.
- $0,26 < r < 0,50$ Relación débil.
- $0,51 < r < 0,75$ Relación entre moderada y fuerte.
- $0,76 < r < 1$ Relación entre fuerte y perfecta.

El coeficiente r está dado por la ecuación (4)

$$r = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

- d_i : Diferencia entre los rangos de los valores observados en la posición i .
- n : Número total de pares de datos.

3. Capítulo 3 RESULTADOS.

3.1.- Relleno de datos de precipitación.

Ajuste de datos faltantes - Estación Rio Azopardo. Estación utilizada: Río Betbeder.

Para completar los datos faltantes de la estación Río Azopardo, se establecieron relaciones lineales con las estaciones Lago Deseado y Río Betbeder, mediante gráficos de dispersión. No fue posible establecer una relación con la estación Pampa Huanaco, ya que ambas compartían vacíos de información en las mismas fechas, impidiendo la aplicación del ajuste lineal en dichos casos.

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 4 y 5, correspondientes a los gráficos de dispersión realizados en Microsoft Excel. Las relaciones ajustadas fueron las siguientes:

- I. Entre Lago Deseado y Río Azopardo. Ecuación (5):

$$\text{Río Azopardo} = 1,701 \cdot \text{Lago Deseado} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,820$$

- II. Entre Rio Betbeder y Río Azopardo. Ecuación (6):

$$\text{Río Azopardo} = 1,029 \cdot \text{Río Betbeder} \quad (6)$$

$$R^2 = 0,963$$

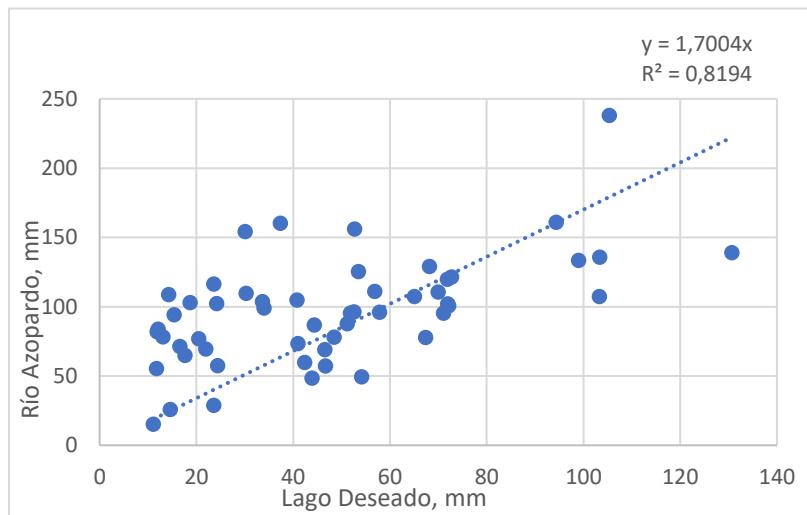


Figura 4.- Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Azopardo-Lago Deseado. Fuente: Elaboración propia.

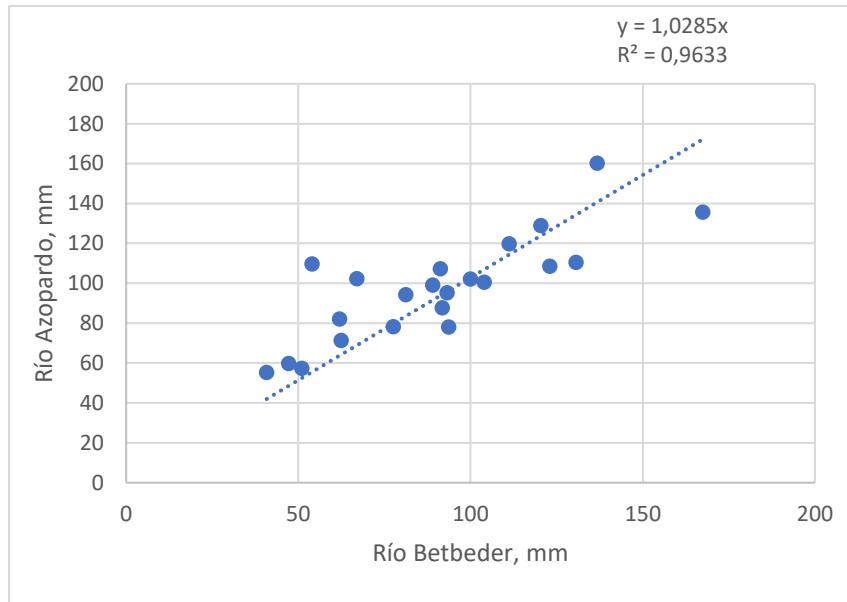


Figura 5.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Azopardo-Río Betbeder. Fuente: Elaboración propia.

Ajuste de datos faltantes - Estación Lago Deseado

En el caso particular de esta estación, no fue necesario realizar un proceso de relleno de datos, ya que cuenta con el registro completo de precipitaciones requerido para el período de análisis.

Ajuste de datos faltantes - Estación Pampa Huanaco. Estación utilizada: Lago Deseado.

Para completar los datos faltantes de la estación Pampa Huanaco, se establecieron relaciones lineales con las estaciones Lago Deseado, Río Betbeder y Río Azopardo, mediante gráficos de dispersión.

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 6,7 y 8, correspondientes a los gráficos de dispersión realizados en Microsoft Excel. Las relaciones ajustadas fueron las siguientes:

III. Entre Lago Deseado y Pampa Huanaco. Ecuación (7):

$$\text{Pampa Huanaco} = 0,655 \cdot \text{Lago Deseado} \quad (7)$$
$$R^2 = 0,898$$

IV. Entre Río Betbeder y Pampa Huanaco. Ecuación (8):

$$\text{Pampa Huanaco} = 0,386 \cdot \text{Río Betbeder} \quad (8)$$



$$R^2 = 0,842$$

V. Entre Río Azopardo y Pampa Huanaco. Ecuación (9):

$$\text{Pampa Huanaco} = 0,339 \cdot \text{Río Azopardo} \quad (9)$$

$$R^2 = 0,836$$

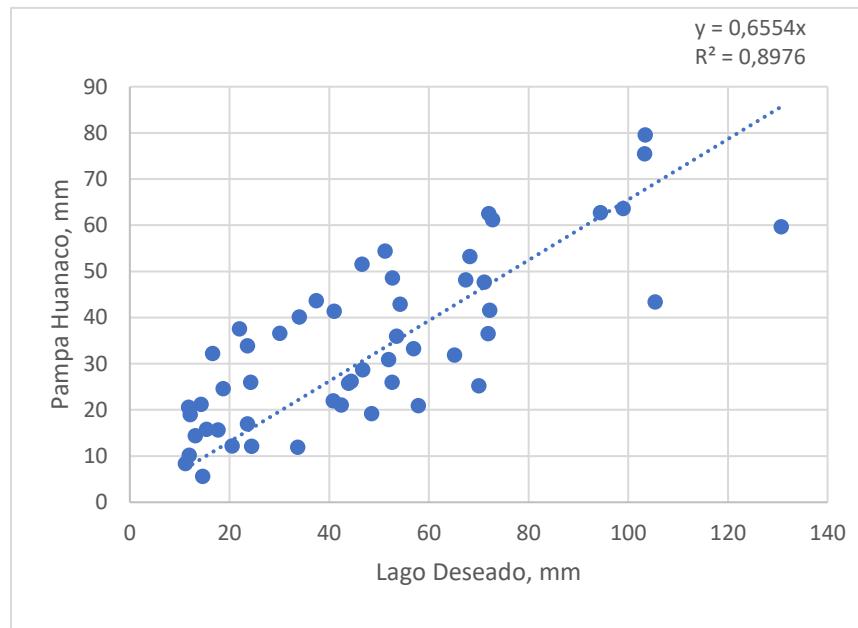


Figura 6.- Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Pampa Huanaco-Lago Deseado. Fuente: Elaboración propia.

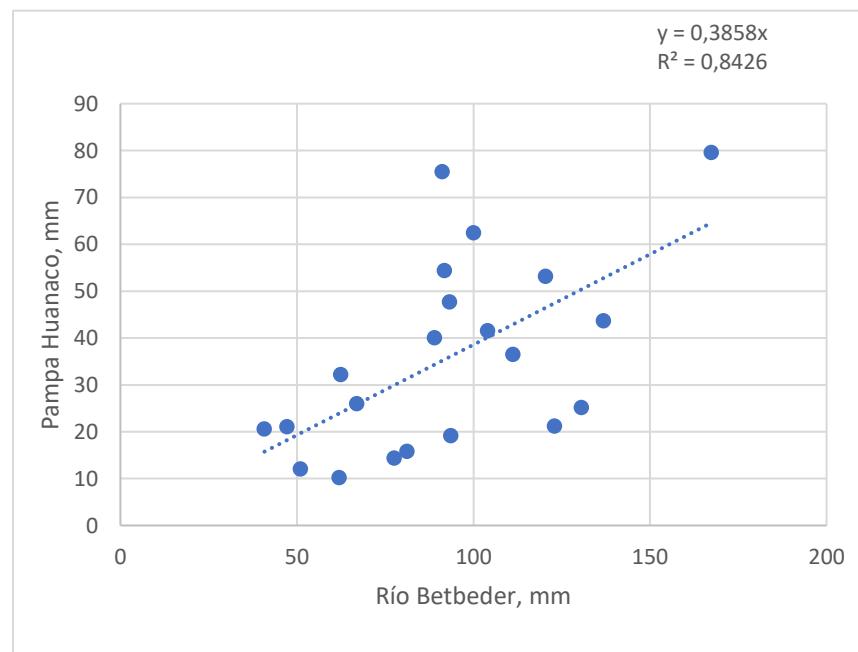


Figura 7.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Pampa Huanaco-Río Betbeder. Fuente: Elaboración propia.

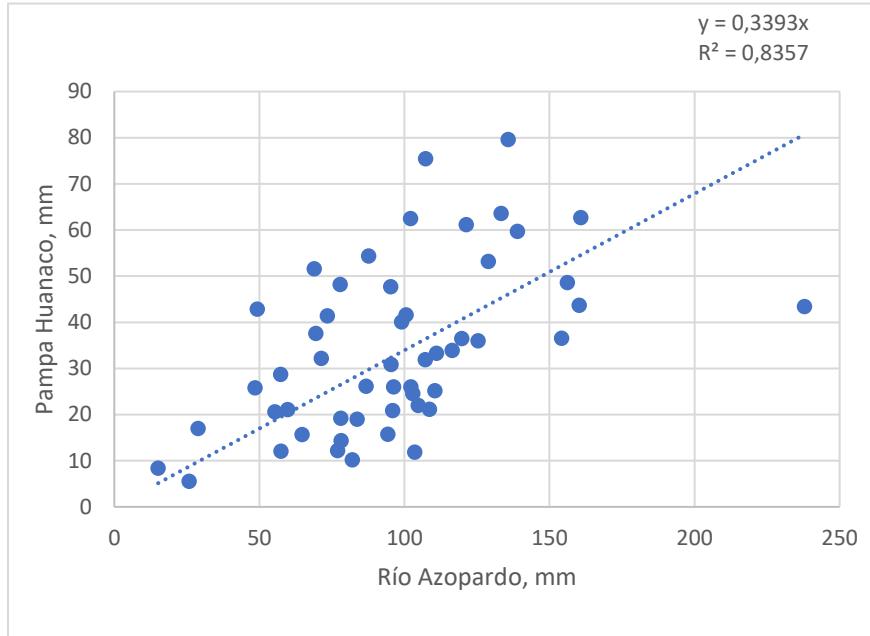


Figura 8.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Pampa Huanaco-Río Azopardo. Fuente: Elaboración propia.

Ajuste de datos faltantes - Estación Río Betbeder. Estación utilizada: Río Azopardo.

Para completar los datos faltantes de la estación Río Betbeder, se establecieron relaciones lineales con las estaciones Lago Deseado, Río Betbeder y Río Azopardo, mediante gráficos de dispersión.

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 9,10 y 11, correspondientes a los gráficos de dispersión realizados en Microsoft Excel. Las relaciones ajustadas fueron las siguientes:

VI. Entre Lago Deseado y Río Betbeder. Ecuación (10):

$$\text{Río Betbeder} = 1,645 \cdot \text{Lago Deseado} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,813$$

VII. Entre Río Azopardo y Río Betbeder. Ecuación (11):

$$\text{Río Betbeder} = 0,937 \cdot \text{Río Azopardo} \quad (11)$$

$$R^2 = 0,963$$

VIII. Entre Pampa Huanaco y Río Betbeder. Ecuación (12):

$$\text{Río Betbeder} = 2,184 \cdot \text{Pampa Huanaco} \quad (12)$$

$$R^2 = 0,842$$

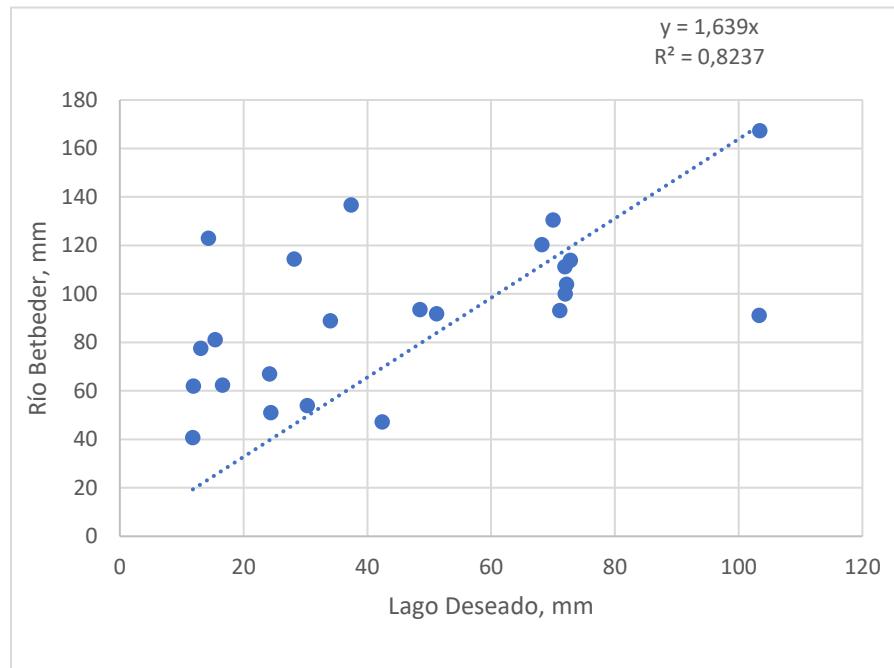


Figura 9.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Betbeder-Lago Deseado. Fuente: Elaboración propia.

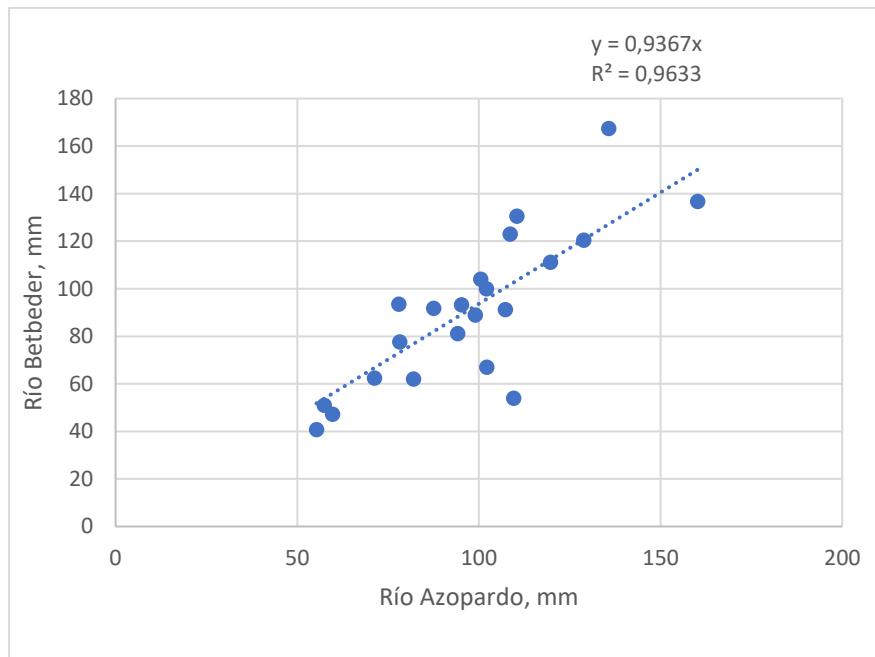


Figura 10.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Betbeder-Río Azopardo. Fuente: Elaboración propia.

