



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**PROPUESTA DE RESERVORIO ARTIFICIAL DE HIELO EN EL GLACIAR JUNCAL
NORTE, PARA CONTRIBUIR AL ABASTECIMIENTO HÍDRICO DE LA CUENCA
DEL RÍO ACONCAGUA EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: MATÍAS CORTÉS VERA.

PROFESOR GUÍA: HERNÁN GAETE.

VALPARAÍSO, 2024

Índice

1	Introducción	1
1.1	El agua como recurso natural.....	1
1.2	Escasez hídrica.....	1
1.3	Normativa ambiental vigente.....	3
1.4	Métodos para mitigar la escasez hídrica.....	3
1.5	Los glaciares.	4
1.6	Reservorios de hielo artificial.....	5
1.7	Glaciar Juncal Norte.	7
2	Problema	9
3	Objetivos	10
3.1	Objetivo General.	10
3.2	Objetivos específicos.....	10
4	Metodología.....	11
4.1	Caracterización meteorológica.	11
4.1.1	Temperatura.....	12
4.1.2	Radiación solar.	13
4.1.3	Vientos.....	13
4.1.4	Humedad relativa del aire.....	14
4.1.5	Presión atmosférica.....	14
4.2	Flujo de energía.....	15
4.2.1	Radiación de onda corta neta.	16
4.2.2	Radiación de onda larga neta.....	16
4.2.3	Flujos de calor turbulento.	17
4.3	Diseño del reservorio artificial de hielo.	20
4.3.1	Selección del emplazamiento y fuente de agua disponible.....	20
4.3.2	Diseño de la estructura.	21
4.3.3	Diseño de la ruta de suministro de agua.....	22
4.3.4	Operación y mantenimiento.	24
4.4	Estimación de costos de inversión y operación del reservorio de hielo.	25
4.4.1	Costos de inversión.	25

4.4.2	Costos de operación y mantenimiento	25
5	Resultados	26
5.1	Caracterización Meteorológica	26
5.1.1	Temperatura.....	26
5.1.2	Radiación solar	28
5.1.3	Vientos.....	29
5.1.4	Humedad relativa	32
5.1.5	Presión atmosférica.....	34
5.2	Flujos energéticos	35
5.2.1	Superficie sin nieve.....	35
5.2.2	Superficie con nieve	37
5.3	Diseño del reservorio de hielo.	38
5.3.1	Selección del emplazamiento y fuente de agua disponible	38
5.3.2	Diseño de la estructura.	41
5.3.3	Ruta de suministro de agua.....	46
5.3.4	Operación y mantenimiento	47
5.4	Estimación de costos de inversión y operación	48
5.4.1	Costos de inversión.	48
5.4.2	Costos de operación y mantenimiento.	49
6	Discusión	51
6.1	Caracterización meteorológica	51
6.2	Flujo de energía.....	52
6.3	Diseño del reservorio de hielo artificial	52
6.4	Estimación de costos.....	53
7	Conclusión	55
8	Referencias bibliográficas	56

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Distribución temporal y espacial de los decretos de escasez hídrica (2008-2020) en la cuenca del Río Aconcagua (DGA, 2020).	2
Tabla 4.1: Ejemplo de tabla promedios mensuales de temperatura diurna y nocturna.....	12
Tabla 4.2: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de radiación solar.	13
Tabla 4.3: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de vientos y dirección.	13
Tabla 4.4: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de humedad relativa del aire.....	14
Tabla 4.5: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de presión atmosférica.	15
Tabla 4.6: Ejemplo de Tabla de flujos energéticos mensuales.	16
Tabla 4.7: Ejemplo de tabla de materiales para construcción.....	21
Tabla 4.8: Ejemplo de tabla de costos de inversión.	25
Tabla 4.9: Ejemplo de tabla de costos de operación y mantenimiento.	25
Tabla 5.1: Promedios de temperatura mensual en °C entre los años 2012 y 2024.	27
Tabla 5.2: Promedios de radiación solar mensual en $W m^{-2}$ entre los años 2012 y 2024.....	28
Tabla 5.3: Promedios de velocidad en nudos (kt) y dirección del viento (°) mensual entre los años 2012 y 2024.	30
Tabla 5.4: Promedios de % humedad relativa mensual entre los años 2012 y 2024.	33
Tabla 5.5: Promedios de presión atmosférica mensual en hPa entre los años 2012 y 2024.	34
Tabla 5.6: Flujos de energía ($W m^{-2}$) en superficie sin nieve.	36
Tabla 5.7: Flujos de energía ($W m^{-2}$) en superficie con nieve.....	37
Tabla 5.8: Cantidad de materiales estructurales.	45
Tabla 5.9: Dimensiones del reservorio de hielo artificial.....	45
Tabla 5.10: Materiales de ruta de suministro.....	47
Tabla 5.11: Costos de inversión [CLP].	48
Tabla 5.12: Costos de construcción [CLP].	49
Tabla 5.13: Costos de evaluación de impacto ambiental [CLP].	49
Tabla 5.14: Costos de operación y mantenimiento [CLP].	49

Índice de Figuras

Figura 1.1: Estupa de hielo en Ladakh.	6
Figura 1.2: Glaciar Juncal Norte.	7
Figura 4.1: Estación meteorológica Los libertadores.	11
Figura 4.2: Diseño de la ruta de suministro de agua.	24
Figura 5.1: Mapa del área de estudio.	26
Figura 5.2: Temperaturas históricas mensuales desde 2012 a 2024.	28
Figura 5.3: Radiación solar histórica mensual desde 2012 a 2024.	29
Figura 5.4: Velocidad en <i>m/s</i> del viento histórica mensual desde 2012 a 2024.	31
Figura 5.5: Rosa de los vientos de estación Los libertadores con promedios de velocidad y dirección históricos mensuales desde 2012 a 2024.	32
Figura 5.6: Humedad relativa histórica mensual desde 2012 a 2024.	34
Figura 5.7: Presión atmosférica histórica mensual desde 2012 a 2024.	35
Figura 5.8: Flujos de energía en superficie sin nieve.	36
Figura 5.9: Flujos de energía en superficie con nieve.	38
Figura 5.10: Estero Monos de agua, río Juncal y Glaciar Juncal Norte.	39
Figura 5.11: Sector Morrenas.	39
Figura 5.12: Glaciar Alto del río Plomo.	40
Figura 5.13: Glaciar León Negro.	40
Figura 5.14: Modelo de estupa de hielo.	42
Figura 5.15: Esquema de domo geodésico.	43
Figura 5.16: Esquema de entrada del domo.	43
Figura 5.17: Cantidad de piezas y sus dimensiones en mm del diseño estructural del domo.	44
Figura 5.18: Boquilla nebulizadora.	45
Figura 5.19: Esquema de ruta de suministro de agua.	46
Figura 5.20: Instalación de tubería de suministro de agua en Ladakh.	47

Índice de Ecuaciones

Ecuación 4.1: Promedio mensual diurno.	12
Ecuación 4.2: Promedio mensual nocturno.	12
Ecuación 4.3: Flujo de energía.	15
Ecuación 4.4: Radiación de onda corta neta	16
Ecuación 4.5: Radiación de onda larga neta.	16
Ecuación 4.6: Radiación de onda larga entrante.....	17
Ecuación 4.7: Emisividad atmosférica.	17
Ecuación 4.8: Flujo de calor turbulento sensible.	17
Ecuación 4.9: Capacidad calorífica del aire.	18
Ecuación 4.10: Densidad del aire	18
Ecuación 4.11: Fracción molar de vapor de agua.	19
Ecuación 4.12: Presión parcial del gas.	19
Ecuación 4.13: Flujo de calor turbulento latente.....	19
Ecuación 4.14: Calor de vaporización del agua.	20
Ecuación 4.15: Área de la base.....	21
Ecuación 4.16: Volumen de un cono.....	21
Ecuación 4.17: Volumen de agua almacenada.....	22
Ecuación 4.18: Ecuación de Bernoulli.	22
Ecuación 4.19: Ecuación de Darcy-Weisbach.....	23
Ecuación 4.20: Número de Reynolds.	23