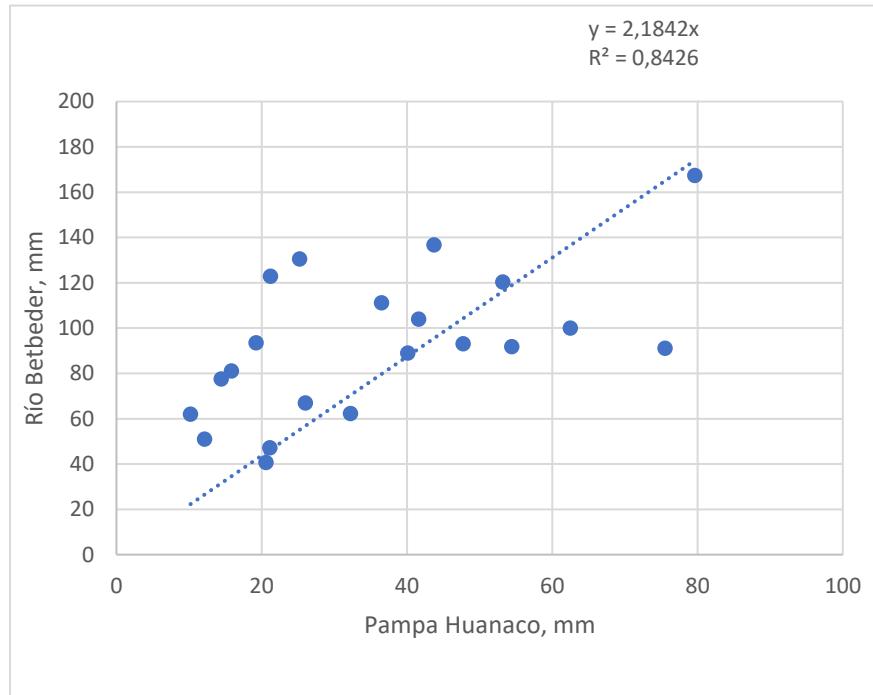


Figura 11.-Gráfico de dispersión datos de precipitación estaciones Río Betbeder-Pampa Huanaco. Fuente: Elaboración propia.

3.2.- Precipitación sobre la cuenca.

Una vez finalizado el punto 3.1, correspondiente al completado de los datos faltantes de precipitación, se procedió a aplicar el método de ponderación por la inversa del cuadrado de la distancia (IDW², *Inverse Distance Weighting Squared*), tomando como punto de referencia el centroide de la cuenca.

Es importante señalar que los datos de precipitación obtenidos abarcan el período comprendido entre abril de 2016 y octubre de 2020. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 12.

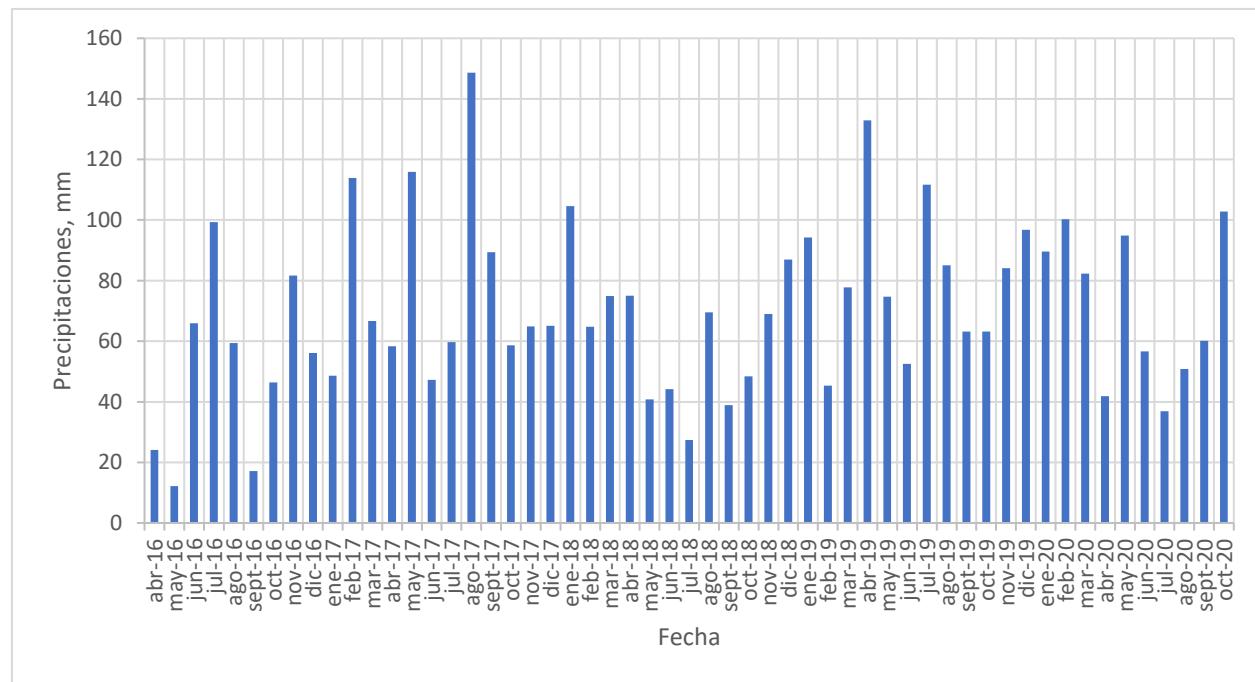


Figura 12.- Precipitaciones cuenca lago Fagnano periodo abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos desde Sistema Hidrométrico en línea, DGA.

3.2.1.- Análisis de las Precipitaciones en la Cuenca del Lago Fagnano.

Variabilidad Interanual:

El análisis de las precipitaciones revela una oscilación interanual, con años más húmedos como 2017 y 2019, contrastando con períodos relativamente secos como 2016, 2018 y 2020. El año 2017 destaca especialmente por presentar un coeficiente de asimetría



elevado (1,243), lo que indica la ocurrencia de eventos extremos de precipitación que distorsionan la distribución respecto a la media.

Estacionalidad:

Según Xercavins (1984), pueden distinguirse tres factores que matizan considerablemente las características climáticas de la Región de Magallanes y la Antártica Chilena: la circulación atmosférica (que está en función de la latitud), la influencia oceánica (concretamente, la del océano Pacífico) y el relieve (los Andes del sur de la Patagonia). Para efectos del presente estudio, el factor relevante sería la circulación atmosférica, que tiene que ver con el cinturón de vientos del oeste que se desplaza acorde a la AAO. Dicho esto, según Di Castri y Hajek (1976), el lago Fagnano, se sitúa en la transición entre la franja occidental oceánica y la franja oriental esteparia descritas para Tierra del Fuego. En su sector chileno predomina un clima oceánico frío y húmedo, con precipitaciones distribuidas durante todo el año (no superan los 200 mm promedio mensuales), veranos muy frescos e inviernos prolongados y fríos, además de la constante influencia de los vientos del oeste que intensifican la sensación térmica. No obstante, hacia el este del lago se observa un marcado gradiente hacia condiciones más secas y esteparias, propias de la franja atlántica, lo que convierte a la zona en un espacio de transición bioclimática.

En base a lo propuesto por los autores, el gráfico mensual de precipitaciones concuerda y demuestra evidencia de las afirmaciones. La ocurrencia de lluvias a lo largo de todo el año, sin que se identifique una estación seca definida es una demostración. Aunque se observan ciertos picos más pronunciados durante los meses de invierno y primavera, épocas en las que climatológicamente se esperan mayores precipitaciones en la mayoría de las regiones. Por ejemplo, las ubicadas en la zona centro-sur de Chile (Uribe, Cabrera, de la Fuente, & Paneque, 2012). En esta región austral, la distribución mensual es relativamente homogénea. Esta regularidad en el régimen hídrico mensual es coherente con el comportamiento esperado para un clima de tundra, caracterizado por una persistente humedad a lo largo del año.

Relación con el clima tundra según Köppen-Geiger:



El clima ET, según la clasificación de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006), se define por las siguientes características:

- Temperaturas medias mensuales que no superan los 10 °C en ningún mes del año.
- Suelos húmedos o parcialmente congelados de forma persistente.
- Alta humedad relativa, incluso con totales de precipitación moderados.
- Presencia frecuente de nubosidad, nieblas y vientos fríos.

Las precipitaciones obtenidas se relacionan con esta descripción del clima tundra, ya que los valores máximos anuales no superan los 150 mm y el promedio anual más alto se mantiene en torno a los 81 mm, lo que concuerda con el patrón de precipitaciones moderadas pero constantes.

La ausencia de meses sin precipitación refuerza la idea de una disponibilidad hídrica continua, vinculada a la elevada humedad relativa típica de este tipo de clima.

El análisis del coeficiente de asimetría revela que, en general, los años analizados presentan una distribución de las precipitaciones con asimetría positiva, lo cual indica la presencia ocasional de eventos de alta magnitud que, aunque poco frecuentes, ejercen una influencia considerable en el comportamiento anual. Esta tendencia es común en regiones frías expuestas a fenómenos atmosféricos intensos pero esporádicos. Sin embargo, el año 2020 muestra una ligera asimetría negativa (-0,075), lo que sugiere una distribución más equilibrada o incluso con eventos de menor magnitud que el promedio, lo cual podría estar asociado a condiciones meteorológicas más estables o a la ausencia de eventos extremos en ese período.

3.2.2.- Resumen estadístico.

La Tabla 3 presenta los principales indicadores estadísticos obtenidos a partir del análisis anual de las precipitaciones entre 2016 y 2020, incluyendo valores máximos y mínimos mensuales, desviación estándar, media armónica, media aritmética, mediana, asimetría y rango.



Tabla 3.-Resumen estadístico de precipitaciones cuenca Lago Fagnano. Fuente: Elaboración propia

Año	Máximo, mm	Mínimo, mm	DE, mm	MA, mm	PP, mm	Me, mm	As	R, mm
2016	99,33	12,17	29,56	32,65	51,35	56,10	0,134	87,16
2017	148,68	47,21	31,94	69,05	78,08	64,97	1,243	101,46
2018	104,59	27,41	22,51	54,03	62,04	66,85	0,248	77,17
2019	132,89	45,36	24,94	74,97	81,78	80,91	0,555	87,53
2020	102,84	36,90	25,07	63,07	71,61	71,19	-0,075	65,94

Donde:

- DE: Desviación estándar
- MA: Media armónica
- PP: Precipitación promedio
- Me: Mediana
- As: Coeficiente de asimetría
- R: Rango

3.3 Datos de Nivel Dirección General de Aguas.

Para los fines del presente estudio, se solicitaron los registros de nivel del lago Fagnano obtenidos por las estaciones hidrométricas de la Dirección General de Aguas. A continuación, en la Figura 13 se presentan los resultados correspondientes: La serie temporal de datos proporcionada por la DGA abarca desde el 28 de noviembre de 2002 hasta el 31 de enero de 2021.

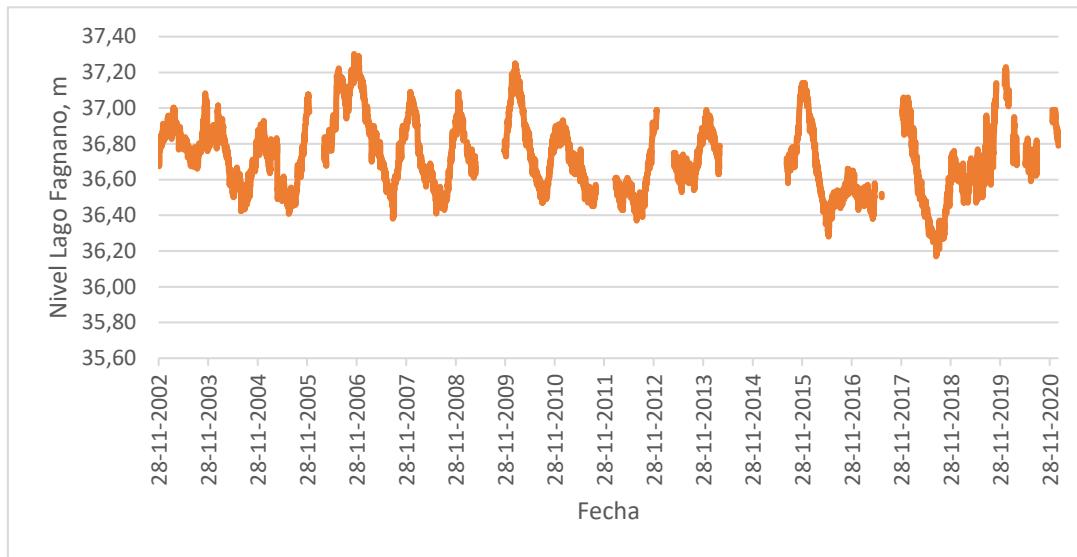


Figura 13.-Datos de Nivel Lago Fagnano por la DGA. Fuente: Elaboración Propia

La serie de datos presenta niveles mínimos de 36,17 m y máximos de 37,30 m, mostrando una variabilidad a lo largo del tiempo. El nivel promedio del lago Fagnano durante el periodo analizado fue de 36,72 m.

Cabe destacar que el año con el nivel promedio más bajo fue 2018, con 36,52 m, mientras que el año con el nivel promedio más alto fue 2006, alcanzando 37,04 m.

A lo largo de la serie temporal se observan ciclos interanuales caracterizados por fluctuaciones en los niveles, sin evidenciar una tendencia sostenida al alza o a la baja. Por ejemplo, entre 2006 y 2010 se registra un periodo de niveles relativamente elevados, en contraste con el intervalo entre 2013 y 2016, donde los niveles fueron consistentemente más bajos.

3.4 Datos de Nivel ALTiS.

En la zona de estudio correspondiente al lago Fagnano, se disponía de registros históricos de niveles proporcionados por la Dirección General de Aguas. No obstante, dichos datos presentan vacíos temporales y requieren verificación para su uso confiable. Por esta razón, se optó por complementar y contrastar esta información mediante la obtención de niveles altimétricos satelitales utilizando el software ALTiS.

En esta área, el satélite Sentinel-3A cruza el cuerpo de agua en cuatro secciones distintas. Por consiguiente, el análisis de niveles lacustres se realizó dividiendo el lago en cuatro tramos, cada uno correspondiente a una de las trayectorias orbitales del satélite. Conforme al procedimiento descrito en el apartado 2.2 de esta investigación, se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de estos tramos:

La serie temporal de datos de nivel obtenida a partir del satélite abarca desde el 14 de abril de 2016 hasta el 10 de octubre de 2024.

- I. Tramo 1. A continuación, se presenta la Figura 14 con la depuración de los datos de nivel altimétricos y en la Figura 15 la serie temporal del tramo 1.

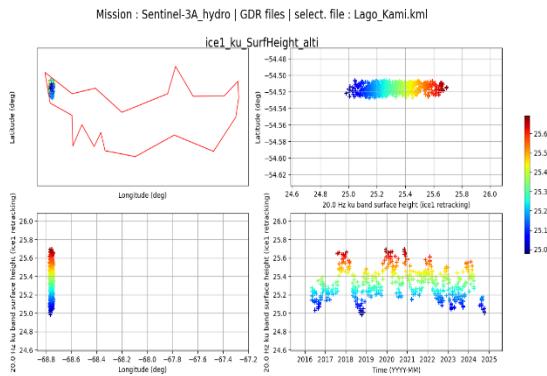


Figura 14.-Tramo 1 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.

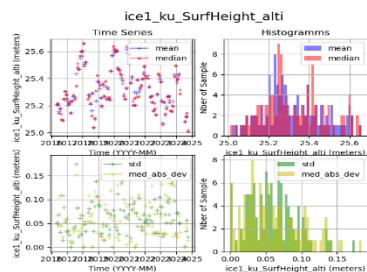


Figura 15.-Series temporal 1 entregada por ALTiS. Fuente: Elaboración Propia.

II. Tramo 2. A continuación, se presenta la Figura 16 con la depuración de los datos de nivel altimétricos y en la Figura 17 la serie temporal del tramo 2.

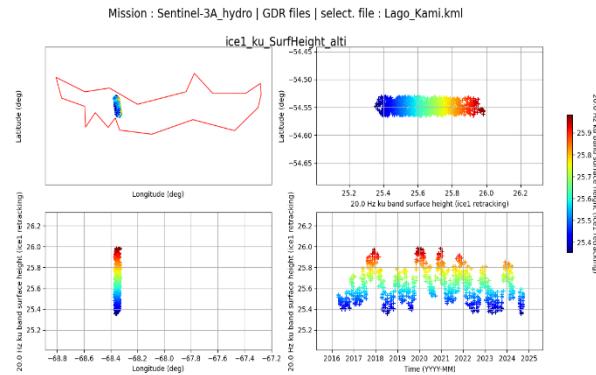


Figura 16.-Tramo 2 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.