Resumen

El glaciar Juncal Norte es una de las principales reservas de agua de la región de Valparaíso, y su progresivo derretimiento, impulsado por el cambio climático, representa una amenaza significativa para el suministro hídrico de la cuenca del Aconcagua. El objetivo de este trabajo es proponer la construcción de un reservorio de hielo artificial en el glaciar Juncal Norte, tendiente al abastecimiento de agua en la cuenca del río Aconcagua. Para ello se realizó una caracterización meteorológica en el Valle de Juncal que permitió evaluar la factibilidad ambiental y técnica de la implementación del reservorio, analizando los principales parámetros que influyen en la producción de hielo. Este proceso incluye la determinación de los flujos de energía en la superficie de la zona glaciar. Con esta información, se diseñó la estructura principal del reservorio y se estimaron los costos económicos totales asociados a su construcción.

Desde el punto de vista de la caracterización meteorológica, se evaluaron parámetros de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de viento y presión atmosférica, para calcular el flujo de energía superficial del valle Juncal. Los resultados indican que la zona de estudio presenta un equilibrio de energía óptimo para el almacenamiento de hielo entre junio y septiembre, especialmente durante las horas nocturnas. Se estimó que el reservorio diseñado podría retener aproximadamente 20 m^3 de agua en este período, considerando una inversión alrededor de 110 millones de pesos. En conclusión, esto sugiere que su desarrollo a mayor escala podría contribuir significativamente al abastecimiento hídrico de la cuenca del río Aconcagua.

1 Introducción

1.1 El agua como recurso natural.

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que es indispensable para el funcionamiento de los organismos vivos, y de los ecosistemas, como también cumple un rol fundamental para actividades socioeconómicas que dependen del recurso hídrico para llevarse a cabo (Breña, 2022), por ejemplo; la agricultura, minería, actividades industriales, entre otros. El agua está presente en toda la superficie terrestre, representando el 70% del área total del planeta (Escenarios hídricos 2030 Chile, 2018). Esta se encuentra en diferentes formas, el 97.5% del agua se presenta en forma líquida y salada, siendo los océanos los mayores reservorios de agua en el planeta, por otra parte, solamente el 2.5% se presenta como agua dulce, de esta fracción el 69.6% se encuentra en estado sólido, presente en los casquetes polares y glaciares, el 30% representa a los acuíferos subterráneos, y solamente el 0,4% restante representa el agua que fluye en ríos, lagos y humedales, como también la que está en estado gaseoso en la atmósfera (Clark & King, 2004; López et al, 2013).

1.2 Escasez hídrica.

El mundo enfrenta una crisis hídrica que ha alcanzado niveles alarmantes en la actualidad, solamente en el año 2022 alrededor de 43.000 personas murieron producto de la sequía en Somalia, y más de 500.000 personas en el mundo dependen de aguas contaminadas para vivir, ya que no disponen de fuentes seguras de agua potable (Naddaf, 2023). La inseguridad hídrica es una de las mayores amenazas que enfrenta la sociedad en el presente, la incapacidad de acceder y beneficiarse de agua potable adecuada, confiable y segura se presenta como una problemática creciente a nivel mundial (Tallman et al, 2024). En la actualidad la demanda de agua ha ido aumentando significativamente a un ritmo del 1% anual en función del crecimiento de la tasa poblacional, debido a que paralelamente al crecimiento poblacional también ha crecido el desarrollo económico, que conlleva cambios en los patrones de consumo, entre otros factores, esta demanda hídrica continuará creciendo en las próximas décadas, sobre todo las demandas de usos domésticos y usos industriales (Organización de las naciones unidas ONU, 2018). Al mismo tiempo, los ciclos naturales del agua se han visto acelerados producto del cambio climático, ya que han aumentado los cambios drásticos de precipitación, temperatura y los eventos climáticos extremos, como las inundaciones y sequías, amenazando el suministro hídrico directamente (Crispin et al, 2023). Actualmente estimaciones indican que hay 3.600 millones de personas que viven en lugares con riesgo de sufrir escasez hídrica al menos un mes en el año, y se espera un crecimiento de esta población de hasta 5.700 millones de personas en 2050 (ONU, 2018).

En Chile, la escasez hídrica se ha presentado con mayor intensidad desde el año 2010, con una secuencia progresiva de años secos, principalmente por el déficit de precipitaciones anuales, que varían entre el 25 y 45% (Garreaud et al, 2017). También los cambios de usos de suelo (Frêne et al, 2022) han afectado en gran medida a la degradación de los ecosistemas en función de la regulación hídrica (Germer et al, 2010). Por otra parte, el marco legislativo e institucional vigente presenta una

distribución desigual del recurso hídrico, donde los derechos de agua son acumulados por grandes empresas nacionales y multinacionales de minería y agricultura, mientras que algunas comunidades rurales carecen de este recurso (Fragkou et al, 2022). Las principales zonas afectadas por la escasez hídrica ha sido la zona centro y zona norte del país, ya que, estas zonas se conforman principalmente por cuencas hidrográficas, las cuales se describen como áreas sensibles a la variabilidad climática, puesto que en las zonas altas de las cuencas es donde las precipitaciones invernales y la acumulación de nieve son relevantes para proporcionar agua de escorrentía para riegos agrícolas, consumo humano y la sostenibilidad de los ecosistemas en los periodos secos de verano (Souvignet et al, 2012; Cervantes et al, 2021).

La región de Valparaíso ubicada en la zona centro de Chile, es una de las regiones con la mayor cantidad de conflictos socioambientales del país (Cabello, 2024), esta enfrenta escases hídrica en 35 de sus 38 comunas, puesto que el caudal de sus principales ríos ha disminuido progresivamente respecto a sus registros históricos (DGA, 2020). En la tabla 1.1 se presentan aquellas comunas de la cuenca del río Aconcagua que han declarado algún tipo de decreto de escases hídrica entre el año 2008 y 2020.

Tabla 1.1: Distribución temporal y espacial de los decretos de escasez hídrica (2008-2020) en la cuenca del Río Aconcagua (DGA, 2020).

Cuenca	Provincia	Comuna	Decretos de escasez hídrica															
			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020			
Río Aconcagua	Los andes	Calle larga	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Los Andes	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Rinconada	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		San Esteban	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	San Felipe	Catemu	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Llaillay	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Panquehue	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Putendo	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		San Felipe	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Quillota	Santa María	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Calera	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Hijuelas	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		La Cruz	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Nogales	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Marga Marga	Quillota	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Limache	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Olmue	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Valparaíso	Villa Alemana	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Concón	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
			Quintero	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

A excepción de los años 2009, 2016 y 2017, la cuenca ha presentado escasez hídrica en gran parte de sus comunas, presentado una mayor demanda del recurso de manera progresiva con los años.