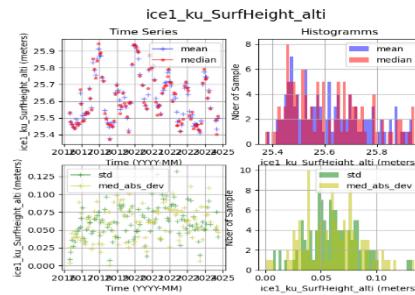


Figura 17.-Series temporal 2 entregada por ALTiS. Fuente: Elaboración Propia.

III. Tramo 3. A continuación, se presenta la Figura 18 con la depuración de los datos de nivel altimétricos y en la Figura 19 la serie temporal del tramo 3.

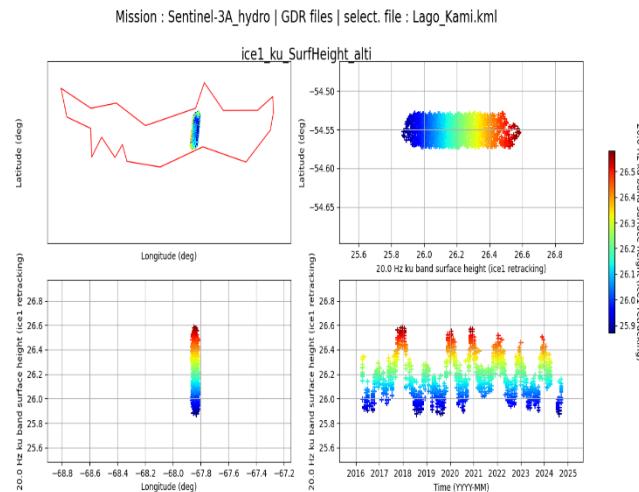


Figura 18.-Tramo 3 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.

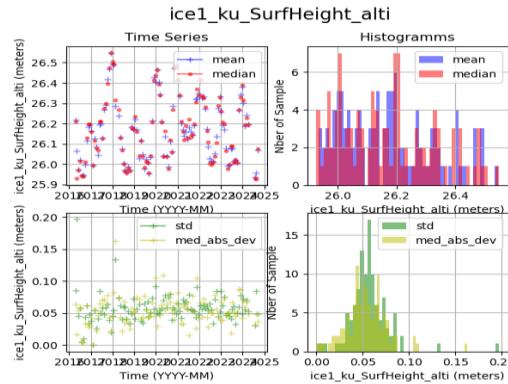


Figura 19.-Series temporal 3 entregada por ALTIS. Fuente: Elaboración Propia.

IV. Tramo 4. A continuación, se presenta la Figura 20 con la depuración de los datos de nivel altimétricos y en la Figura 21 la serie temporal del tramo 4.

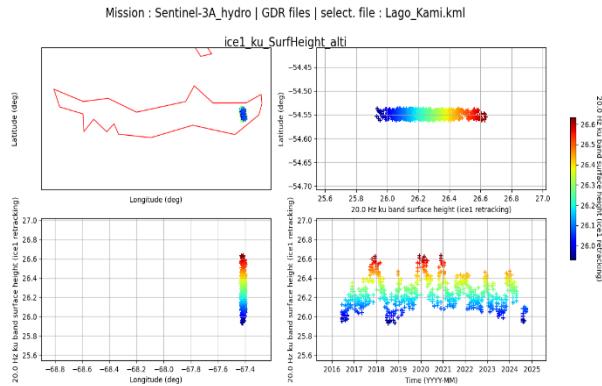


Figura 20.-Tramo 4 Depurado. Fuente: Elaboración Propia.

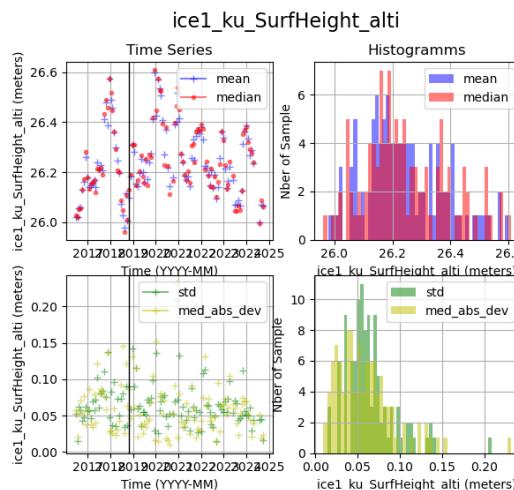


Figura 21.-Series temporal 4 entregada por ALTIS. Fuente:
Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos a partir de los datos no corregidos de AITiS revelan diferencias entre los distintos tramos del Lago Fagnano en cuanto a los niveles registrados. En el Tramo 1, se observa una tendencia general a la disminución del nivel del lago durante el período analizado, con fluctuaciones interanuales marcadas. Este tramo presenta los valores más bajos entre todos, con un promedio de 25,32 m, un máximo de 25,66 m y un mínimo de 25,01 m.

El Tramo 2 muestra un comportamiento similar, aunque con niveles ligeramente superiores. También se aprecia una leve tendencia decreciente hacia el final del período, aunque con oscilaciones menos abruptas que en el Tramo 1. Los valores promedio, máximo y mínimo registrados fueron 25,61 m, 25,94 m y 25,37 m, respectivamente.

En contraste, los Tramos 3 y 4 presentan niveles sistemáticamente más altos, con un comportamiento marcadamente oscilatorio. Estos tramos no evidencian una tendencia creciente o decreciente clara, sino que mantienen una variabilidad periódica relativamente estable. El Tramo 3 alcanzó un promedio de 26,17 m, con un máximo de 26,55 m y un mínimo de 25,93 m, mientras que el Tramo 4 tuvo el promedio más alto con 26,24 m, un máximo de 26,61 m y un mínimo de 25,96 m.

A continuación, en la Figura 22 se muestra un gráfico en donde se aprecian los cuatro tramos con sus respectivas fechas y niveles.

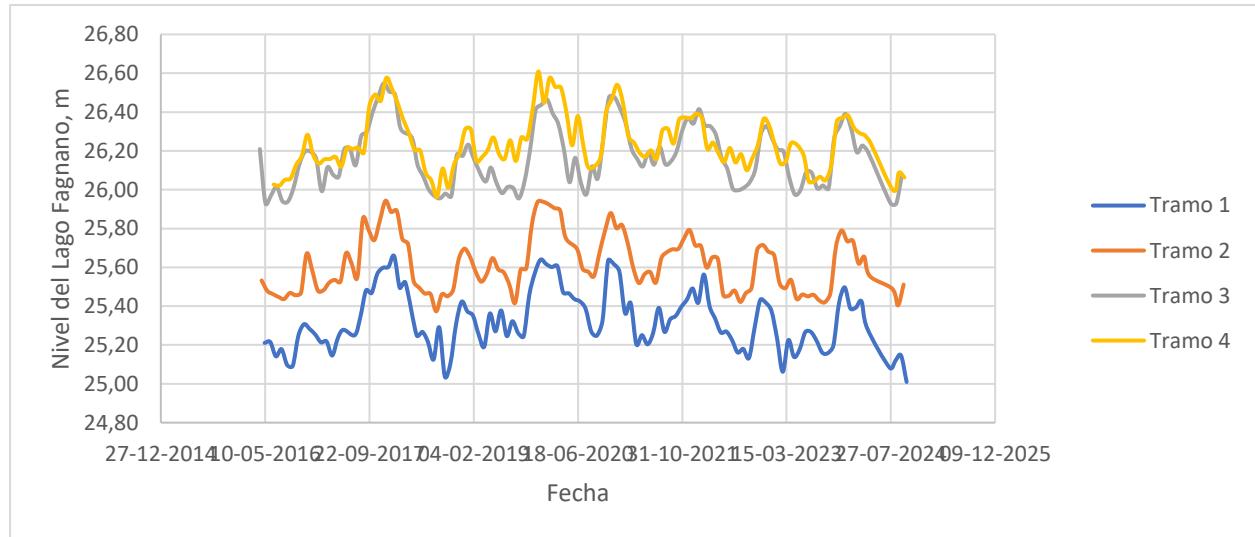


Figura 22.-Niveles del Lago Fagnano en el Tiempo por AITiS. Fuente: Elaboración Propia



A continuación, se presentan los valores de valores promedios, máximos y mínimos en la Tabla 4.

Tabla 4.- Valores de nivel del Lago Fagnano sin corregir: promedios, máximos y mínimos. Fuente: Elaboración propia.

Tramos	Promedio, m	Max, m	Min, m
Tramo 1	25,32	25,66	25,01
Tramo 2	25,61	25,94	25,37
Tramo 3	26,17	26,55	25,93
Tramo 4	26,24	26,61	25,96

El tramo 1 es el de menor nivel, ya que corresponde al sector por donde drena el lago, o bien, se encuentra más próximo a esa zona, que en este caso desagua hacia el río Azopardo. Esta condición se debe a la forma inclinada de la superficie del lago, lo que afecta en los niveles de este (Schorghofer & Rothman, 2000). Por ello, los tramos 3 y 4 presentan una diferencia menor entre sí, de 0,07 m en sus niveles promedios, debido a que en ese sector la superficie es más plana. En cambio, entre los tramos 1 y 2 la diferencia alcanza los 0,29 m en sus niveles promedios.



3.5 Datos de Nivel ALTiS Corregido.

Se observa una diferencia, del orden de 10 metros, entre los niveles registrados por la Dirección General de Aguas y los obtenidos mediante altimetría satelital con el software ALTiS. Considerando que los datos proporcionados por la DGA corresponden a mediciones oficiales y validadas en terreno, se adopta esta serie como referencia para el ajuste de los niveles satelitales.

En consecuencia, los datos obtenidos mediante ALTiS fueron compensados verticalmente, de acuerdo con lo indicado en el apartado 2.3 de esta investigación. Posteriormente, los cuatro tramos analizados se integraron en una única serie temporal, ordenada cronológicamente, con el propósito de permitir un análisis continuo del comportamiento del nivel del lago.

Asimismo, la serie resultante fue ajustada temporalmente para coincidir con el periodo de los registros de precipitación utilizados, de manera de facilitar la evaluación conjunta entre ambas variables. De este modo, los datos compensados abarcan el intervalo comprendido entre abril de 2016 y octubre de 2020.

A continuación, en la Figura 23 se presentan los niveles corregidos correspondientes a los cuatro tramos analizados.

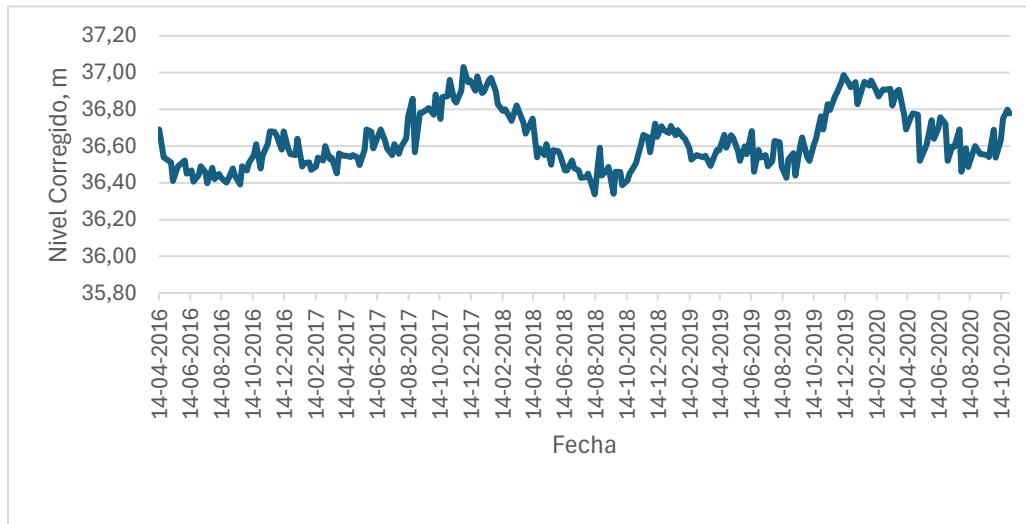


Figura 23.-Datos de Nivel Lago Fagnano Corregidos. Fuente: Elaboración Propia.



En la figura 15 se observa que el nivel máximo registrado en los datos corregidos de Altis fue de 37,03 m, mientras que el nivel mínimo alcanzó 36,34 m, resultando en un promedio general de 36,65 m.

Cabe destacar que el año con el nivel más bajo fue 2018, y el año con el nivel más alto correspondió a 2017.

Para el análisis se calcularon los valores promedio, máximo y mínimo anuales del nivel del lago utilizando los datos corregidos de Altis. A continuación, se presenta la Tabla 5 con estos resultados.

Tabla 5.- Resumen estadístico de los datos de nivel para el Lago Fagnano en Altis corregido. Fuente: Elaboración propia

Año	Promedio, m	Max, m	Min, m
2016	36,51	36,69	36,39
2017	36,68	37,03	36,45
2018	36,60	36,97	36,34
2019	36,63	36,99	36,43
2020	36,73	36,96	36,46
2016-2020	36,63	37,03	36,34



3.6 Datos OAI.

Para los fines del presente estudio, se recopilaron los datos del Índice de Oscilación Antártica (AOI), los cuales fueron filtrados exclusivamente para el periodo de interés. En particular, se acotó la serie temporal desde abril de 2016 hasta octubre de 2020, en correspondencia con la disponibilidad de los datos altimétricos corregidos y de precipitaciones en la cuenca del Lago Fagnano. Esta selección permite realizar un análisis comparativo coherente entre la variabilidad atmosférica de gran escala (representada por el AOI) y los componentes de precipitaciones y niveles del lago Fagnano que fueron observados.

A continuación, se presentan en la Tabla 6 y en la Figura 24 los valores mensuales del AOI correspondientes al periodo mencionado.

Tabla 6.- Datos AOI. Fuente: Elaboración propia.

Fecha	AOI	Fase
abr-16	0,097	Fase Positiva
may-16	0,012	Fase Positiva
jun-16	2,565	Fase Positiva
jul-16	0,407	Fase Positiva
ago-16	-0,739	Fase Negativa
sept-16	2,333	Fase Positiva
oct-16	-0,177	Fase Negativa
nov-16	-1,508	Fase Negativa
dic-16	-0,711	Fase Negativa
ene-17	-0,982	Fase Negativa
feb-17	-0,015	Fase Negativa
mar-17	0,156	Fase Positiva
abr-17	0,619	Fase Positiva
may-17	1,053	Fase Positiva
jun-17	0,546	Fase Positiva
jul-17	0,728	Fase Positiva
ago-17	0,764	Fase Positiva
sept-17	1,296	Fase Positiva
oct-17	-0,568	Fase Negativa
nov-17	0,771	Fase Positiva
dic-17	0,984	Fase Positiva
ene-18	1,275	Fase Positiva
feb-18	1,041	Fase Positiva
mar-18	0,141	Fase Positiva



abr-18	-1,166	Fase Negativa
may-18	-0,077	Fase Negativa
jun-18	-0,012	Fase Negativa
jul-18	0,377	Fase Positiva
ago-18	-0,343	Fase Negativa
sept-18	1,458	Fase Positiva
oct-18	0,53	Fase Positiva
nov-18	0,991	Fase Positiva
dic-18	0,93	Fase Positiva
ene-19	0,677	Fase Positiva
feb-19	-0,5	Fase Negativa
mar-19	0,745	Fase Positiva
abr-19	0,336	Fase Positiva
may-19	0,335	Fase Positiva
jun-19	1,465	Fase Positiva
jul-19	-0,39	Fase Negativa
ago-19	-1,08	Fase Negativa
sept-19	0,563	Fase Positiva
oct-19	-0,925	Fase Negativa
nov-19	-1,84	Fase Negativa
dic-19	-1,36	Fase Negativa
ene-20	-0,231	Fase Negativa
feb-20	0,275	Fase Positiva
mar-20	1,426	Fase Positiva
abr-20	-0,475	Fase Negativa
may-20	0,577	Fase Positiva
jun-20	1,071	Fase Positiva
jul-20	-0,546	Fase Negativa
ago-20	-0,72	Fase Negativa
sept-20	0,194	Fase Positiva
oct-20	1,264	Fase Positiva

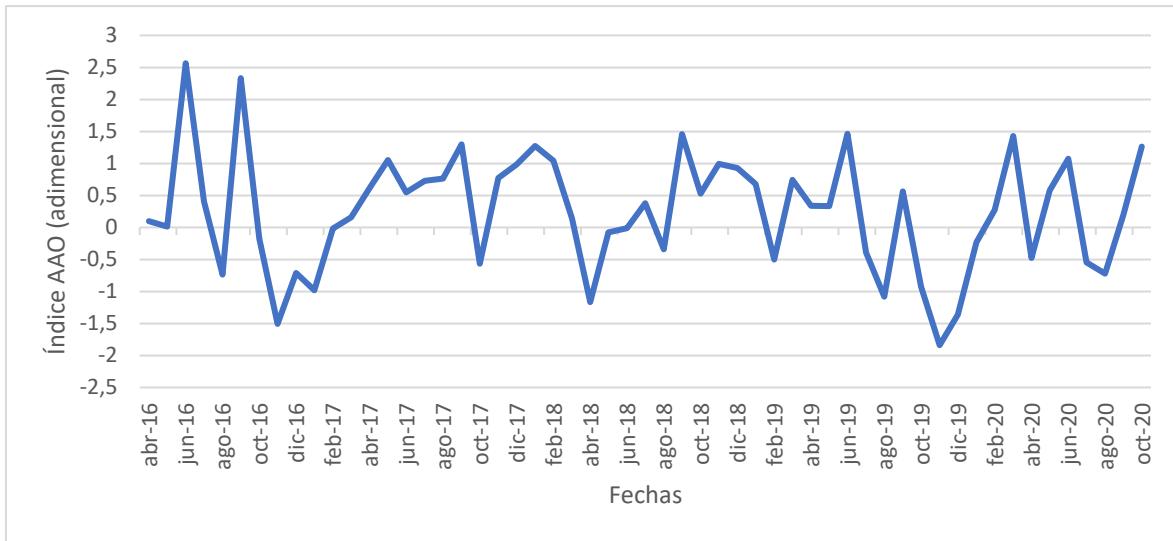


Figura 24.- Datos AOI. Fuente: Elaboración propia.

Durante el periodo comprendido entre enero de 2016 y octubre de 2020, el Índice de Oscilación Antártica (AOI) presentó una importante variabilidad interanual y estacional, reflejando alternancias entre fases positivas y negativas del modo anular del hemisferio sur.

En general, se observó una tendencia predominante hacia fases positivas del AOI, especialmente entre 2016 y 2018. Por ejemplo, en 2016, se registraron valores altamente positivos durante varios meses (junio: 2,565; septiembre: 2,333), lo que sugiere una circulación zonal intensificada y un probable desplazamiento hacia el sur de los sistemas frontales. Esto puede haber contribuido a una disminución de las precipitaciones en la cuenca del Lago Fagnano durante ese año, al limitar el ingreso de masas de aire húmedo desde latitudes medias.

En contraste, a fines de 2016 (noviembre y diciembre) y en parte de 2017 (enero), se registraron valores negativos del índice (noviembre 2016: -1,508; diciembre 2016: -0,711; enero 2017: -0,982), lo que indica fases de AOI negativa, asociadas al debilitamiento de los vientos del oeste y una mayor probabilidad de condiciones propicias para la precipitación en latitudes subantárticas como Tierra del Fuego.

El año 2018 presentó una fase mixta, iniciando con valores positivos en enero (1,275) y febrero (1,041), pero registrando un cambio abrupto a valores negativos en abril (-1,166),



mayo (-0,077) y agosto (-0,343), reflejando una mayor variabilidad estacional del índice durante ese año.

Durante 2019 y 2020, el índice mostró una alternancia de valores, con períodos positivos moderados (marzo 2019: 0,745; junio 2019: 1,465), intercalados con fases negativas marcadas (noviembre 2019: -1,840; diciembre 2019: -1,360; agosto 2020: -0,720). Esta oscilación podría reflejar una interacción más rotativa entre el AOI y los sistemas de precipitaciones locales (Fuentes-Aguilera et al., 2025).

4. Capítulo 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Como se indicó previamente, el análisis se efectuó considerando el periodo para el cual se dispone simultáneamente de datos altimétricos y de precipitaciones, comprendido entre abril de 2016 y octubre de 2020. En el caso de la AAO, no se presentaron inconvenientes, ya que existen registros completos para todo el intervalo evaluado. A partir de esta información, se elaboró un gráfico combinado que integra la variación de la AAO, los niveles altimétricos corregidos obtenidos mediante ALTIS y las precipitaciones registradas en la cuenca del Lago Fagnano. Debido a que estas variables presentan magnitudes y escalas diferentes, fue necesario aplicar un proceso de normalización a los datos de altura, con el fin de facilitar la comparación visual y la identificación de relaciones y tendencias potenciales entre ellas.

Para este propósito, se utilizó la normalización mediante puntuación Z, que transforma cada valor de un conjunto de datos de manera que la media sea igual a 0 y la desviación estándar igual a 1. Esta técnica permite que los valores de nivel, que podrían considerarse atípicos en relación con la serie de la AAO, se ajusten a una escala comparable, evitando que su magnitud distorsione la visualización conjunta (Zhang, Cheng, & Liu, 2014).

La fórmula utilizada para la normalización se presenta a continuación:

$$z \text{ score} = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde:

x= Valor original

μ = Media de los datos

σ = Desviación estándar de los datos

El gráfico comparativo se muestra a continuación en la Figura 25.

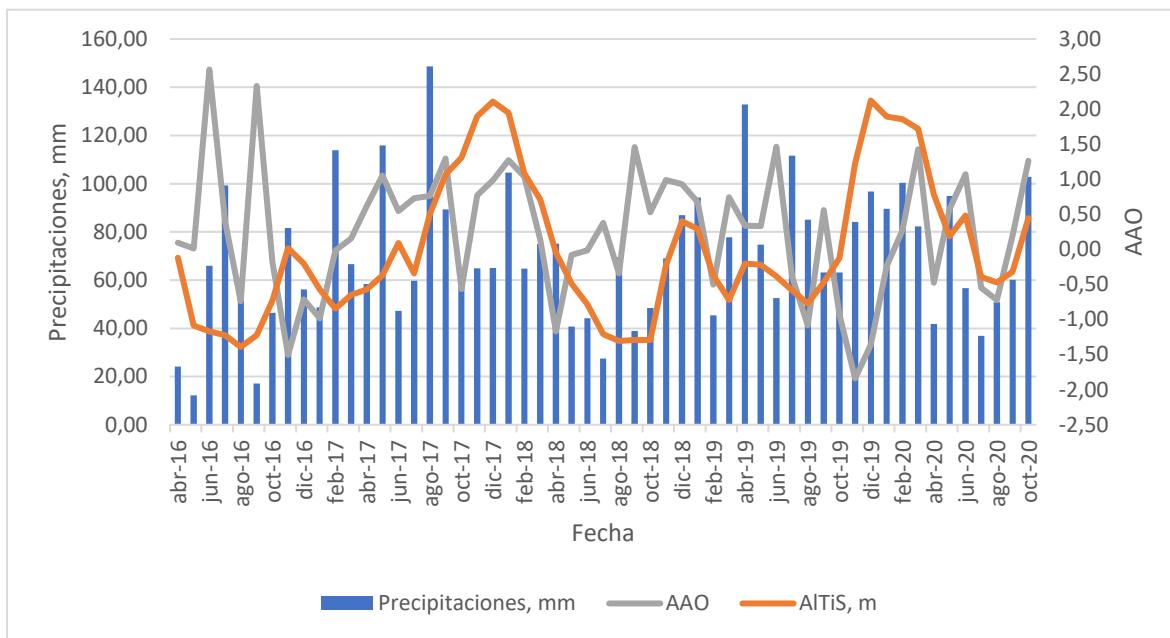


Figura 25.-Precipitaciones, nivel del agua y oscilación antártica para la cuenca del lago Fagnano durante el periodo abril 2016 - octubre 2020.



4.1 Relación entre AAO y precipitaciones registradas.

Según lo que se conoce sobre la Oscilación Antártica (AAO), esta influye en la distribución de precipitaciones a través de la variación del gradiente de presión entre latitudes medias (~40°S) y altas (~65°S), que determina la intensidad y posición de los vientos del oeste (Gong & Wang, 1999). En la fase negativa de la AAO, la presión en latitudes medias es relativamente baja y la circulación zonal se debilita, desplazando el gradiente hacia el norte; esto provoca que los vientos intensos y los sistemas frontales del cinturón circumpolar se extiendan a latitudes medias, aumentando las precipitaciones en áreas como el Lago Fagnano, por otro lado, durante la fase positiva, la presión aumenta en latitudes medias y disminuye sobre la Antártica, concentrando el gradiente hacia el sur; los vientos del oeste se intensifican cerca de la Antártica y los sistemas frontales se desplazan hacia latitudes más australes, reduciendo las precipitaciones en la zona de estudio (Silvestri & Vera, 2003).

Es importante considerar, además, que existe un desfase temporal entre los valores de la AAO y su efecto sobre las precipitaciones. En otras palabras, una anomalía negativa en el índice no se refleja de manera inmediata en el régimen pluviométrico, sino que debe contemplarse un pequeño delta de tiempo en los análisis comparativos. Esta característica se encuentra en línea con lo reportado por Thompson et al. (2000), quienes señalan que las señales de la AAO presentan desfases tanto en la propagación desde la estratosfera hacia la troposfera con un rezago aproximado de un mes como en la respuesta oceánica, donde las anomalías de temperatura superficial alcanzan su máxima expresión cerca de un mes después del forzamiento atmosférico, prolongando así la influencia del fenómeno en la circulación regional.

A continuación, en la Figura 26, se presenta un gráfico comparativo entre los registros de precipitaciones y los valores del índice de la Oscilación Antártica.

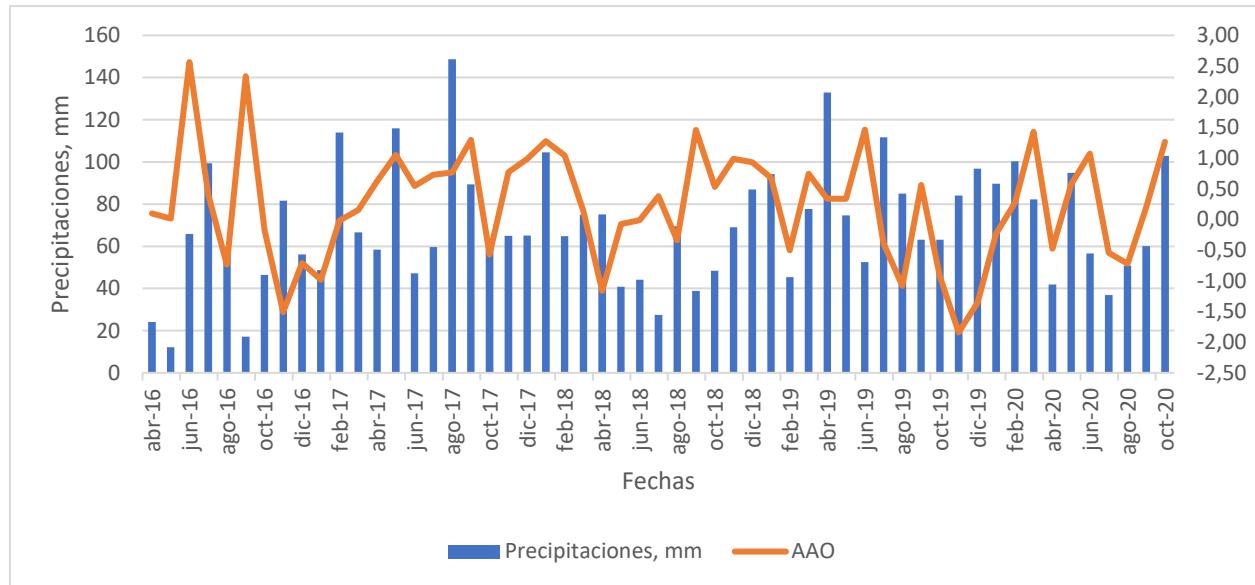


Figura 26.- Oscilación antártica y precipitaciones registradas en la cuenca del lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar una relación inversa entre el índice de la Oscilación Antártica (AAO) y las precipitaciones en la zona de estudio. En general, cuando el índice AAO presenta valores negativos, se registra un aumento en las precipitaciones, tendencia que se acentúa en presencia de valores extremos. Por ejemplo, en noviembre de 2016 se alcanzó un valor de -1,51 en el índice AAO, lo que coincide con un incremento sostenido de las precipitaciones entre febrero y agosto de 2017.

De manera similar, cuando el índice se mantiene en valores positivos, se observa una disminución en las precipitaciones. Tal es el caso del período comprendido entre febrero de 2017 y febrero de 2018, donde el índice AAO se mantuvo mayoritariamente positivo, reflejando una tendencia a la baja en las precipitaciones durante el año 2018.

4.2 Relación entre AAO y ALTIS.

De manera análoga a lo expuesto en el punto 4.1, la relación entre la AAO y los niveles del lago registrados mediante altimetría satelital (ALTIS) se espera que responda a un comportamiento inverso. Es decir, cuando la AAO se encuentra en su fase negativa, se esperaría un aumento en los niveles del lago, mientras que, durante su fase positiva, los niveles tenderían a disminuir, debido al deslizamiento de los sistemas frontales entre las latitudes medias y altas por el fenómeno de gran escala (Fogt & Marshall, 2020).

Esta relación debe analizarse considerando el desfase temporal mencionado en el apartado anterior. El efecto de la AAO sobre el nivel del lago no es inmediato, ya que involucra una secuencia de procesos: primero, las variaciones en los patrones de presión atmosférica facilitan el acercamiento de sistemas frontales a la zona de estudio; luego, se generan las precipitaciones asociadas, según lo que comentan los autores Mbigi & Xiao (2024), que consideran un rezago en el fenómeno. Finalmente, estas precipitaciones podrían traducirse en un aumento del nivel del lago, a través del escurrimiento superficial y/o subterráneo (Shuman & Donnelly, 2006).

A continuación, en la Figura 27 se muestra el grafico comparativo entre los niveles del lago Fagnano según ALTIS y los valores del fenómeno de AAO.

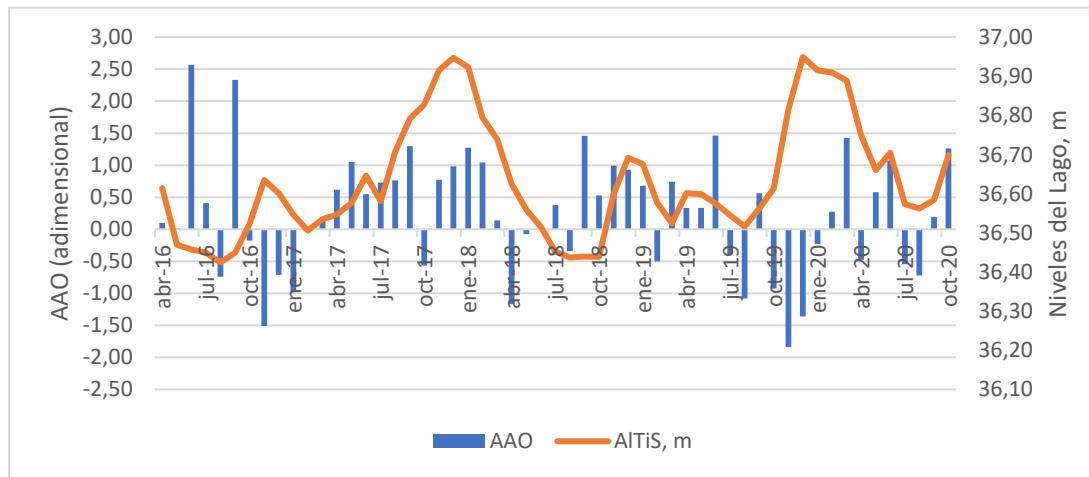


Figura 27.-Oscilación antártica y niveles según ALTIS en la cuenca del lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 27, cada vez que la AAO entra en una fase negativa, se evidencia un aumento en los niveles del Lago Fagnano tras un desfase aproximado de



cuatro meses. Por ejemplo, entre octubre de 2016 y enero de 2017, el índice AAO presentó valores negativos, y posteriormente, desde abril de 2017 hasta enero de 2018, se registró un ascenso progresivo en los niveles del lago, alcanzando un valor máximo de 36,95 m, el más alto del período analizado.

Por el contrario, durante gran parte del año 2018, el índice AAO mostró valores mayoritariamente positivos, lo que se tradujo en niveles más bajos del lago en comparación con el año anterior. Sin embargo, es importante destacar que la AAO no es el único fenómeno que influye sobre la dinámica hidrológica del Lago Fagnano. Existen otros factores relevantes, como el derretimiento de nieve, el cual ocurre principalmente en los meses de verano cuando, en un clima de tipo tundra, se registran ligeros aumentos de temperatura (Tong, Su, & Xu, 2016).