1.3 Normativa ambiental vigente.

En el contexto de los desafíos relacionados con el cambio climático y la disponibilidad de recursos hídricos anteriormente mencionados, la gestión sostenible del agua se ha convertido en una prioridad en muchas regiones del mundo para las adaptaciones a los cambios venideros. En Chile de acuerdo al artículo 5 de la ley 21.455 Marco de cambio climático, en acuerdo con los lineamientos del acuerdo de París, se establecen estrategias climáticas al mediano y largo plazo, donde se presentan aspectos fundamentales que promueven generar medidas de mitigación y adaptación considerando soluciones basadas en la naturaleza, haciendo énfasis en el manejo de ecosistemas susceptibles y la sostenibilidad del uso hídrico frente a las amenazas y riesgos de sequías producto del cambio climático (Ley 21.455, 2022). Por otra parte, desde la arista gubernamental, se proponen diversos planes de manejo integrado de cuencas hidrográficas, los cuales promueven estrategias para gestionar los recursos hídricos a nivel de cuenca, estableciendo prioridades del uso y aprovechamiento del agua (Fernández et al, 2018), en este contexto, el Plan Sequia, es una estrategia hídrica desarrollada por la Mesa Nacional del Agua, la cual presenta medidas de acción a corto, mediano y largo plazo, estableciendo pilares fundamentales como el resguardo del abastecimiento hídrico priorizado en el consumo humano, el aseguramiento de calidad del agua y la modernización del marco legal e institucional conforme al recurso hídrico (DGA, 2021).

La legislación vigente sobre estudios de impacto ambiental se encuentra establecida en la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. El Artículo 10 de dicha ley indica que los proyectos o actividades que puedan causar impacto ambiental en cualquiera de sus fases deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Por otro lado, el Artículo 11 de la misma ley especifica las características que debe cumplir el proyecto para ser evaluado en el SEIA, ya sea mediante un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) (Ley 19.300, 1994).

1.4 Métodos para mitigar la escasez hídrica.

En la actualidad, existen variados métodos y tecnologías para combatir la escasez hídrica, entre ellos, la construcción de embalses y presas ha sido por décadas el mecanismo más utilizado para almacenar grandes cantidades de agua mediante la intervención de ríos, para regular la distribución hídrica durante periodos secos (Morales & Bru, 1984). Por otra parte, en la agricultura, se han implementado diversas tecnologías de manejo hídrico, como el riego tecnificado por goteo, que demuestra una mayor eficiencia en el riego de cultivos, disminuyendo pérdidas de agua para aumentar el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico disponible (Antúnez et al, 2010). En el sector urbano, se han propuesto sistemas de captación y almacenamiento de aguas de lluvia en hogares, proporcionando una alternativa de abastecimiento hídrico mediante un mecanismo para recolectar y almacenar el agua proveniente de las precipitaciones, para destinarlas a usos domésticos no potables (Rojas et al, 2012). Los mecanismos de reutilización de aguas residuales, como el uso de aguas grises para regadíos de jardines, parques y otros usos no potables, también demuestra ser una alternativa ventajosa en la disminución de la demanda de agua dulce, ayudando a mitigar el impacto de la falta de agua en zonas de escases hídrica (Rodríguez et al, 2022). También, se han abordado alternativas innovadoras en ciertos sectores del mundo, que han sido susceptibles

al cambio climático y la escasez hídrica, como los reservorios de hielo artificial en el Himalaya, esta técnica de almacenaje de agua en 'estupas de hielo' sugiere un nuevo modelo de pensamiento adaptativo al cambio climático, el cual permite la gestión hídrica, en la que existe una participación de la comunidad, promoviendo la conciencia ecológica y la iconografía religiosa en el aprovechamiento del recurso hídrico (Clouse, 2017).

1.5 Los glaciares.

Los glaciares son los mayores reservorios de agua dulce del planeta, siendo fundamentales para el balance hídrico y energético a nivel mundial (Schoolmeester et al, 2018), puesto que son capaces de almacenar agua a través del tiempo y regular el flujo estacional de las corrientes (Carey et al, 2016). Estos se definen como 'masas de hielo perenne que fluyen pendiente abajo (por deformación de su estructura interna o por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes' (Dirección General de Aguas DGA, 2009). Existen diferentes tipos de glaciares, estos se clasifican principalmente por su morfología, en los casquetes polares se pueden encontrar glaciares de tipo Hielo continental o Islandis, que son grandes masas de hielo que cubren todo un continente, como en la Antártida o Groenlandia, en estos lugares también se pueden encontrar otros formatos de glaciares, tales como Plataformas de hielo flotante y Corrientes de hielo, que son las masas de hielo que drenan desde las plataformas de hielo continental. Por otra parte, en los cordones montañosos como Los Alpes, Himalaya y Los andes, se encuentran formaciones tales como; Glaciares de valle, que son masas de hielo que se caracterizan por tener una o más zonas de acumulación ubicadas en cuencas o subcuencas las cuales confluyen en un valle; Glaciares en Calota, que se ubican en las cumbres de montañas; Valles de hielo, que son acumulaciones de hielo en una planicie o plateau en altura, rodeados de zonas escarpadas; Glaciares de Cráter, que son los hielos que ocupan depresiones topográficas rodeadas de cordones montañosos; Glaciares de Circo, que son aquellos que ocupan una depresión topográfica pero su acumulación es de forma semicircular generada por la erosión glaciar; Glaciares Rocosos o de roca, que son masas de hielo y roca, que se encuentran cubiertos por una capa gruesa de detritos; y por último, los Glaciaretos, que es la categoría dada a las pequeñas acumulaciones de hielo, que no tienen una definición exacta de sus dimensiones, estos pueden encontrarse en laderas de montañas, depresiones o sectores en sombra (DGA, 2009).

En Chile se pueden encontrar diversos tipos de glaciares, ya que se caracteriza por ser un país montañoso, en el cual gran parte del territorio nacional se ubica la cordillera de Los Andes, que posee numerosos glaciares, los cuales abastecen a gran cantidad de cuencas hidrográficas a lo largo de todo el país. Según lo establecido por la Dirección General de Aguas en el inventario público de glaciares realizado el año 2022, Chile cuenta con 26.169 glaciares, abarcando un área de 21.009 kilómetros cuadrados, lo que equivale al 2.8% del territorio nacional (sin contar el territorio de la Antártica), y su equivalente en volumen hídrico es aproximadamente 2.301,5 kilómetros cúbicos de agua (DGA, 2022).

Los glaciares se consideran entornos altamente sensibles a cambios tanto en las precipitaciones y temperaturas, presentando variaciones negativas en sus balances de masa, producto del aumento de temperaturas en los periodos de ablación y disminuciones del crecimiento en los periodos de

acumulación (Ames & Hastenrath, 1996; Skvarca et al, 2004; Taveirne et al, 2021), por lo que su detrimento representa la evidencia más visible del cambio climático (Rabatel et al, 2013; Borg, 2016). Los glaciares chilenos han sido afectados directamente por las decrecientes precipitaciones y aumento de temperaturas, lo que ha dejado significativas disminuciones en las superficies cubiertas de hielo, afectando a la estabilidad y disponibilidad de los recursos hídricos en alta montaña (DGA, 2022).