Asimismo, fenómenos climáticos de escala global como El Niño *Southern Oscillation (ENSO)* también pueden tener una incidencia significativa en el régimen de precipitaciones y, por ende, en los niveles del lago (Cai et al., 2020). A pesar de la presencia de múltiples variables, los resultados indican que la Oscilación Antártica tiene una influencia en la variación de los niveles del Lago Fagnano, especialmente cuando se presentan fases negativas intensas y prolongadas.

4.3 Relación entre precipitaciones registradas y AlTiS.

La relación entre las precipitaciones y los niveles del Lago Fagnano es directa: a medida que aumentan las precipitaciones, también se observa un incremento en los niveles del lago.

A continuación, en la Figura 28, se presenta un gráfico comparativo que muestra la evolución conjunta de ambas variables durante el período analizado.

Según los resultados obtenidos en el gráfico comparativo, se observa una relación directa entre las precipitaciones y los niveles del Lago Fagnano. En particular, los años 2017 y 2019 presentan los mayores registros de precipitaciones en la zona de estudio, coincidiendo con los niveles más altos del lago durante el período analizado. Esto sugiere que la dinámica del nivel lacustre está influenciada por el régimen de precipitaciones, confirmando que este factor constituye una importante fuente de aporte hídrico al lago.

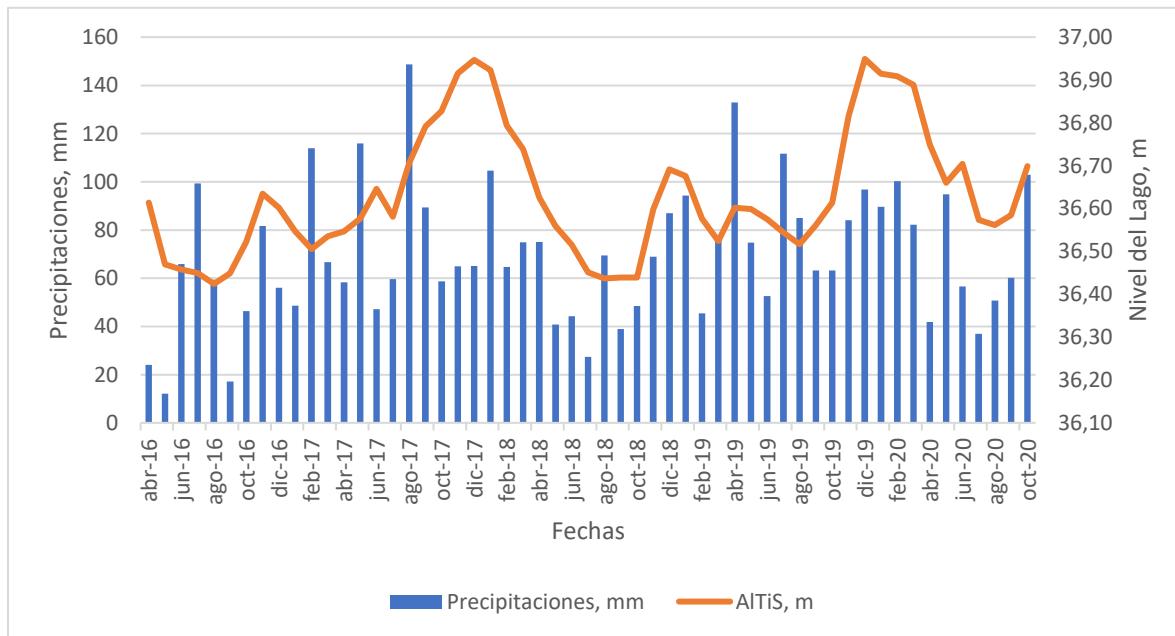


Figura 28.- Precipitaciones y niveles según AlTiS en la cuenca del lago Fagnano para el período abril 2016 – octubre 2020.
Fuente: Elaboración propia.



5. Capítulo 5 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Para la validación de los resultados se utilizará el coeficiente de correlación de Spearman y el índice de eficiencia de Kling–Gupta (KGE), tal como se indicó en el punto 2.7. Además, se incorporará un apartado en donde se demuestra la efectividad que ha tenido el uso de altimetría en estudios similares para otorgar más validez a los resultados obtenidos.

5.1 Nivel corregido de ALTIS – Nivel de la DGA.

La obtención de resultados positivos en los indicadores estadísticos, como el coeficiente de correlación de Spearman y el índice de Kling-Gupta, sugiere una buena correspondencia entre los datos analizados. Esto implicaría que podría existir una relación fuerte entre las series de nivel del lago obtenidas a partir de ALTIS y las registradas por la DGA, lo que validaría su comparabilidad. En consecuencia, para los fines del presente estudio, se consideraría factible utilizar los datos de ALTIS para complementar los vacíos existentes en los registros históricos de nivel del lago proporcionados por la DGA.

5.1.2 Coeficiente de correlación de Spearman.

Para evaluar la relación entre los niveles del lago obtenidos mediante altimetría satelital y los registros oficiales, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman entre los niveles corregidos de ALTIS y los valores registrados por la DGA. Dado que la serie de la DGA corresponde a registros diarios (aunque con algunas ausencias) y ALTIS entrega datos en fechas puntuales determinadas por el paso del satélite sobre el Lago Fagnano, el análisis se realizó únicamente considerando aquellas fechas en las que ambos conjuntos de datos coincidían temporalmente.

El valor obtenido del coeficiente de correlación de Spearman fue de 0,736, lo que representa una correlación positiva fuerte entre los niveles corregidos de ALTIS y los registros oficiales de la DGA. Este resultado indica que ambas series presentan una tendencia similar en el comportamiento de los niveles del lago, lo que respalda su consistencia relativa en términos de variación temporal. Por lo tanto, se considera que



los datos altimétricos corregidos tienen un buen grado de confiabilidad y pueden ser utilizados para complementar los vacíos de información existentes en la serie histórica de la DGA, al menos en lo que respecta al seguimiento de las fluctuaciones del nivel del Lago Fagnano.

5.1.3 Índice de eficiencia de Kling–Gupta (KGE).

Se aplicó para los niveles del Lago Fagnano el análisis de comparación mediante el índice Kling–Gupta (KGE) para evaluar qué tan cercanos son los valores entre las dos series en términos absolutos. Los valores utilizados para el cálculo son los mismos presentados en la Tabla 8.

Según lo que indica KGE (punto 2.7.1), se calcularon los parámetros en primer lugar (Tabla 7).

Tabla 7.- Parámetros para KGE. Fuente: Elaboración propia.

β	r	α
1,002	0,804	1,353

donde:

- r es el coeficiente de correlación lineal entre los niveles estimados por ALTiS y los observados por la DGA.
- α representa la razón entre las desviaciones estándar de ambas series (variabilidad relativa).
- β es la razón entre los promedios de las dos series (sesgo).

El valor obtenido del índice de Kling-Gupta fue de 0,713, lo que se considera un desempeño bueno en la comparación entre los niveles corregidos de ALTiS y los registros de la DGA. Este indicador, que combina medidas de correlación, sesgo y variabilidad, sugiere que los datos altimétricos reproducen de manera aceptable tanto la dinámica temporal como la magnitud de los niveles observados en la estación oficial. En este contexto, el resultado respalda la utilización de los datos de ALTiS como una fuente



complementaria confiable para reconstruir series históricas del nivel del Lago Fagnano en períodos donde no se dispone de información proveniente de la DGA.

5.2 Nivel corregido de ALTIS – Precipitaciones.

Para la validación de estas dos variables, se utilizó únicamente el coeficiente de correlación de Spearman, cuyos datos se presentan en la Tabla 8. Es importante señalar que los niveles provenientes del análisis altimétrico correspondían a fechas con días específicos, mientras que los datos de precipitaciones estaban disponibles de forma mensual. Por esta razón, se calculó el promedio mensual de los niveles del lago, con el fin de homogeneizar la temporalidad de ambos conjuntos de datos y así permitir una comparación coherente.

Tabla 8.- Datos utilizados para correlación de Spearman entre nivel de ALTIS corregido y las precipitaciones de la cuenca del Lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Nivel corregido, m	Precipitaciones, mm
abr-16	36,61	24,09
may-16	36,47	12,17
jun-16	36,46	65,92
jul-16	36,45	99,33
ago-16	36,42	59,35
sept-16	36,45	17,17
oct-16	36,52	46,38
nov-16	36,63	81,67
dic-16	36,60	56,10
ene-17	36,55	48,65
feb-17	36,51	113,88
mar-17	36,54	66,64
abr-17	36,55	58,36
may-17	36,58	115,91
jun-17	36,65	47,21
jul-17	36,58	59,65
ago-17	36,71	148,68
sept-17	36,79	89,38
oct-17	36,83	58,68
nov-17	36,92	64,89
dic-17	36,95	65,04



ene-18	36,92	104,59
feb-18	36,79	64,73
mar-18	36,74	74,93
abr-18	36,63	75,07
may-18	36,56	40,77
jun-18	36,52	44,17
jul-18	36,45	27,41
ago-18	36,44	69,50
sept-18	36,44	38,85
oct-18	36,44	48,45
nov-18	36,60	68,96
dic-18	36,69	86,99
ene-19	36,68	94,26
feb-19	36,58	45,36
mar-19	36,52	77,72
abr-19	36,60	132,89
may-19	36,60	74,72
jun-19	36,57	52,55
jul-19	36,54	111,66
ago-19	36,52	80,98
sept-19	36,56	63,17
oct-19	36,61	63,17
nov-19	36,82	84,11
dic-19	36,95	96,77
ene-20	36,91	89,62
feb-20	36,91	56,63
mar-20	36,89	82,26
abr-20	36,75	41,81
may-20	36,66	94,83
jun-20	36,70	56,63
jul-20	36,57	36,90
ago-20	36,56	50,79
sept-20	36,58	60,15
oct-20	36,70	102,84



El análisis de correlación de Spearman entre los niveles corregidos de ALTiS y las precipitaciones acumuladas mensualmente arrojó un valor de 0,350, lo que corresponde a una correlación positiva débil. Este resultado sugiere que, si bien existe cierta asociación entre ambos conjuntos de datos, la variabilidad del nivel del lago no está determinada exclusivamente por la precipitación directa, sino que podría estar influida por otros factores hidrológicos y climáticos, como los aportes subterráneos, el escurreimiento superficial, el deshielo, o bien un desfase temporal en la respuesta del lago ante los eventos de precipitación.



5.3 AAO - Nivel corregido de ALTIS.

Para la validación de estas dos variables, se utilizó únicamente el coeficiente de correlación de Spearman, cuyos datos se presentan en la Tabla 9. Cabe mencionar que se aplicó el mismo procedimiento del punto 5.2 para la temporalidad y cohesión de los datos.

Tabla 9.-Datos utilizados para correlación de Spearman entre AAO y nivel de ALTIS corregido del Lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia

Fecha	AAO	ALTIS Corregido, m
abr-16	0,10	36,61
may-16	0,01	36,47
jun-16	2,57	36,46
jul-16	0,41	36,45
ago-16	-0,74	36,42
sept-16	2,33	36,45
oct-16	-0,18	36,52
nov-16	-1,51	36,63
dic-16	-0,71	36,60
ene-17	-0,98	36,55
feb-17	-0,02	36,51
mar-17	0,16	36,54
abr-17	0,62	36,55
may-17	1,05	36,58
jun-17	0,55	36,65
jul-17	0,73	36,58
ago-17	0,76	36,71
sept-17	1,30	36,79
oct-17	-0,57	36,83
nov-17	0,77	36,92
dic-17	0,98	36,95
ene-18	1,28	36,92
feb-18	1,04	36,79
mar-18	0,14	36,74
abr-18	-1,17	36,63
may-18	-0,08	36,56



jun-18	-0,01	36,52
jul-18	0,38	36,45
ago-18	-0,34	36,44
sept-18	1,46	36,44
oct-18	0,53	36,44
nov-18	0,99	36,60
dic-18	0,93	36,69
ene-19	0,68	36,68
feb-19	-0,50	36,58
mar-19	0,75	36,52
abr-19	0,34	36,60
may-19	0,34	36,60
jun-19	1,47	36,57
jul-19	-0,39	36,54
ago-19	-1,08	36,52
sept-19	0,56	36,56
oct-19	-0,93	36,61
nov-19	-1,84	36,82
dic-19	-1,36	36,95
ene-20	-0,23	36,91
feb-20	0,28	36,91
mar-20	1,43	36,89
abr-20	-0,48	36,75
may-20	0,58	36,66
jun-20	1,07	36,70
jul-20	-0,55	36,57
ago-20	-0,72	36,56
sept-20	0,19	36,58
oct-20	1,26	36,70

El análisis de correlación de Spearman entre la Oscilación Antártica (AAO) y los niveles corregidos de ALTIS para el Lago Fagnano arrojó un coeficiente de $r = 0,069$, lo que corresponde a una relación escasa o prácticamente nula entre ambas variables. Este resultado parece contradecir lo planteado en el apartado 4.2, donde se mencionaba una relación inversa esperada entre la fase de la AAO y los niveles del lago. No obstante, esta



aparente contradicción puede explicarse por la presencia de un desfase temporal entre los eventos atmosféricos asociados a la AAO, la respuesta de las precipitaciones, y el posterior impacto en el nivel del lago.

Dado que los cuerpos lacustres responden de forma atenuada y retardada a los forzantes climáticos, especialmente cuando intervienen procesos intermedios como acumulación nival, infiltración o escorrentía diferida, el valor positivo observado en la correlación directa no necesariamente implica una relación causal directa o inmediata. Por tanto, el valor obtenido puede ser consistente con un sistema que responde de manera rezagada a las variaciones climáticas.



5.4 AAO – Precipitaciones.

Para la validación de estas dos variables, se utilizó únicamente el coeficiente de correlación de Spearman, cuyos datos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10.- Datos utilizados para correlación de Spearman entre AAO y precipitaciones de la cuenca del Lago Fagnano para el periodo abril 2016 – octubre 2020. Fuente: Elaboración propia

Fecha	AAO	Precipitaciones, mm
abr-16	0,10	24,09
may-16	0,01	12,17
jun-16	2,57	65,92
jul-16	0,41	99,33
ago-16	-0,74	59,35
sept-16	2,33	17,17
oct-16	-0,18	46,38
nov-16	-1,51	81,67
dic-16	-0,71	56,10
ene-17	-0,98	48,65
feb-17	-0,02	113,88
mar-17	0,16	66,64
abr-17	0,62	58,36
may-17	1,05	115,91
jun-17	0,55	47,21
jul-17	0,73	59,65
ago-17	0,76	148,68
sept-17	1,30	89,38
oct-17	-0,57	58,68
nov-17	0,77	64,89
dic-17	0,98	65,04
ene-18	1,28	104,59
feb-18	1,04	64,73
mar-18	0,14	74,93
abr-18	-1,17	75,07
may-18	-0,08	40,77
jun-18	-0,01	44,17
jul-18	0,38	27,41
ago-18	-0,34	69,50



sept-18	1,46	38,85
oct-18	0,53	48,45
nov-18	0,99	68,96
dic-18	0,93	86,99
ene-19	0,68	94,26
feb-19	-0,50	45,36
mar-19	0,75	77,72
abr-19	0,34	132,89
may-19	0,34	74,72
jun-19	1,47	52,55
Jul-19	-0,39	111,66
ago-19	-1,08	80,98
sept-19	0,56	63,17
oct-19	-0,93	63,17
nov-19	-1,84	84,11
dic-19	-1,36	96,77
ene-20	-0,23	89,62
feb-20	0,28	56,63
mar-20	1,43	82,26
abr-20	-0,48	41,81
may-20	0,58	94,83
jun-20	1,07	56,63
Jul-20	-0,55	36,90
ago-20	-0,72	50,79
sept-20	0,19	60,15
oct-20	1,26	102,84

El análisis de correlación de Spearman entre la Oscilación Antártica (AAO) y las precipitaciones en la cuenca del Lago Fagnano arrojó un coeficiente de $r = 0,108$, lo que indica una relación débil o prácticamente nula entre ambas variables. Este resultado es consistente con lo observado en el punto 5.3, donde también se evidenció una baja correlación entre la AAO y los niveles del lago. Lo anterior sugiere que, al igual que con el nivel del lago, la influencia de la AAO sobre las precipitaciones podría no ser inmediata o directa, y que su efecto podría estar mediado por desfases temporales.