1.6 Reservorios de hielo artificial.

Producto de la escasez hídrica que ha afectado a distintas regiones del mundo, se han presentado opciones para el manejo hídrico de manera que se pueda obtener por mayor tiempo los beneficios de tener acceso al agua como los que se mencionaron anteriormente. En India, principalmente en las comunidades montañosas de Ladakh, se han visto afectados por la escasez hídrica, ya que la disminución de las precipitaciones ha hecho que sus únicas fuentes de agua dependan del derretimiento de los glaciares presentes en las montañas (Schmidt & Nüsser, 2012), los cuales se han vuelto vitales para sostener las actividades agrícolas que forman parte de la seguridad alimentaria y socioeconómica regional de Ladakh (Nüsser et al, 2019). Sin embargo, el excesivo derretimiento y retroceso de los glaciares en las épocas estivales han sido causales de la reubicación de comunidades que dependen del agua para su desarrollo alimenticio y económico (Xu et al, 2009; Grossman, 2015), debido a esto, como medida de adaptación desde el año 2014 han construido docenas de reservorios de hielo artificiales, como medida de mitigación a estos cambios, ya que requiere poca infraestructura, habilidades y energía para su construcción, en comparación con otras tecnologías de almacenamiento de agua (Nüsser et al, 2019b). En la actualidad existen más de 26 aldeas que se han visto favorecidas en su abastecimiento hídrico debido a estos reservorios, más conocidos como estupas de hielo o “Ice Stupas” (Balasubramanian et al, 2022).

Las estupas de hielo fueron diseñadas por el ingeniero Sonam Wangchuck, siendo mundialmente conocidas en el año 2013, estas se conforman por medio de una estructura en forma cónica de hielo, la cual posee una base estructural de madera y acero, la cual se cubre de hielo producto de la congelación y acumulación de agua dispuesta en la superficie de la estructura (Mena et al, 2023), como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1: Estupa de hielo en Ladakh.
(Fuente: BBC, 2020.)

Estas estructuras se forman típicamente durante los fríos meses de invierno, en favor de las temperaturas bajas, de manera que en los meses de primavera y verano se libera el agua lentamente producto de su derretimiento, en cuanto a su estructura, estas se componen principalmente de una boquilla aspersor montada en una tubería de suministro, la cual se abastece de una fuente de agua, como una lagunilla o arroyo a mayor altura (Maheshwary et al, 2019), de manera que el agua es expulsada por la boquilla aspersor en forma de gotas, solamente por la energía gravitacional, y luego, al caer las gotas sobre la superficie de la estructura se congelan con las condiciones invernales bajo cero (Oerlemans, 2021), la fuente es activada de manera manual durante los periodos más fríos del día, por lo general en las noches, y la boquilla se eleva con la adición de tuberías, a medida que se va acumulando el hielo debajo, por lo general se construye una base estructural en forma de cúpula o domo con ramas de madera, para que la adición de tuberías o el mantenimiento de los materiales se pueda realizar desde dentro de la estructura, facilitando su acceso (Balasubramanian et al, 2022).

A la fecha, existen pocos estudios técnicos relacionados a los reservorios de hielo artificial, los principales se han desarrollado en Asia y Europa, siendo los pioneros en este sistema de reservas hídricas. En Chile, el proyecto Nilus trajo la idea de implementar estupas de hielo en el parque Las Arenas del Cajón del Maipo, para distintos objetivos, entre ellos, la recuperación de bofedales andinos en detrimento y la recuperación de acuíferos mediante el agua de deshielo recongelada, pudiendo construir los primeros reservorios de hielo en el país con éxito en el año 2021, los cuales alcanzaron volúmenes de hasta 50.000 litros de agua en su primer prototipo (Lyons, 2023).

1.7 Glaciar Juncal Norte.

En la Región de Valparaíso se ubica la cuenca del río Aconcagua, que nace desde la confluencia del río Juncal y río Blanco a 1.430 metros sobre el nivel del mar, este río es uno de los recursos hídricos fundamentales de la zona centro del país, abasteciendo de agua para el consumo humano, agricultura y minería, alcanzando a una comunidad de 1.7 millones de habitantes en la región, aproximadamente al 9.6% de la población nacional (DGA, 2022). Su superficie alcanza los 7.340 kilómetros cuadrados, y tiene un recorrido aproximado de 142 kilómetros hasta su desembocadura en la bahía de Concón en el océano pacífico, pero si se considera la distancia desde la naciente del río Juncal en el interior de la cordillera de los andes, el recorrido alcanza los 177 kilómetros (DGA, 2004).

El río Juncal se origina desde la lengua de ventisquero del glaciar Juncal Norte, a una altura de 3.200 metros sobre el nivel del mar, ilustrado en la figura 1.2.



Figura 1.2: Glaciar Juncal Norte.
(Fuente: EDJ 2012.)

Este glaciar de tipo valle se posa desde la cumbre hasta los pies del cerro Nevado Juncal, montaña emblemática chilena, debido a que es la de mayor altitud de la región de Valparaíso, alcanzando una altura aproximada de 5.993 metros sobre el nivel del mar (Correas-Gonzales et al, 2020). El glaciar se encuentra en el límite de las inmediaciones del Parque Andino Juncal, una propiedad privada protegida, perteneciente a la familia Kendrick desde el año 1911, en donde la prioridad es la conservación de especies nativas y endémicas de flora y fauna que viven en el sector. En el año 2010 el Parque Andino Juncal fue designado como sitio de importancia internacional por la

convención Ramsar, en donde se estipula la preocupación y protección de los recursos hídricos en la alta cuenca del río Juncal que tiene una superficie de 220 kilómetros cuadrados (Cosmos, 2009). Según estudios presentados en el Monitoreo intensivo del glaciar Juncal norte, se reveló que hasta el año 2013 el glaciar perdió un 10% de su área total, producto del deshielo glaciar, retrocediendo a una tasa de 14 metros anuales progresivamente (DGA, 2022).

En el presente trabajo se plantea una propuesta en la que se explorarán los fundamentos científicos, la viabilidad ambiental, técnica y la estimación de costos de un reservorio de hielo artificial en forma de estupa de hielo o 'Ice stupa' en el glaciar Juncal Norte, con el fin de ofrecer una contribución a la seguridad hídrica y al desarrollo sostenible de la cuenca del río Aconcagua.

2 Problema

La cuenca del río Aconcagua, ubicada en la zona central de Chile, es una de las cuencas con glaciares de mayor envergadura de la región. A través de esta cuenca fluye el río Aconcagua, cuya agua es fundamental para el abastecimiento hídrico de la región de Valparaíso, cubriendo las necesidades de consumo humano y de diversas actividades socioeconómicas, tales como la minería, la agricultura y las industrias de la zona central del país. La principal fuente de recarga del río Aconcagua proviene del deshielo nivoglacial en las zonas de alta montaña, siendo el glaciar Juncal Norte uno de los afluentes más relevantes.

Sin embargo, el glaciar Juncal Norte presenta una significativa disminución de su volumen debido al derretimiento, evidenciado por un retroceso promedio de 14 metros anuales entre 1955 y 2013 (DGA, 2022), lo que ha provocado una pérdida aproximada de 14 metros de espesor de hielo cada año. Este fenómeno de retroceso glacial, asociado al cambio climático, genera preocupación sobre la sostenibilidad de los recursos hídricos de la cuenca en el futuro cercano, especialmente en un contexto de creciente demanda y variabilidad climática.

Ante esta situación, surge la necesidad de explorar soluciones tecnológicas que puedan mitigar los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua, especialmente en las fuentes de origen. En este contexto, los reservorios de hielo artificial en zonas de glaciares podrían constituir una alternativa viable para mejorar la disponibilidad de agua en la cuenca del río Aconcagua, al almacenar agua en forma de hielo durante períodos de baja demanda y liberarla durante los períodos de mayor escasez. Esta investigación busca evaluar la viabilidad de esta tecnología y su potencial impacto en la gestión de los recursos hídricos de la región.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General.

- Proponer un reservorio artificial de hielo tipo estupa en el glaciar Juncal Norte, tendiente al abastecimiento hídrico de la cuenca del río Aconcagua en la región de Valparaíso.