5.5 Validación con estudios similares.

Los resultados de este estudio permiten afirmar que la altimetría satelital constituye una herramienta válida para la reconstrucción de series históricas de niveles en cuerpos lacustres con escasa instrumentación, como el Lago Fagnano, y que puede extenderse a otros sistemas hídricos del sur de Chile para evaluar los efectos del cambio climático y fenómenos como la AAO. Estudios previos respaldan esta afirmación: por ejemplo, Fuentes-Aguilera et al. (2024) demostraron que la altimetría satelital es adecuada para reconstruir los niveles del Lago Ranco, basándose en altos valores de correlación entre los datos obtenidos por los satélites y las mediciones de la DGA. De manera similar, Kleinherenbrink et al. (2023) procesaron datos mediante ATiS para 144 lagos en Suecia, validando los resultados con observaciones in situ, mientras que Frappart et al. (2021) evaluaron el desempeño de la altimetría radar en lagos suizos con entornos montañosos, mostrando también altas correlaciones con mediciones locales.

En términos de confiabilidad del sensor para lagos, Ribeiro Neto et al. (2021) validaron series temporales de niveles de agua de 20 reservorios utilizando diversos satélites, incluyendo Envisat, SARAL, Sentinel-3A/-3B y Jason-2/3. Sus resultados indicaron que Sentinel-3A, el sensor empleado en la presente investigación, ofreció un desempeño superior al de la mayoría de los satélites evaluados, gracias a su resolución espacial detallada enfocada en lagos. Contando con los reportes de la literatura sobre la confiabilidad de los instrumentos utilizados para la estimación de los niveles del lago Fagnano, es posible establecer con mayor certeza la relación con el fenómeno de la AAO. Esto permite realizar comparaciones más precisas y confiables a partir de los datos de nivel del lago, mientras que los datos de precipitaciones, que también se relacionan con la AAO, resultan igualmente fiables por provenir de estaciones monitoreadas por la DGA. De esta forma se facilita la comprensión del fenómeno de la AAO sobre la zona en cuestión.

Por otro lado, varios estudios muestran que la AAO tiene un rol importante en la variabilidad de la precipitación en regiones afectadas: por ejemplo, Reason & Rouault (2005) encuentran que la fase positiva de la AAO se asocia con disminución de precipitación invernal en el oeste de Sudáfrica; Tang et al. (2023) exploran los efectos zonalmente simétricos de la AAO durante el verano en latitudes del hemisferio norte; y



Babian et al. (2016) evaluaron cómo los modelos climáticos reproducen la relación entre AAO y precipitaciones, obteniendo patrones espaciales y correlaciones consistentes con observaciones. Esto refuerza que la AAO es un fenómeno útil para entender y potencialmente predecir variaciones pluviométricas en zonas impactadas por sus fases.



6. Capítulo 6 CONCLUSIÓN.

En el presente estudio se analizó la influencia de la Oscilación Antártica (AAO) sobre los niveles del lago patagónico Fagnano, ubicado en la comuna de Timaukel, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, cuya cuenca se extiende entre los 54°15' y 54°47' de latitud sur. El análisis consideró tres variables principales: la AAO, los niveles del lago obtenidos mediante altimetría satelital y validados con datos de la DGA, y las precipitaciones registradas en la cuenca.

La AAO, al manifestarse como diferencias de presión en latitudes medias y altas (40–65°S), influye en la dinámica de los sistemas frontales que afectan al extremo austral de Chile. Esto resulta particularmente relevante para el Lago Fagnano, ubicado en torno a los 54°S, donde dicha influencia puede verse reflejada en variaciones hidrológicas. En este trabajo se definió un período común de comparación (abril de 2016 – octubre de 2020) para las tres variables, permitiendo efectuar análisis correlacionales.

Los resultados muestran que la relación entre la AAO y las precipitaciones fue débil ($r = 0,108$), lo que indica una influencia poco directa e incluso diferida en el tiempo. Algo similar ocurre con la correlación entre la AAO y los niveles del lago ($r = 0,069$), lo que refuerza la idea de que el fenómeno no se refleja de forma inmediata en las variaciones hidrológicas, aunque podría tener efectos al considerar desfases temporales. En contraste, los datos altimétricos obtenidos mediante ALTiS mostraron una alta concordancia con los registros de la DGA ($r = 0,736$ e índice Kling-Gupta = 0,713), lo que valida el uso de la altimetría satelital como herramienta confiable de monitoreo. Por su parte, la relación entre precipitaciones y niveles del lago resultó moderadamente baja ($r = 0,350$), sugiriendo que, si bien las precipitaciones contribuyen, no constituyen la principal fuente de variación del lago. Esto se explica por el régimen climático de tipo tundra polar, con precipitaciones moderadas y homogéneas durante el año, y por el aporte adicional del deshielo estacional en verano en un lago de origen tectónico-glaciar.

Por otro lado, el análisis de la AAO constituye un primer paso para comprender la influencia de fenómenos de gran escala en la dinámica hidrológica local.



Entre las limitaciones del estudio destaca la disponibilidad de datos altimétricos, ya que el satélite Sentinel-3A comenzó a operar recién en 2016, lo que restringe la posibilidad de evaluar tendencias de largo plazo. Por ello, futuras investigaciones podrían integrar otras fuentes de información y considerar fenómenos adicionales, como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), con el fin de obtener una visión más completa de las forzantes climáticas que afectan a la región austral.

Capítulo 7 REFERENCIAS

- (1) Adrián, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., Livingstone, D. M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. A., & Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2), 2283–2297. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6 part 2.2283](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283)
- (2) Agencia Espacial Europea (ESA). (2025). *Sentinel-3*. [https://www.esa.int/Applications/Observing the Earth/Copernicus/Sentinel-3](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3)
- (3) Aminjafari, S., Brown, I. A., Frappart, F., Papa, F., Blarel, F., Mayamey, F. V., & Jaramillo, F. (2024). Distinctive patterns of water level change in Swedish lakes driven by climate and human regulation. *Water Resources Research*, 60(3), e2023WR036160. <https://doi.org/10.1029/2023WR036160>
- (4) Aragón-Hernández, J. L., Aguilar-Martínez, G. A., Velázquez-Ríos, U., Jiménez-Magaña, M. R., & Maya-Franco, A. (2019). *Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación* [Spatial distribution of hydrological variables: Implementation and evaluation of interpolation methods]. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(2). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- (5) Bahamondez Provoste, C. F. (2021). *Cambio climático y su efecto sobre los cuerpos de agua de Chile central: Variación interanual superficial de los lagos andinos (32°S-36°S) entre 1984 y 2020* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile].
- (6) Blarel, F., Biancamaria, S., Allain, D., Birol, F., Bognin, S., Chevrier, R., Crétaux, J.-F., Djeumeni, L., Lefebvre, J., Leclercq, L., Léger, F., Morrow, R., & Niño, F. (2023, noviembre). *A/TiS software for generating time-series of water levels from radar altimetry data* [Póster]. HydroSpace 2023, Lisboa, Portugal. HAL Open Science. <https://hal.science/hal-04385828v1>
- (7) Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., ... & Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215–231.
- (8) Carrera-Villacrés, D. V., Guevara-García, P. V., Tamayo-Bacacela, L. C., Balarezo-Aguilar, A. L., Narváez-Rivera, C. A., & Morocho-López, D. R. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media [Filling series annual meteorological data by statistical methods in the coastal zone from Ecuador and Andes, and calculation of rainfall]. *Idesia (Arica)*, 34(3), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016000300010>
- (9) Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). (2015). *Lago Fagnano, Tierra del Fuego – Landsat-8 OLI – 10 de octubre de 2015*. Gobierno de Argentina. Recuperado el 29 de abril de 2025, de <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion->



[masiva/materiales-educativos/lago-fagnano-tierra-del-fuego-landsat-8-oli-10-de-octubre-de-2015](#)

- (10) Coronato, A. M. J., Rabassa, J. O., Ponce, J. F., & Seppälä, M. (2009). *Glacial geomorphology of the Pleistocene Lake Fagnano ice lobe, Tierra del Fuego, southern South America.* *Geomorphology*, 112(1–2), 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.005>
- (11) Deng, X., & Peng, F. (2020). Validation of Sentinel-3A SAR mode sea level anomalies around the Australian coastal region. *Remote Sensing of Environment*, 237, Article 111548. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111548>
- (12) Di Castri, F., & Hajek, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile.
- (13) Filmagallanes. (2025). *Lago Fagnano*. Sitio administrado por el Gobierno Regional de Magallanes y CORFO, Programa de Apoyo a Iniciativas de Impacto Estratégico. <https://filmagallanes.cl/locacion/lago-fagnano/>
- (14) Findel mundo Turismo. (2025). Caminar por la cabecera del Lago Fagnano. Sitio web administrado por el Instituto Fueguino de Turismo. Recuperado el 29 de abril de 2025, de <https://findelmundo.tur.ar/es/c/caminar-por-la-cabecera-del-lago-fagnano/3964>
- (15) Fogt, R. L., & Marshall, G. J. (2020). *The Southern Annular Mode: Variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 11(3), e652. <https://doi.org/10.1002/wcc.652>
- (16) Frappart, F., Blarel, F., Fayad, I., Bergé-Nguyen, M., Crétaux, J. F., Shu, S., Schregenberger, J., & Baghdadi, N. (2021). Evaluation of the performances of radar and lidar altimetry missions for water level retrievals in mountainous environment: The case of the swiss lakes. *Remote Sensing*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/rs13112196>
- (17) Frappart, F., Malbéteau, Y., Marieu, V., Léger, F., Seoane, L., Maisongrande, P., & Siméon, J. (2018). Evolution of the performances of radar altimetry missions from ERS-2 to Sentinel-3A over the Inner Niger Delta. *Remote Sensing*, 10(6), 833. <https://doi.org/10.3390/rs10060833>
- (18) Frery, M.-L., Siméon, M., Goldstein, C., Féménias, P., Borde, F., Houpert, A., & Olea Garcia, A. (2020). Sentinel-3 microwave radiometers: Instrument description, calibration and geophysical products performances. *Remote Sensing*, 12(16), 2590. <https://doi.org/10.3390/rs12162590>
- (19) Fuentes-Aguilera, P., Rodríguez López, L., Bourrel, L., & Frappart, F. (2025). Hydroclimatic variability of the Grey River Basin (Chilean Patagonia): Trends and relationship with large-scale climatic phenomena. *Water*, 17(13), 1895. <https://doi.org/10.3390/w17131895>
- (20) Fuentes-Aguilera, P.; Rodríguez-López, L.; Bourrel, L.; Frappart, F. Recovery of Time Series of Water Volume in Lake Ranco (South Chile) through Satellite Altimetry and Its Relationship with Climatic Phenomena. *Water* 2024, 16(14), 1997. <https://doi.org/10.3390/w16141997>
- (21) Gong, D.-Y., & Wang, S.-W. (1999). *Definition of Antarctic Oscillation index*. *Geophysical Research Letters*, 26(4), 459–462. <https://doi.org/10.1029/1999GL900003>



- (22) Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- (23) Handler, A. M., Weber, M., Dumelle, M., Jansen, L. S., Carleton, J. N., Schaeffer, B. A., Paulsen, S. G., Barnum, T., Rea, A. W., Neale, A., & Compton, J. E. (2025). Ecological condition of mountain lakes in the conterminous United States and vulnerability to human development. *Ecological Indicators*, 173, 113402. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113402>
- (24) Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology* (5th ed.). Academic Press.
- (25) Hu, X., Eichner, J., Gong, D. et al. Combined impact of ENSO and Antarctic Oscillation on austral spring precipitation in Southeastern South America (SESA). *Clim Dyn* 61, 399–412 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06592-8>
- (26) Jones, J. M., & Widmann, M. (2004). Early peak in Antarctic oscillation index. *Nature*, 432(7016), 290–291. <https://doi.org/10.1038/432290b>
- (27) Justino, F., & Peltier, W. R. (2008). Climate anomalies induced by the Arctic and Antarctic oscillations: Glacial maximum and present-day perspectives. *Journal of Climate*, 21(3), 459–475. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1703.1>
- (28) Kenny, D. A. (1979). *Correlation and causality*. Wiley.
- (29) Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331.
- (30) Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- (31) Magee, M. R., Hein, C. L., Walsh, J. R., Shannon, P. D., Vander Zanden, M. J., & Campbell, T. B. (2019). *Scientific advances and adaptation strategies for Wisconsin lakes facing climate change*. *Lake and Reservoir Management*, 35(4), 364–381. <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1622612>
- (32) Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, 16(24), 4134–4143. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2)
- (33) Martínez Ortega, Rosa María, Tuya Pendás, Leonel C, Martínez Ortega, Mercedes, Pérez Abreu, Alberto, & Cánovas, Ana María. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2) http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&lng=es&tlng=es.
- (34) Mbigi, D., Xiao, Z. El modo anular del sur: su influencia en la variabilidad interanual de la precipitación en el norte de Australia. *Clim Dyn* 62, 4455–4468 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07029-6>



- (35) Ministerio de Turismo y Deportes de la Nación. (2025). *Lagos Escondido y Fagnano*. La Ruta Natural. Recuperado el 29 de abril de 2025, de <https://larutanatural.gob.ar/es/imperdible/19/lagos-escondido-y-fagnano>
- (36) Montes, C. (2024, 2 de agosto). *Un extraño fenómeno está afectando la Antártica y modificará el clima del país en las próximas semanas*. La Tercera. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/un-extranio-fenomeno-esta-afectando-la-antartica-y-modificara-el-clima-del-pais-en-las-proximas-semanas/KNAWAJO5VNFFPFJTZUOBWOULY/>
- (37) Morales, P., & Rodríguez, L. (2016). Aplicación de los coeficientes correlación de Kendall y Spearman. *Agrollanía*, 13.
- (38) Onorato, M. R. (2019). El origen de los sismos en Tierra del Fuego. La Lupa: Colección fueguina de divulgación científica, (14), 14–18. Ushuaia: CIGEOBIO-UNJS-CONICET.
- (39) Otieno, H., Yang, J., Liu, W., & Han, D. (2014). *Influence of rain gauge density on interpolation method selection*. Journal of Hydrologic Engineering, 19(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000964](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000964)
- (40) Oularé, S., Jofack Sokeng, V.-C., Kouamé, K. F., Kouassi Komenan, C. A., Danumah, J. H., Mertens, B., Akpa, Y. L., Catry, T., & Pillot, B. (2022). Contribution of Sentinel-3A radar altimetry data to the study of the water level variations in Lake Buyo (West of Côte d'Ivoire). *Remote Sensing*, 14(21), 5602. <https://doi.org/10.3390/rs14215602>
- (41) Pizarro, R. T., Ramírez, C. B., & Flores, J. P. (2003). *Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos*. Bosque (Valdivia), 24(3), 31–38. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002003000300003>
- (42) Pohl, B., Fauchereau, N., Reason, C. J. C., & Rouault, M. (2010). Relationships between the Antarctic Oscillation, the Madden–Julian oscillation, and ENSO, and consequences for rainfall analysis. *Journal of Climate*, 23(2), 238–254.
- (43) Quintana, J. M., & Aceituno, P. (2012). *Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30–43° S*. Atmósfera, 25(1), 1–22.
- (44) Reason, C. J. C., & Rouault, M. (2005). Links between the Antarctic Oscillation and winter rainfall over western South Africa. *Geophysical research letters*, 32(7).
- (45) Ribeiro Neto, A. (2021). *Satellite altimetry over small reservoirs in the Brazilian semiarid region*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26, Article e20210038. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210038>
- (46) Schorghofer, N., & Rothman, D. H. (2000). *Basins of attraction on random topography*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0009383>
- (47) Shuman, B., & Donnelly, J. P. (2006). The influence of seasonal precipitation and temperature regimes on lake levels in the northeastern United States during the Holocene. *Quaternary Research*, 65(1), 44–56.
- (48) Silvestri, G. E., & Vera, C. S. (2003). Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2115. <https://doi.org/10.1029/2003GL018277>
- (49) Tang, Y., Duan, A., & Hu, D. (2023). Influence of the Antarctic oscillation on summer precipitation over East Asia. *Atmospheric Research*, 292, 106847.



- (50) Thompson, D. W. J., & Wallace, J. M. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. *Part I: Month-to-month variability. Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(8), 1041–1050. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057)
- (51) Tong, K., Su, F., & Xu, B. (2016). Quantifying the contribution of glacier meltwater in the expansion of the largest lake in Tibet. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19), 11-158.
- (52) U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2025). *Inverse Distance Gage Weighting*. Recuperado de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/meteorology/precipitation/inverse-distance-gage-weighting>
- (53) Uribe, J. M., Cabrera, R., de la Fuente, A., & Paneque, M. (2012). *Atlas bioclimático de Chile* (224 pp.). Santiago de Chile: Universidad de Chile. ISBN 978-956-19-0774-4.
- (54) Vallis, G. K. (2017). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- (55) Wantzen, K. M., Rothhaupt, K.-O., Mörtl, M., Cantonati, M., G.-Tóth, L., & Fischer, P. (2008). Ecological effects of water-level fluctuations in lakes. *Hydrobiologia*, 613(1), 1–184. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9192-6>
- (56) Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lengers, J.D. et al. Global lake responses to climate change. *Nat Rev Earth Environ* 1, 388–403 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>
- (57) Xercavins, A. (1984). Notas sobre el clima de Magallanes (Chile). *Revista de geografía*, 95-110.
- (58) Zhang, Z., Cheng, Y., & Liu, N. C. (2014). Comparison of the effect of mean-based method and z-score for field normalization of citations at the level of Web of Science subject categories. *Scientometrics*, 101(3), 1679–1693. <https://doi.org/10.1007/s11192-014-1294-7>



Capítulo 8 ANEXOS

Tabla 11.-Datos de precipitaciones completados estaciones Río Azopardo, Lago Deseado, Pampa Huanaco y Río Betbeder para el período abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia con datos del sistema hidrométrico de la DGA.

Año	Mes	Río Azopardo en su desembocadura [mm]	Lago Deseado [mm]	Pampa Huanaco [mm]	Río Betbeder en su desembocadura [mm]
2016	abr-16	28,8	23,6	17	
	may-16	15,1	11,1	8,4	
	jun-16	95,4	51,9	30,9	
	jul-16	156,1	52,7	48,6	
	ago-16	102,9	18,7	24,6	
	sept-16	25,8	14,6	5,6	
	oct-16	57,3	46,7	28,7	
	nov-16	125,4	53,5	36	
	dic-16	73,4	41	41,4	
2017	ene-17	49,3	54,2	42,9	
	feb-17	138,9	130,7	59,7	
	mar-17	77,8	67,4	48,2	
	abr-17	68,9	46,6	51,6	
	may-17	160,8	94,4	62,7	
	jun-17	83,7	12,1	19	
	jul-17	103,5	33,7	11,9	
	ago-17	237,9	105,4	43,4	
	sept-17	154,2	30,1	36,6	
	oct-17	86,7	44,4	26,2	
	nov-17	104,7	40,8	22	
	dic-17	96,2	52,6	26	
2018	ene-18	133,3	99	63,6	
	feb-18	95,9	57,9	20,9	
	mar-18	107,2	65,1	31,9	
	abr-18	111	56,9	33,3	
	may-18	48,5	43,9	25,8	
	jun-18	76,9	20,5	12,2	
	jul-18	38,09	22,4	14,68	
	ago-18	116,4	23,6	33,9	
	sept-18	64,7	17,7	15,7	
	oct-18	69,4	22	37,6	
	nov-18	78	48,5	19,2	93,6
	dic-18	100,5	72,2	41,6	104
2019	ene-19	119,7	71,9	36,5	111,2



	feb-19	59,7	42,4	21,1	47,2
	mar-19	87,6	51,2	54,4	91,8
	abr-19	135,7	103,4	79,6	167,4
	may-19	99	34	40,1	89
	jun-19	71,3	16,6	32,2	62,4
	jul-19	160,2	37,4	43,7	136,8
	ago-19	117,66	28,2	18,48	114,4
	sept-19	102,2	24,2	26	67
	oct-19	94,2	15,4	15,8	81,2
	nov-19	108,6	14,3	21,2	123
	dic-19	110,5	70	25,2	130,6
2020	ene-20	102,1	72	62,5	100
	feb-20	121,3	72,8	61,2	113,88
	mar-20	95,2	71,1	47,7	93,2
	abr-20	57,4	24,4	12,1	51
	may-20	107,3	103,3	75,5	91,2
	jun-20	78,2	13,1	14,4	77,6
	jul-20	55,3	11,8	20,6	40,8
	ago-20	82	11,9	10,2	62
	sept-20	109,6	30,3	19,86	54
	oct-20	128,9	68,2	53,2	120,4



Tabla 12.- Precipitaciones en el centroide de la cuenca del Lago Fagnano para el periodo abril 2016-octubre 2020. Fuente:
Elaboración propia

Año	Mes	Precipitación Cuenca [mm]
2016	abr-16	24,09
	may-16	12,17
	jun-16	65,92
	jul-16	99,33
	ago-16	59,35
	sept-16	17,17
	oct-16	46,38
	nov-16	81,67
	dic-16	56,10
	2017	
	ene-17	48,65
	feb-17	113,88
	mar-17	66,64
	abr-17	58,36
	may-17	115,91
	jun-17	47,21
	jul-17	59,65
	ago-17	148,68
	sept-17	89,38
	oct-17	58,68
	nov-17	64,89
	dic-17	65,04
2018	ene-18	104,59
	feb-18	64,73
	mar-18	74,93
	abr-18	75,07
	may-18	40,77
	jun-18	44,17
	jul-18	27,41
	ago-18	69,50
	sept-18	38,85
	oct-18	48,45
	nov-18	68,96
	dic-18	86,99
2019	ene-19	94,26
	feb-19	45,36
	mar-19	77,72
	abr-19	132,89
	may-19	74,72
	jun-19	52,55
	jul-19	111,66



	ago-19	85,02
	sept-19	63,17
	oct-19	63,17
	nov-19	84,11
	dic-19	96,77
2020	ene-20	89,62
	feb-20	100,30
	mar-20	82,26
	abr-20	41,81
	may-20	94,83
	jun-20	56,63
	jul-20	36,90
	ago-20	50,79
	sept-20	60,13
	oct-20	102,84



Tabla 13.-Nivel del Lago Fagnano tramo 1. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetría satelital.

Fecha	Elevación Tramo 1 [m]
07-05-2016	25,21
03-06-2016	25,22
30-06-2016	25,14
27-07-2016	25,18
23-08-2016	25,10
19-09-2016	25,09
16-10-2016	25,25
12-11-2016	25,31
09-12-2016	25,28
05-01-2017	25,25
01-02-2017	25,21
28-02-2017	25,22
27-03-2017	25,15
23-04-2017	25,24
20-05-2017	25,28
13-07-2017	25,25
09-08-2017	25,34
05-09-2017	25,48
02-10-2017	25,47
29-10-2017	25,57
25-11-2017	25,60
22-12-2017	25,60
18-01-2018	25,66
14-02-2018	25,49
13-03-2018	25,52
06-05-2018	25,25
02-06-2018	25,27
29-06-2018	25,22
26-07-2018	25,13
22-08-2018	25,29
18-09-2018	25,04
15-10-2018	25,11
11-11-2018	25,31
08-12-2018	25,42
04-01-2019	25,37
31-01-2019	25,35
27-02-2019	25,25
26-03-2019	25,19
22-04-2019	25,36
19-05-2019	25,27
15-06-2019	25,38



12-07-2019	25,25
08-08-2019	25,32
04-09-2019	25,26
01-10-2019	25,24
28-10-2019	25,46
24-11-2019	25,57
21-12-2019	25,64
17-01-2020	25,62
13-02-2020	25,60
11-03-2020	25,61
07-04-2020	25,47
04-05-2020	25,47
31-05-2020	25,44
27-06-2020	25,42
24-07-2020	25,39
20-08-2020	25,27
16-09-2020	25,25
13-10-2020	25,33
09-11-2020	25,64
06-12-2020	25,62
02-01-2021	25,58
29-01-2021	25,36
25-02-2021	25,42
24-03-2021	25,20
20-04-2021	25,25
17-05-2021	25,20
13-06-2021	25,26
10-07-2021	25,39
06-08-2021	25,27
02-09-2021	25,33
29-09-2021	25,35
26-10-2021	25,40
22-11-2021	25,43
19-12-2021	25,49
15-01-2022	25,42
11-02-2022	25,56
10-03-2022	25,40
06-04-2022	25,34
03-05-2022	25,26
30-05-2022	25,27
26-06-2022	25,23
23-07-2022	25,16
19-08-2022	25,18



15-09-2022	25,13
12-10-2022	25,29
08-11-2022	25,43
05-12-2022	25,42
01-01-2023	25,38
28-01-2023	25,23
24-02-2023	25,06
23-03-2023	25,23
19-04-2023	25,14
16-05-2023	25,18
12-06-2023	25,27
09-07-2023	25,27
05-08-2023	25,22
01-09-2023	25,16
28-09-2023	25,16
25-10-2023	25,20
21-11-2023	25,42
18-12-2023	25,50
14-01-2024	25,39
10-02-2024	25,39
08-03-2024	25,42
04-04-2024	25,29
21-07-2024	25,08
17-08-2024	25,12
13-09-2024	25,15
10-10-2024	25,01



Tabla 14.-Nivel del Lago Fagnano tramo 2. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetria satelital.

Fecha	Elevación Tramo 2 [m]
23-04-2016	25,53
20-05-2016	25,48
16-06-2016	25,46
13-07-2016	25,45
09-08-2016	25,44
05-09-2016	25,47
02-10-2016	25,46
29-10-2016	25,47
25-11-2016	25,67
22-12-2016	25,58
18-01-2017	25,48
14-02-2017	25,48
13-03-2017	25,52
09-04-2017	25,54
06-05-2017	25,53
02-06-2017	25,67
29-06-2017	25,62
26-07-2017	25,55
22-08-2017	25,85
18-09-2017	25,79
15-10-2017	25,74
11-11-2017	25,84
08-12-2017	25,94
04-01-2018	25,88
31-01-2018	25,89
27-02-2018	25,75
26-03-2018	25,72
22-04-2018	25,53
19-05-2018	25,49
15-06-2018	25,46
12-07-2018	25,46
08-08-2018	25,37
04-09-2018	25,46
01-10-2018	25,45
28-10-2018	25,48
24-11-2018	25,64
21-12-2018	25,70
17-01-2019	25,65
13-02-2019	25,58
12-03-2019	25,53
08-04-2019	25,57



05-05-2019	25,65
01-06-2019	25,59
28-06-2019	25,57
25-07-2019	25,51
21-08-2019	25,42
17-09-2019	25,59
14-10-2019	25,60
10-11-2019	25,82
07-12-2019	25,94
03-01-2020	25,94
30-01-2020	25,92
26-02-2020	25,90
24-03-2020	25,89
20-04-2020	25,75
13-06-2020	25,69
10-07-2020	25,59
06-08-2020	25,58
02-09-2020	25,55
29-09-2020	25,68
26-10-2020	25,79
22-11-2020	25,88
19-12-2020	25,80
15-01-2021	25,82
11-02-2021	25,73
10-03-2021	25,60
06-04-2021	25,52
03-05-2021	25,56
30-05-2021	25,58
26-06-2021	25,52
23-07-2021	25,65
19-08-2021	25,68
15-09-2021	25,69
12-10-2021	25,70
08-11-2021	25,75
05-12-2021	25,79
01-01-2022	25,71
28-01-2022	25,71
24-02-2022	25,60
23-03-2022	25,65
19-04-2022	25,64
16-05-2022	25,46
12-06-2022	25,45
09-07-2022	25,48



05-08-2022	25,42
01-09-2022	25,47
28-09-2022	25,49
25-10-2022	25,69
21-11-2022	25,72
18-12-2022	25,68
14-01-2023	25,66
10-02-2023	25,52
09-03-2023	25,49
05-04-2023	25,54
02-05-2023	25,44
29-05-2023	25,46
25-06-2023	25,45
22-07-2023	25,46
18-08-2023	25,43
14-09-2023	25,42
11-10-2023	25,47
07-11-2023	25,71
04-12-2023	25,79
31-12-2023	25,73
27-01-2024	25,74
23-02-2024	25,62
21-03-2024	25,65
17-04-2024	25,56
03-08-2024	25,49
30-08-2024	25,40
26-09-2024	25,51



Tabla 15.-Nivel del Lago Fagnano tramo 3. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetria satelital.

Fecha	Elevación Tramo 3 [m]
14-04-2016	26,21
11-05-2016	25,93
07-06-2016	25,97
04-07-2016	26,01
31-07-2016	25,94
27-08-2016	25,94
23-09-2016	26,01
20-10-2016	26,13
16-11-2016	26,20
13-12-2016	26,20
09-01-2017	26,16
05-02-2017	25,99
04-03-2017	26,12
31-03-2017	26,08
27-04-2017	26,07
24-05-2017	26,21
20-06-2017	26,21
17-07-2017	26,13
13-08-2017	26,28
09-09-2017	26,30
06-10-2017	26,40
02-11-2017	26,48
29-11-2017	26,55
26-12-2017	26,50
22-01-2018	26,49
18-02-2018	26,32
13-04-2018	26,27
10-05-2018	26,13
06-06-2018	26,07
03-07-2018	26,00
30-07-2018	25,97
26-08-2018	25,96
22-09-2018	25,98
19-10-2018	25,97
15-11-2018	26,18
12-12-2018	26,17
08-01-2019	26,23
04-02-2019	26,16
30-03-2019	26,04
26-04-2019	26,11
23-05-2019	26,04



19-06-2019	25,98
16-07-2019	26,01
12-08-2019	26,01
08-09-2019	25,96
05-10-2019	26,04
01-11-2019	26,21
28-11-2019	26,41
25-12-2019	26,44
21-01-2020	26,47
17-02-2020	26,39
15-03-2020	26,34
11-04-2020	26,21
08-05-2020	26,04
04-06-2020	26,16
01-07-2020	26,04
28-07-2020	25,98
24-08-2020	26,12
20-09-2020	26,06
17-10-2020	26,27
13-11-2020	26,48
10-12-2020	26,48
06-01-2021	26,42
02-02-2021	26,34
01-03-2021	26,21
28-03-2021	26,16
24-04-2021	26,12
21-05-2021	26,19
17-06-2021	26,13
14-07-2021	26,22
10-08-2021	26,13
06-09-2021	26,15
03-10-2021	26,20
30-10-2021	26,30
26-11-2021	26,37
23-12-2021	26,34
19-01-2022	26,42
15-02-2022	26,33
14-03-2022	26,33
10-04-2022	26,28
07-05-2022	26,16
03-06-2022	26,11
30-06-2022	26,00
27-07-2022	26,00



23-08-2022	26,01
19-09-2022	26,04
16-10-2022	26,11
12-11-2022	26,29
09-12-2022	26,33
05-01-2023	26,26
01-02-2023	26,21
28-02-2023	26,20
27-03-2023	26,07
23-04-2023	25,98
20-05-2023	26,00
16-06-2023	26,09
13-07-2023	26,09
09-08-2023	26,01
05-09-2023	26,02
02-10-2023	26,01
29-10-2023	26,27
25-11-2023	26,33
22-12-2023	26,39
18-01-2024	26,32
14-02-2024	26,19
12-03-2024	26,23
08-04-2024	26,19
25-07-2024	25,93
21-08-2024	25,93
17-09-2024	26,07



Tabla 16.-Nivel del Lago Fagnano tramo 4. Fuente: Elaboración propia a partir de altimetria satelital.