3.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar meteorológicamente el valle del glaciar Juncal Norte
- Determinar el flujo de energía superficial en la zona potencial del reservorio de hielo artificial.
- Diseñar el reservorio de hielo artificial para la zona del glaciar Juncal Norte.
- Estimar el costo de inversión y operación del reservorio de hielo artificial en el glaciar Juncal Norte.

4 Metodología

4.1 Caracterización meteorológica.

Se realizó una caracterización de los principales factores meteorológicos del valle Juncal, en donde se lleva a cabo la propuesta del reservorio de hielo artificial, para tener los antecedentes meteorológicos del sector y evaluar la compatibilidad con el proyecto mediante el balance de energía superficial del valle Juncal. Se reunieron datos anuales e históricos de temperaturas del aire, velocidad y dirección de los vientos, radiación solar, humedad relativa del aire y presión atmosférica, los cuales se obtuvieron de la base de datos de la estación meteorológica Los libertadores, que se muestra en la figura 4.1, está ubicada en el puerto terrestre de Los Andes, la cual se encuentra a una distancia de 14 kilómetros aproximadamente del glaciar Juncal Norte y a una altitud de 2955 metros sobre el nivel del mar, presentando una diferencia aproximadamente de 200 metros por sobre la altura del área de estudio, por lo que, es la fuente de información pública más próxima al sector del valle Juncal, por otra parte, la Dirección Meteorológica de Chile es el organismo responsable del quehacer meteorológico del país, y provee servicios meteorológicos óptimos a distintos organismos nacionales e internacionales de investigación (Dirección meteorológica de Chile, 2024).



Figura 4.1: Estación meteorológica Los libertadores.

4.1.1 Temperatura.

Los datos de temperatura se descargaron desde la página web de la Dirección meteorológica de Chile, los cuales vienen disponibles en formato Excel. En esta base de datos se presenta el detalle de temperaturas diarias por hora, de todo el año, ofreciendo el detalle de mediciones desde el año 2012 hasta el año 2024, esta información se procesó calculando el promedio mensual diurno y nocturno de temperaturas, mediante el uso de las ecuaciones 4.1 y 4.2, que se muestran a continuación:

Ecuación 4.1: Promedio mensual diurno.

$$Promedio\ mensual\ diurno = \frac{\sum T_{dia}}{N}$$

Donde;

T_{dia} : Temperaturas medidas de día.

N : Cantidad de medidas de temperatura.

Ecuación 4.2: Promedio mensual nocturno.

$$Promedio\ mensual\ nocturno = \frac{\sum T_{noche}}{N}$$

Donde;

T_{noche} : Temperaturas medidas de noche.

N : Cantidad de medidas de temperatura.

Luego, se calculó el promedio mensual histórico para cada mes y la información procesada correspondiente a los promedios mensuales diurnos, nocturnos e históricos se presenta de la siguiente manera en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Ejemplo de tabla promedios mensuales de temperatura diurna y nocturna.

Mes	<i>Enero</i>		<i>Febrero</i>		...		<i>noviembre</i>		<i>Diciembre</i>	
Año	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc.</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>
2012										
...										
2024										
Promedio										

Luego, se elaboró un gráfico de dispersión mediante el uso de Excel con la información contenida en la Tabla 4.1, para evaluar las fluctuaciones de temperaturas en el año, según la información obtenida.

4.1.2 Radiación solar.

Los datos de radiación solar se descargaron de la página web de la Dirección Meteorológica de Chile, los cuales vienen disponibles en formato Excel. Esta plataforma ofrece las radiaciones solares globales instantáneas históricas desde el año 2012 al año 2024, el cual mide la radiación solar en unidades de watts/metro cuadrado. En esta base de datos se presentan las mediciones diarias de radiación y los promedios mensuales para cada año, por lo que, para efectos de este trabajo se utilizaron los promedios mensuales de cada año y se calculó el promedio mensual histórico para cada mes. Luego, se presenta de la siguiente manera en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de radiación solar.

<i>Mes</i>	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>...</i>	<i>Noviembre</i>	<i>Diciembre</i>
<i>Año</i>					
<i>2012</i>					
<i>...</i>					
<i>2024</i>					
<i>Promedio</i>					

Luego, se elaboró un gráfico de dispersión mediante el uso de Excel con los datos contenidos en la tabla 4.2, para evaluar las fluctuaciones de radiación solar en el año, según la información obtenida.

4.1.3 Vientos.

Los datos de vientos se descargaron de la página web de la Dirección Meteorológica de Chile, los cuales vienen disponibles en formato Excel. Esta plataforma ofrece mediciones de los vientos predominantes anuales desde el año 2012 al año 2024, el cual mide la intensidad en nudos y sus respectivas direcciones en norte, sur, este u oeste. En esta base de datos se presentan las mediciones de velocidad y dirección diarias por hora de vientos, para cada año, por lo que, se calculó el promedio de velocidades y direcciones en horarios diurnos y nocturnos de los vientos en cada mes para cada año y se determinó el promedio mensual histórico para cada mes de las direcciones y las velocidades del viento. Luego, se presenta de la siguiente manera en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de vientos y dirección.

<i>Mes</i>	<i>Enero</i>				<i>...</i>		<i>Diciembre</i>			
	<i>Día</i>		<i>Noche</i>		<i>...</i>		<i>Día</i>		<i>Noche</i>	
<i>Año</i>	<i>Vel.</i>	<i>Dir.</i>	<i>Vel.</i>	<i>Dir.</i>	<i>Vel.</i>	<i>Dir.</i>	<i>Vel.</i>	<i>Dir.</i>	<i>Vel.</i>	<i>Dir.</i>
<i>2012</i>										
<i>...</i>										

2024										
Promedio										

Luego, se elaboró un gráfico de dispersión mediante el uso de Excel con los datos contenidos en la tabla 4.3, para evaluar las fluctuaciones de la velocidad en el año, según la información obtenida, de igual manera se realizó un gráfico de tipo ‘rosa de los vientos’ mediante el uso de la herramienta digital WRPLOT View freeware, para representar los promedios de las direcciones del viento y sus respectivas velocidades.

4.1.4 Humedad relativa del aire.

Los datos de humedad relativa del aire se descargaron de la página web de la Dirección Meteorológica de Chile, los cuales vienen disponibles en formato Excel. En esta base de datos se presentan las mediciones en porcentaje de humedad relativa diaria y los promedios mensuales para cada año, desde el año 2012 al año 2024, por lo que, para efectos de este trabajo se utilizaron los promedios mensuales de cada año y se calculó el promedio mensual histórico para cada mes. Luego, se presenta de la siguiente manera en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de humedad relativa del aire.

Mes	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	...	<i>Noviembre</i>	<i>Diciembre</i>
Año					
2012					
...					
2024					
Promedio					

Luego, se elaboró un gráfico de dispersión mediante el uso de Excel con los datos contenidos en la tabla 4.4, para evaluar las fluctuaciones de humedad relativa del aire en el año, según la información obtenida.

4.1.5 Presión atmosférica.

Los datos de Presión atmosférica se descargaron de la página web de la Dirección Meteorológica de Chile, los cuales vienen disponibles en formato Excel. En esta base de datos se presentan las mediciones de presión atmosférica en unidades de hectopascales diarias y los promedios mensuales para cada año, desde 2012 al 2024, por lo que, para este trabajo, se utilizaron los promedios mensuales de cada año y se calculó el promedio mensual histórico. Luego, se presenta de la siguiente manera en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Ejemplo de tabla de promedios mensuales de presión atmosférica.

<i>Mes</i>	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>...</i>	<i>Noviembre</i>	<i>Diciembre</i>
<i>Año</i>					
<i>2012</i>					
<i>...</i>					
<i>2024</i>					
<i>Promedio</i>					

Luego, se elaboró un gráfico de dispersión mediante el uso de Excel con los datos contenidos en la tabla 4.5, para evaluar las fluctuaciones de presión atmosférica en el año, según la información obtenida.

4.2 Flujo de energía.

Se estimó el flujo de energía de la superficie potencial del reservorio de hielo artificial, con el fin de comprobar en los periodos en que el flujo es positivo o negativo. Identificar un flujo de energía negativo es crucial para el desarrollo del reservorio de hielo artificial, ya que, es la condición para que se produzca la congelación del agua que se encuentra en forma de gotas sobre una superficie (Oerlemans et al, 2021). Para esto se planteó utilizar una ecuación de flujo energético que consideró variables de radiación e intercambios de calor presentes en la superficie glaciar expresados en unidades de Watt por metro cuadrado (Balasubramanian, 2022), haciendo uso de los datos propuestos anteriormente en la caracterización meteorológica del sector del glaciar Juncal Norte. La ecuación que se utilizó se presenta a continuación.

Ecuación 4.3: Flujo de energía.

$$\text{Flujo de energía} [W m^{-2}] = RC(neta) + RL(neta) + CT(l) + CT(s)$$

Donde;

$RC(neta)$: Radiación de onda corta neta [$W m^{-2}$].

$RL(neta)$: Radiación de onda larga neta [$W m^{-2}$].

$CT(l)$: Flujo de calor turbulento latente [$W m^{-2}$].

$CT(s)$: Flujo de calor turbulento sensible [$W m^{-2}$].

Se determinó el flujo de energía para cada mes del año en los horarios de día y de noche, para establecer cuáles serán los meses y los horarios potencialmente productivos en los que el reservorio podrá operar para la acumulación de hielo, haciendo uso de los promedios mensuales históricos de los parámetros meteorológicos recabados en el objetivo específico anterior, se utilizaron dos condiciones de albedo superficial en el cálculo del flujo, para la superficie sin nieve y con nieve. Los resultados de los flujos energéticos se presentarán en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Ejemplo de Tabla de flujos energéticos mensuales.

Mes	Enero		...	Diciembre	
	<i>Día</i>	<i>Noche</i>	...	<i>Día</i>	<i>Noche</i>
<i>RC(neta)</i>					
...					
<i>CT(s)</i>					
Flujo de energía					

4.2.1 Radiación de onda corta neta.

Para calcular la radiación de onda corta neta se utilizó la siguiente ecuación (Huintjes et al, 2018).

Ecuación 4.4: Radiación de onda corta neta

$$RC(neta)[W m^{-2}] = (1 - \alpha)RC \downarrow$$

Donde;

α : Albedo de la superficie [adimensional].

$RC \downarrow$: Radiación solar de onda corta entrante [$W m^{-2}$].

Para el cálculo, se utilizaron los valores de radiación solar obtenidos desde la estación meteorológica Los libertadores. Se consideró utilizar un albedo de 0,3 que representa el albedo medio de la tierra) para la condición de superficie sin nieve, y un albedo de 0,95 para una superficie cubierta de nieve fresca (Qiu et al, 2001; Landsberg & Makvart, 2003; Temme et al, 2023), con el fin de obtener un cálculo en la peor condición de reflexión de radiación posible, y otra con una condición favorable.

4.2.2 Radiación de onda larga neta.

Para calcular la radiación de onda larga neta se utilizó la siguiente ecuación (Márquez, 2021).

Ecuación 4.5: Radiación de onda larga neta.

$$RL(neta)[W m^{-2}] = \sigma \epsilon_s T_s^4 - RL \downarrow$$

Donde;

$RL \downarrow$: Radiación de onda larga recibida [$W m^{-2}$].

σ : Constante de Stefan–Boltzmann [$W m^2 K^4$].

ϵ_s : Emisividad de la superficie [adimensional].

T_s : Temperatura de superficie [K].

Para el cálculo se utilizó la constante de Stefan-Boltzmann de $5.67 \times 10^{-8} [W m^2 K^4]$, una emisividad de superficie de 1 (Incropera & DeWitt, 1999), que corresponde a la emitancia de radiación térmica de un cuerpo negro, considerando la peor condición de emisividad de superficie, ya que en la realidad el valle del Juncal presenta mantos nivosos en su superficie en la mayoría de los periodos invernales y la emisividad térmica de superficies blancas y de bajas temperaturas como la nieve son menores al 50%, pero para efectos de la estimación de valores, se considera la peor condición ya

que no se poseen mediciones exactas de emisividad en la zona. En cuanto a la temperatura de superficie que se utilizó fue la de derretimiento del hielo en condiciones normales (273,15 °K) para considerar la peor condición en el cálculo (Oerlemans et al, 2021). Por otra parte, la radiación de onda larga recibida para el glaciar Juncal Norte, donde no se encuentran mediciones directas disponibles, se calculó mediante la siguiente ecuación (Balasubramanian, 2022).

Ecuación 4.6: Radiación de onda larga entrante.

$$RL \downarrow [W m^{-2}] = \sigma \epsilon_{ATM} T_{aire}^4$$

Donde;

σ : Constante de Stefan–Boltzmann [$W m^2 K^4$].

ϵ_{ATM} : Emisividad atmosférica [adimensional].

T_{aire} : Temperatura del aire [K].

Para calcular la emisividad atmosférica se utilizó la siguiente ecuación (Márquez, 2021).

Ecuación 4.7: Emisividad atmosférica.

$$\epsilon_{ATM} [adimensional] = \epsilon_{Cielo Despejado} (1 - N) + \epsilon_{Nubes} N$$

Donde;

$\epsilon_{Cielo Despejado}$: Emisividad del cielo despejado [adimensional].

N : Fracción de cobertura de nubes en la zona [adimensional].

ϵ_{Nubes} : Emisividad de las nubes [adimensional].

Para el cálculo se utilizó una emisividad del cielo despejado de 0,75 (Mendoza et al, 2017), como la peor condición de cielo despejado, considerando la concentración de gases de efecto invernadero de manera uniforme, lo que en alta montaña no se aprecia en su totalidad, producto de la altura y la menor carga de GEI dado a una presión atmosférica más baja. Con respecto a la cobertura de nubes en la zona, no se pudo obtener información por parte de la estación meteorológica Los libertadores, por lo que para efectos del cálculo se consideró cielos con una cubierta de nubes de 100% que representa la peor condición, asimismo se utilizó una emisividad de las nubes de 1 (Liu et al, 2018), para considerar la peor condición de emisividad.

4.2.3 Flujos de calor turbulento.

Para calcular los flujos de calor turbulento sensible se utilizó la siguiente ecuación (Márquez, 2021).

Ecuación 4.8: Flujo de calor turbulento sensible.

$$CT(sensible) [W m^{-2}] = \rho_{Aire} C_p \frac{1}{Pr} C_h v_{viento} (T_{superficie} - T_{Aire})$$

Donde;

ρ_{Aire} : Densidad del aire [$Kg m^{-3}$].

C_p : Capacidad calorífica del aire [$J kg^{-1} K^{-1}$].

Pr : Número turbulento de Prandtl [adimensional].

C_h : Coeficiente de transferencia de calor en superficie nivosa [adimensional].

v_{viento} : Velocidad del viento [$m s^{-1}$].

T_{Aire} : Temperatura del aire [K].

$T_{superficie}$: Temperatura de la superficie [K].