Fecha	Elevación Tramo 4 [m]
20-06-2016	26,03
17-07-2016	26,02
13-08-2016	26,05
09-09-2016	26,06
06-10-2016	26,13
02-11-2016	26,17
29-11-2016	26,28
26-12-2016	26,18
22-01-2017	26,13
18-02-2017	26,16
17-03-2017	26,16
13-04-2017	26,17
10-05-2017	26,12
06-06-2017	26,21
03-07-2017	26,21
30-07-2017	26,22
26-08-2017	26,19
22-09-2017	26,43
19-10-2017	26,49
15-11-2017	26,46
12-12-2017	26,58
08-01-2018	26,52
04-02-2018	26,45
03-03-2018	26,36
30-03-2018	26,29
26-04-2018	26,21
23-05-2018	26,20
19-06-2018	26,09
16-07-2018	26,05
12-08-2018	25,96
08-09-2018	26,11
05-10-2018	26,01
01-11-2018	26,13
28-11-2018	26,19
25-12-2018	26,31
21-01-2019	26,31
17-02-2019	26,15
16-03-2019	26,17
12-04-2019	26,20
09-05-2019	26,27
05-06-2019	26,18



02-07-2019	26,16
29-07-2019	26,25
25-08-2019	26,15
21-09-2019	26,27
18-10-2019	26,26
14-11-2019	26,42
11-12-2019	26,61
07-01-2020	26,45
03-02-2020	26,58
01-03-2020	26,53
28-03-2020	26,53
24-04-2020	26,40
21-05-2020	26,23
17-06-2020	26,38
14-07-2020	26,22
10-08-2020	26,11
03-10-2020	26,16
30-10-2020	26,40
26-11-2020	26,46
23-12-2020	26,54
19-01-2021	26,45
15-02-2021	26,27
14-03-2021	26,24
10-04-2021	26,19
07-05-2021	26,17
03-06-2021	26,20
30-06-2021	26,16
27-07-2021	26,30
23-08-2021	26,31
19-09-2021	26,24
16-10-2021	26,36
12-11-2021	26,37
09-12-2021	26,37
05-01-2022	26,39
01-02-2022	26,37
28-02-2022	26,21
27-03-2022	26,24
23-04-2022	26,19
20-05-2022	26,14
16-06-2022	26,22
13-07-2022	26,14
09-08-2022	26,18
05-09-2022	26,10



02-10-2022	26,16
29-10-2022	26,23
25-11-2022	26,36
22-12-2022	26,33
18-01-2023	26,23
14-02-2023	26,13
13-03-2023	26,15
09-04-2023	26,24
02-06-2023	26,19
29-06-2023	26,04
26-07-2023	26,04
22-08-2023	26,07
18-09-2023	26,05
15-10-2023	26,13
11-11-2023	26,35
08-12-2023	26,37
04-01-2024	26,38
31-01-2024	26,32
27-02-2024	26,29
25-03-2024	26,28
21-04-2024	26,24
07-08-2024	26,00
03-09-2024	26,09
30-09-2024	26,06



Tabla 17.- Nivel del Lago Fagnano compensado con datos de la DGA y valores de Altis para el periodo abril 2016-octubre 2020.
Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Nivel Altis CORREGIDO [m]
14-04-2016	36,69
23-04-2016	36,54
07-05-2016	36,51
11-05-2016	36,41
20-05-2016	36,49
03-06-2016	36,52
07-06-2016	36,45
16-06-2016	36,47
20-06-2016	36,41
30-06-2016	36,44
04-07-2016	36,49
13-07-2016	36,46
17-07-2016	36,40
27-07-2016	36,48
31-07-2016	36,42
09-08-2016	36,45
13-08-2016	36,43
23-08-2016	36,40
27-08-2016	36,42
05-09-2016	36,48
09-09-2016	36,44
19-09-2016	36,39
23-09-2016	36,49
02-10-2016	36,47
06-10-2016	36,51
16-10-2016	36,55
20-10-2016	36,61
29-10-2016	36,48
02-11-2016	36,55
12-11-2016	36,61
16-11-2016	36,68
25-11-2016	36,68
29-11-2016	36,66
09-12-2016	36,58
13-12-2016	36,68
22-12-2016	36,59
26-12-2016	36,56
05-01-2017	36,55
09-01-2017	36,64
18-01-2017	36,49



22-01-2017	36,51
01-02-2017	36,51
05-02-2017	36,47
14-02-2017	36,49
18-02-2017	36,54
28-02-2017	36,52
04-03-2017	36,60
13-03-2017	36,53
17-03-2017	36,54
27-03-2017	36,45
31-03-2017	36,56
09-04-2017	36,55
13-04-2017	36,55
23-04-2017	36,54
27-04-2017	36,55
06-05-2017	36,54
10-05-2017	36,50
20-05-2017	36,58
24-05-2017	36,69
02-06-2017	36,68
06-06-2017	36,59
20-06-2017	36,69
29-06-2017	36,63
03-07-2017	36,59
13-07-2017	36,55
17-07-2017	36,61
26-07-2017	36,56
30-07-2017	36,60
09-08-2017	36,64
13-08-2017	36,76
22-08-2017	36,86
26-08-2017	36,57
05-09-2017	36,78
09-09-2017	36,78
18-09-2017	36,80
22-09-2017	36,81
02-10-2017	36,77
06-10-2017	36,88
15-10-2017	36,75
19-10-2017	36,87
29-10-2017	36,87
02-11-2017	36,96
11-11-2017	36,85



15-11-2017	36,84
25-11-2017	36,90
29-11-2017	37,03
08-12-2017	36,95
12-12-2017	36,96
22-12-2017	36,90
26-12-2017	36,98
04-01-2018	36,89
08-01-2018	36,90
18-01-2018	36,96
22-01-2018	36,97
31-01-2018	36,90
04-02-2018	36,83
14-02-2018	36,79
18-02-2018	36,80
27-02-2018	36,76
03-03-2018	36,74
13-03-2018	36,82
26-03-2018	36,73
30-03-2018	36,67
13-04-2018	36,75
22-04-2018	36,54
26-04-2018	36,59
06-05-2018	36,55
10-05-2018	36,61
19-05-2018	36,50
23-05-2018	36,58
02-06-2018	36,57
06-06-2018	36,55
15-06-2018	36,47
19-06-2018	36,47
29-06-2018	36,52
03-07-2018	36,48
12-07-2018	36,47
16-07-2018	36,43
26-07-2018	36,43
30-07-2018	36,45
08-08-2018	36,38
12-08-2018	36,34
22-08-2018	36,59
26-08-2018	36,44
04-09-2018	36,47
08-09-2018	36,49



18-09-2018	36,34
22-09-2018	36,46
01-10-2018	36,46
05-10-2018	36,39
15-10-2018	36,41
19-10-2018	36,45
28-10-2018	36,49
01-11-2018	36,51
11-11-2018	36,61
15-11-2018	36,66
24-11-2018	36,65
28-11-2018	36,57
08-12-2018	36,72
12-12-2018	36,65
21-12-2018	36,71
25-12-2018	36,69
04-01-2019	36,67
08-01-2019	36,71
17-01-2019	36,66
21-01-2019	36,69
31-01-2019	36,65
04-02-2019	36,64
13-02-2019	36,59
17-02-2019	36,53
27-02-2019	36,55
12-03-2019	36,54
16-03-2019	36,55
26-03-2019	36,49
30-03-2019	36,52
08-04-2019	36,58
12-04-2019	36,58
22-04-2019	36,66
26-04-2019	36,59
05-05-2019	36,66
09-05-2019	36,65
19-05-2019	36,57
23-05-2019	36,52
01-06-2019	36,60
05-06-2019	36,56
15-06-2019	36,68
19-06-2019	36,46
28-06-2019	36,58
02-07-2019	36,54



12-07-2019	36,55
16-07-2019	36,49
25-07-2019	36,52
29-07-2019	36,63
08-08-2019	36,62
12-08-2019	36,49
21-08-2019	36,43
25-08-2019	36,53
04-09-2019	36,56
08-09-2019	36,44
17-09-2019	36,60
21-09-2019	36,65
01-10-2019	36,54
05-10-2019	36,52
14-10-2019	36,61
18-10-2019	36,64
28-10-2019	36,76
01-11-2019	36,69
10-11-2019	36,83
14-11-2019	36,80
24-11-2019	36,87
28-11-2019	36,89
07-12-2019	36,95
11-12-2019	36,99
21-12-2019	36,94
25-12-2019	36,92
03-01-2020	36,95
07-01-2020	36,83
17-01-2020	36,92
21-01-2020	36,95
30-01-2020	36,93
03-02-2020	36,96
13-02-2020	36,90
17-02-2020	36,87
26-02-2020	36,91
01-03-2020	36,91
11-03-2020	36,91
15-03-2020	36,82
24-03-2020	36,90
28-03-2020	36,91
07-04-2020	36,77
11-04-2020	36,69
20-04-2020	36,76



24-04-2020	36,78
04-05-2020	36,77
08-05-2020	36,52
21-05-2020	36,61
31-05-2020	36,74
04-06-2020	36,64
13-06-2020	36,70
17-06-2020	36,76
27-06-2020	36,72
01-07-2020	36,52
10-07-2020	36,60
14-07-2020	36,60
24-07-2020	36,69
28-07-2020	36,46
06-08-2020	36,59
10-08-2020	36,49
20-08-2020	36,57
24-08-2020	36,60
02-09-2020	36,56
16-09-2020	36,55
20-09-2020	36,54
29-09-2020	36,69
03-10-2020	36,54
13-10-2020	36,63
17-10-2020	36,75
26-10-2020	36,80
30-10-2020	36,78



Tabla 18.- Datos utilizados para correlación de Spearman entre nivel de AITIS corregido y el nivel del Lago Fagnano según la DGA para el periodo abril 2016 –octubre 2020. Fuente: Elaboración propia

Fecha	Nivel Corregido [m]	Nivel DGA [m]
14-04-2016	36,69	36,54
23-04-2016	36,54	36,48
07-05-2016	36,51	36,43
11-05-2016	36,41	36,45
20-05-2016	36,49	36,35
03-06-2016	36,52	36,37
07-06-2016	36,45	36,35
16-06-2016	36,47	36,43
20-06-2016	36,41	36,41
30-06-2016	36,44	36,40
13-07-2016	36,46	36,48
27-07-2016	36,48	36,49
31-07-2016	36,42	36,52
09-08-2016	36,45	36,53
13-08-2016	36,43	36,54
23-08-2016	36,40	36,50
27-08-2016	36,42	36,49
05-09-2016	36,48	36,44
09-09-2016	36,44	36,47
19-09-2016	36,39	36,46
23-09-2016	36,49	36,53
02-10-2016	36,47	36,50
06-10-2016	36,51	36,54
16-10-2016	36,55	36,55
20-10-2016	36,61	36,51
29-10-2016	36,48	36,64
02-11-2016	36,55	36,58
12-11-2016	36,61	36,60
16-11-2016	36,68	36,63
25-11-2016	36,68	36,63
29-11-2016	36,66	36,56
09-12-2016	36,58	36,61
13-12-2016	36,68	36,61
22-12-2016	36,59	36,52
26-12-2016	36,56	36,52
05-01-2017	36,55	36,54
09-01-2017	36,64	36,53
18-01-2017	36,49	36,50
22-01-2017	36,51	36,50
01-02-2017	36,51	36,49



05-02-2017	36,47	36,51
14-02-2017	36,49	36,53
18-02-2017	36,54	36,52
28-02-2017	36,52	36,45
04-03-2017	36,60	36,51
13-03-2017	36,53	36,55
17-03-2017	36,54	36,46
27-03-2017	36,45	36,54
31-03-2017	36,56	36,46
09-04-2017	36,55	36,47
13-04-2017	36,55	36,46
23-04-2017	36,54	36,43
27-04-2017	36,55	36,43
06-05-2017	36,54	36,47
10-05-2017	36,50	36,42
20-05-2017	36,58	36,55
29-06-2017	36,63	36,49
08-12-2017	36,95	36,98
12-12-2017	36,96	36,95
22-12-2017	36,90	36,96
26-12-2017	36,98	37,03
04-01-2018	36,89	36,97
08-01-2018	36,90	36,97
18-01-2018	36,96	36,95
22-01-2018	36,97	37,04
31-01-2018	36,90	36,87
04-02-2018	36,83	36,99
14-02-2018	36,79	36,81
18-02-2018	36,80	36,79
27-02-2018	36,76	36,84
03-03-2018	36,74	36,76
13-03-2018	36,82	36,70
26-03-2018	36,73	36,58
30-03-2018	36,67	36,52
13-04-2018	36,75	36,51
22-04-2018	36,54	36,56
26-04-2018	36,59	36,52
06-05-2018	36,55	36,50
10-05-2018	36,61	36,48
19-05-2018	36,50	36,41
23-05-2018	36,58	36,39
02-06-2018	36,57	36,42
06-06-2018	36,55	36,42



15-06-2018	36,47	36,34
19-06-2018	36,47	36,31
29-06-2018	36,52	36,30
03-07-2018	36,48	36,28
12-07-2018	36,47	36,30
16-07-2018	36,43	36,29
26-07-2018	36,43	36,26
30-07-2018	36,45	36,27
08-08-2018	36,38	36,25
12-08-2018	36,34	36,24
22-08-2018	36,59	36,23
26-08-2018	36,44	36,25
04-09-2018	36,47	36,21
08-09-2018	36,49	36,31
18-09-2018	36,34	36,35
22-09-2018	36,46	36,33
01-10-2018	36,46	36,33
05-10-2018	36,39	36,30
15-10-2018	36,41	36,33
19-10-2018	36,45	36,42
28-10-2018	36,49	36,42
01-11-2018	36,51	36,50
11-11-2018	36,61	36,55
15-11-2018	36,66	36,56
24-11-2018	36,65	36,53
28-11-2018	36,57	36,61
08-12-2018	36,72	36,68
12-12-2018	36,65	36,70
21-12-2018	36,71	36,64
25-12-2018	36,69	36,67
04-01-2019	36,67	36,64
08-01-2019	36,71	36,65
17-01-2019	36,66	36,60
21-01-2019	36,69	36,65
13-02-2019	36,59	36,58
17-02-2019	36,53	36,59
27-02-2019	36,55	36,60
12-03-2019	36,54	36,55
16-03-2019	36,55	36,48
26-03-2019	36,49	36,51
30-03-2019	36,52	36,57
08-04-2019	36,58	36,55
12-04-2019	36,58	36,53



22-04-2019	36,66	36,64
26-04-2019	36,59	36,66
01-06-2019	36,60	36,59
05-06-2019	36,56	36,52
15-06-2019	36,68	36,77
19-06-2019	36,46	36,49
28-06-2019	36,58	36,74
02-07-2019	36,54	36,67
12-07-2019	36,55	36,59
16-07-2019	36,49	36,57
25-07-2019	36,52	36,58
29-07-2019	36,63	36,65
08-08-2019	36,62	36,67
12-08-2019	36,49	36,66
21-08-2019	36,43	36,70
25-08-2019	36,53	36,65
04-09-2019	36,56	36,73
08-09-2019	36,44	36,73
17-09-2019	36,60	36,72
21-09-2019	36,65	36,69
01-10-2019	36,54	36,83
05-10-2019	36,52	36,79
14-10-2019	36,61	36,87
18-10-2019	36,64	36,93
28-10-2019	36,76	37,07
03-01-2020	36,95	37,18
07-01-2020	36,83	37,22
17-01-2020	36,92	37,09
21-01-2020	36,95	37,05
30-01-2020	36,93	37,04
01-03-2020	36,91	36,82
11-03-2020	36,91	36,89
15-03-2020	36,82	36,82
24-03-2020	36,90	36,75
28-03-2020	36,91	36,74
04-06-2020	36,64	36,75
13-06-2020	36,70	36,79
17-06-2020	36,76	36,83
27-06-2020	36,72	36,66
01-07-2020	36,52	36,66
10-07-2020	36,60	36,68
14-07-2020	36,60	36,65
24-07-2020	36,69	36,69



28-07-2020	36,46	36,68
06-08-2020	36,59	36,63
10-08-2020	36,49	36,68
20-08-2020	36,57	36,71
24-08-2020	36,60	36,82



Tabla 19.- Comparativa de las variables para el período abril 2016-octubre 2020. Fuente: Elaboración propia

Fecha	Precipitaciones en el centroide de la cuenca [mm]	AITiS corregido [m]	AAO
abr-16	24,09	36,61	0,10
may-16	12,17	36,47	0,01
jun-16	65,92	36,46	2,57
jul-16	99,33	36,45	0,41
ago-16	59,35	36,42	-0,74
sept-16	17,17	36,45	2,33
oct-16	46,38	36,52	-0,18
nov-16	81,67	36,63	-1,51
dic-16	56,10	36,60	-0,71
ene-17	48,65	36,55	-0,98
feb-17	113,88	36,51	-0,02
mar-17	66,64	36,54	0,16
abr-17	58,36	36,55	0,62
may-17	115,91	36,58	1,05
jun-17	47,21	36,65	0,55
jul-17	59,65	36,58	0,73
ago-17	148,68	36,71	0,76
sept-17	89,38	36,79	1,30
oct-17	58,68	36,83	-0,57
nov-17	64,89	36,92	0,77
dic-17	65,04	36,95	0,98
ene-18	104,59	36,92	1,28
feb-18	64,73	36,79	1,04
mar-18	74,93	36,74	0,14
abr-18	75,07	36,63	-1,17
may-18	40,77	36,56	-0,08
jun-18	44,17	36,52	-0,01
jul-18	27,41	36,45	0,38
ago-18	69,50	36,44	-0,34
sept-18	38,85	36,44	1,46
oct-18	48,45	36,44	0,53
nov-18	68,96	36,60	0,99
dic-18	86,99	36,69	0,93
ene-19	94,26	36,68	0,68
feb-19	45,36	36,58	-0,50
mar-19	77,72	36,52	0,75
abr-19	132,89	36,60	0,34
may-19	74,72	36,60	0,34
jun-19	52,55	36,57	1,47



jul-19	111,66	36,54	-0,39
ago-19	85,02	36,52	-1,08
sept-19	63,17	36,56	0,56
oct-19	63,17	36,61	-0,93
nov-19	84,11	36,82	-1,84
dic-19	96,77	36,95	-1,36
ene-20	89,62	36,91	-0,23
feb-20	100,30	36,91	0,28
mar-20	82,26	36,89	1,43
abr-20	41,81	36,75	-0,48
may-20	94,83	36,66	0,58
jun-20	56,63	36,70	1,07
jul-20	36,90	36,57	-0,55
ago-20	50,79	36,56	-0,72
sept-20	60,13	36,58	0,19
oct-20	102,84	36,70	1,26