Para el cálculo, se utilizó un número turbulento de Prandtl de 0,7 correspondiente al aire (Coulson & Richardson, 1999), el coeficiente de transferencia de calor en una superficie con un manto nivoso que se utilizó es 0,005 (Hock, 2005; Kuffey & Paterson, 2010), en cuanto a la velocidad del viento y la temperatura del aire, se utilizaron los datos obtenidos de la estación meteorológica Los libertadores, la temperatura de superficie que se utilizó fue la temperatura de derretimiento del hielo en condiciones normales (273,15 °K) para considerar la peor condición en el cálculo (Oerlemans et al, 2021), pese a que la temperatura en superficies nivosas o gélidas se pueden presentar temperaturas menores. Para el cálculo de la capacidad calorífica del aire a diferentes temperaturas se utilizó la siguiente ecuación (Smith et al, 1997).

Ecuación 4.9: Capacidad calorífica del aire.

$$C_p(T)[J mol^{-1}K^{-1}] = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Donde;

a : 28,11 [$J mol^{-1}K^{-1}$]

b : 1,967E-03 [$J mol^{-1}K^{-1}$]

c : 4,802E-06 [$J mol^{-1}K^{-1}$]

d : -1,966E-09 [$J mol^{-1}K^{-1}$]

T : Temperatura del aire [K]

Por otra parte, la densidad del aire se calculó utilizando la siguiente ecuación (Chang & College, 2002; Picard et al, 2008).

Ecuación 4.10: Densidad del aire

$$Densidad\ del\ aire [Kg\ m^{-3}] = \frac{pMa}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \frac{1\ Kg}{1000gr}$$

Donde;

p : Presión atmosférica [Pa].

Ma : Masa molar del aire seco [$gr\ gmol^{-1}$].

Z : Factor de compresibilidad [adimensional].

R : Constante molar de los gases [$Pa\ m^3\ gmol^{-1}K^{-1}$].

T : Temperatura del aire [K].

x_v : Fracción molar de vapor de agua [adimensional].

M_v : Masa molar del agua [$gr\ gmol^{-1}$].

Para el cálculo se utilizaron los datos de presión atmosférica y temperatura del aire obtenidos de la estación meteorológica Los libertadores, se utilizó una masa molar de aire seco de 28,97

$[gr\ gmol^{-1}]$ y una masa molar del agua de $18\ [gr\ gmol^{-1}]$ (Chang & College, 2002), se consideró un comportamiento de gas ideal comprendido en un factor de compresibilidad Z igual a 1 y una constante molar de los gases R de $8,314\ [Pa\ m^3\ gmol^{-1}K^{-1}]$ (Smith et al, 1997; Chang & College, 2002). La fracción molar de vapor de agua se calculó utilizando la ley de Dalton (Chang & College, 2002) en la siguiente ecuación.

Ecuación 4.11: Fracción molar de vapor de agua.

$$\text{Fracción molar de Vapor de agua [adimensional]} = \frac{p_{parcial}}{p_{total}}$$

Donde;

$p_{parcial}$: Presión parcial del gas $[Pa]$.

p_{Total} : Presión atmosférica $[Pa]$.

Para el cálculo se utilizó la presión atmosférica obtenida en la estación meteorológica Los libertadores, y la presión parcial calculo mediante la siguiente ecuación (Chang & College, 2002).

Ecuación 4.12: Presión parcial del gas.

$$\text{Presión parcial del gas [Pa]} = HR\ p_{vapor}$$

Donde;

HR : Humedad relativa [%].

p_{vapor} : Presión de vapor del agua líquida $[Pa]$.

Para el cálculo se utilizó la humedad relativa obtenida en la estación meteorológica Los libertadores y se consideró una presión de vapor del agua líquida a $0^{\circ}C$ ($273,15\ ^{\circ}K$) de $610,5\ [Pa]$ (Felder & Rousseau, 2004).

Para calcular el flujo de calor latente se utilizó la siguiente ecuación (Márquez, 2021).

Ecuación 4.13: Flujo de calor turbulento latente.

$$CT(\text{latente})[W\ m^{-2}] = \rho_{Aire} l_v \frac{1}{Pr} C_e v_{viento} (H_{superficie} - H_{Aire})$$

Donde;

ρ_{Aire} : Densidad del aire $[Kg\ m^{-3}]$.

l_v : Calor latente de vaporización del agua $[J\ Kg^{-1}]$.

Pr : Número turbulento de Prandtl [adimensional].

C_e : Coeficiente de transferencia de humedad en superficie nivosa [adimensional].

v_{viento} : Velocidad del viento $[m\ s^{-1}]$.

H_{Aire} : Humedad del aire [%].

$H_{superficie}$: Humedad de la superficie [%].

Para el cálculo se utilizaron los mismos datos de ρ_{Aire} , Pr , v_{viento} considerados para el cálculo de flujo de calor sensible, el coeficiente de transferencia de humedad en superficie nivosa utilizado fue de 0,003 (Temme et al, 2023), por otra parte, para los valores de v_{viento} y H_{Aire} se utilizaron los datos obtenidos de la estación meteorológica Los libertadores, mientras que se consideró $H_{superficie}$ del 95% puesto que el proceso de funcionamiento del proyecto implica mojar la superficie, para el cálculo del calor latente de vaporización del agua a diferentes temperaturas se utilizó la siguiente ecuación (Smith et al, 1997).

Ecuación 4.14: Calor de vaporización del agua.

$$Q_{vap} [J Kg^{-1}] = Q_{vap normal} \left(1 - \frac{T}{T_{crit}}\right)^{0,38}$$

Donde;

$Q_{vap normal}$: Calor latente de vaporización a presión de 1 atm y temperatura de 100°C

T_{crit} : Temperatura crítica del agua[K].

T : Temperatura del aire[K].

Para el cálculo se utilizó un calor de vaporización a presión y temperatura normal de 2260 [J Kg⁻¹] y una temperatura crítica del agua de 647,1°K (Chang & College, 2002), la temperatura del aire se obtuvo de la base de datos de la estación meteorológica Los libertadores.

4.3 Diseño del reservorio artificial de hielo.

El diseño del reservorio de hielo artificial para el glaciar Juncal Norte está inspirado por el modelo de estupa de hielo o 'Ice stupa' presentado por el ingeniero Sonam Wangchuk en el año 2014 en Ladakh, India (Ravibhanu & Christy, 2018).

Este proceso se realizó en 4 etapas; Selección del emplazamiento y fuente de agua disponible; Diseño de la estructura; Diseño de la ruta de suministro de agua y por último la Operación y mantenimiento.

4.3.1 Selección del emplazamiento y fuente de agua disponible.

La selección del emplazamiento del reservorio de hielo artificial se basó principalmente en la disponibilidad del suministro de agua en la zona, la pendiente de la superficie y la exposición mínima a la radiación solar directa (Maheshwary et al, 2019), una vez cumplidos estos criterios, se priorizó el lugar con el mejor acceso disponible, considerando un traslado aéreo de los materiales de construcción. Para esto, se utilizó la herramienta satelital de Google Earth, la cual ofrece imágenes satelitales en 3D que facilita la identificación de fuentes de agua próximas al lugar, las cuales pueden ser cualquier tipo de cuerpo de agua líquida presente en el sector, como lagunillas, esteros o arroyos glaciares. Para seleccionar la fuente de agua, se tuvo en cuenta que debe existir un diferencial altitudinal entre la fuente de agua y la superficie del reservorio de hielo artificial, puesto que debe generarse la suficiente energía potencial gravitatoria para que opere la estupa de hielo

(Balasubramanian et al, 2022). Mediante funciones ofrecidas en la misma plataforma de Google Earth se realizó mediciones de distancias y altitudes aproximadas para la selección del emplazamiento más idóneo del reservorio.

Marco legal

Se consideró evaluar si el proyecto requiere ser sometido al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, y se determinó si la evaluación corresponde a un Estudio de Impacto Ambiental o a una Declaración de Impacto Ambiental, mediante el análisis de los artículos 10 y 11 de la Ley 19.300. Además, se abordó el tema del aprovechamiento de agua y las posibles formas de obtener este recurso en el sector de estudio. En este contexto, es esencial entender las fuentes hídricas disponibles, como los ríos, esteros o acuíferos, que podrían ser utilizados para abastecer las necesidades del proyecto.

4.3.2 Diseño de la estructura.

Se determinó la forma del soporte estructural del reservorio de hielo artificial, junto con definir el tipo de material a utilizar en su construcción, planteando las bases matemáticas para realizar el cálculo de la cantidad de materiales requeridos, considerando las dimensiones de un reservorio de hielo tipo estupa estándar establecidos en antecedentes bibliográficos referentes a la construcción de estas estructuras (Ravibhanu & Christy, 2018; Lyons, 2023; Balasubramanian et al, 2023). Se realizó un esquema del diseño mediante el uso de la plataforma Acidome, la cual entrega datos precisos de las dimensiones y cantidad de materiales para el desarrollo de domos. Los materiales de construcción y sus cantidades se describen en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Ejemplo de tabla de materiales para construcción.

<i>Materiales estructurales</i>	<i>Unidades</i>	<i>Metros lineales</i>	<i>Metros cuadrados</i>

Para estimar la dimensión del reservorio con hielo almacenado, se realizó cálculos de superficie y volumen, principalmente se asume que la forma de la estupa de hielo es de un cono, por lo que para calcular la superficie de la estupa se utilizó la ecuación 4.16 y para calcular el volumen de la estupa se utilizó la ecuación 4.17 (Oerlemans et al, 2021).

Ecuación 4.15: Área de la base.

$$\text{Área de la base}[m^2] = \pi r^2$$

Donde;

π : Número pi[*adimensional*].

r : Radio[*m*].

Ecuación 4.16: Volumen de un cono.

$$\text{Volumen}_{\text{reservorio con hielo}}[m^3] = \frac{\pi r^2 h}{3}$$

Donde;

π : Número pi[*adimensional*].

h : Altura de la estupa[m].

r : Radio[m].

Para estimar la cantidad de agua almacenada en el reservorio de hielo artificial, se consideró calcular la diferencia del volumen de la estupa de hielo (ecuación 4.17) y el volumen del soporte estructural de la estupa, considerando la disminución del volumen en el cambio de estado de sólido a líquido (Perry & Green, 2021), como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 4.17: Volumen de agua almacenada.

$$\text{Volumen de agua}[m^3] = (\text{Volumen}_{\text{reservorio con hielo}} - \text{Volumen}_{\text{base}}) \frac{\delta_{\text{Hielo}}}{\delta_{\text{Agua}}}$$

Donde;

δ_{Hielo} : Densidad del hielo[$Kg m^{-3}$].

δ_{Agua} : Densidad del agua[$Kg m^{-3}$].

Para el cálculo se utilizó una densidad del hielo de $917 [Kg m^{-3}]$ y una densidad del agua de $1000 [Kg m^{-3}]$ (Chang & College, 2002).

4.3.3 Diseño de la ruta de suministro de agua.

Para realizar el diseño de la ruta de suministro de agua, se estimó la ubicación de la fuente de agua para el abastecimiento del reservorio de hielo artificial, donde se utilizó como base principios hidráulicos y mecánica de fluidos. Para estimar a qué altura se ubicará la fuente de suministro de agua se utilizó la ecuación de Bernoulli, que relaciona la presión, la velocidad de un fluido y la altura de dos puntos en un mismo sistema hidráulico con flujo constante (Mott, 2006; Fernández, 2013).

Ecuación 4.18: Ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g_c} + gh_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g_c} + gh_2 - h_f$$

Donde;

P_1 : Presión absoluta en el punto 1[Pa].

ρ : Densidad del fluido[$kg m^{-3}$].

v_1 : Velocidad del fluido en el punto 1[$m s^{-1}$].

g : Aceleración de gravedad[$m s^{-2}$].

g_c : Factor dimensional[$kg m N s^{-2}$].

h_1 : Altura del fluido en el punto 1[m].

P_2 : Presión en el punto 2[Pa].

v_2 : Velocidad del fluido en el punto 2 [$m s^{-1}$].

h_2 : Altura del fluido en el punto 2[m].

h_f : Perdidas por fricción de Darcy [$Pa m^3 kg^{-1}$].

Para el cálculo se utilizó una presión absoluta en el punto 1 de 71571[Pa], que es la presión promedio anual que se obtuvo de la estación meteorológica Los libertadores, la densidad del agua utilizada fue de 1000 [kg m⁻³](Chang & College, 2002), la velocidad del agua en el punto 1 fue igual a 0 [m s⁻¹], ya que se consideró que el nivel de agua en la fuente se mantenía constante en relación a la altura de captación, producto del constante caudal que posee el estero. La aceleración de gravedad utilizada fue de 9,8[m s⁻²](Mott, 2006), el factor dimensional que se utilizó fue de 9,8 [kg m N s⁻²](Mott, 2006). La altura del fluido en el punto 1(la ubicación de la fuente) fue obtenida mediante la igualdad en la ecuación de Bernoulli. La presión absoluta en el punto 2, fue establecida de acuerdo a la presión de trabajo de la boquilla nebulizadora seleccionada, la cual trabaja con una presión máxima de 500000[Pa], la velocidad del fluido en el punto 2 fue obtenida mediante la igualdad en la ecuación de Bernoulli. La altura del fluido en el punto 2 fue de 6[m], que se estableció de acuerdo a la altura máxima que puede alcanzar el reservorio de hielo de acuerdo a las condiciones estudiadas. Por otra parte, las pérdidas por fricción se calcularon utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach, como se muestra a continuación (Mott, 2006).

Ecuación 4.19: Ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f_d \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v_2^2}{2g_c} \right)$$

Donde;

f_d : Coeficiente de pérdidas.

L : Largo de la tubería[m].

D : Diámetro de la tubería[m].

v_2 : Velocidad del fluido en el punto 2[m s⁻¹].

g_c : Factor dimensional[kg m N s⁻²].

Para el cálculo se utilizó el largo de tubería de acuerdo a la distancia que indicaba la altura obtenida en la ecuación de Bernoulli, esto por medio de la plataforma satelital Google Earth, que permite aproximar distancias de acuerdo a alturas en terrenos con desniveles. El diámetro de la tubería seleccionada fue de 0,075[m](Ravibhanu & Christy, 2018), mientras que se utilizaron los mismos valores de v_2^2 y g_c indicados anteriormente. El coeficiente de pérdidas que se utilizó fue de $64 Re^{-1}$, para lo cual, se calculó el número de Reynolds mediante la siguiente ecuación (Mott, 2006).

Ecuación 4.20: Número de Reynolds.

$$Re = \frac{Dv_2\rho}{\mu}$$

Donde;

D : Diámetro de la tubería[m].

v_2 : Velocidad del fluido en el punto 2[m s⁻¹].

ρ : Densidad del fluido[kg m⁻³].

μ : Viscosidad del agua[Pa s].

Para el cálculo, se utilizaron los mismos valores de D , v_2 y ρ indicados anteriormente, mientras que la viscosidad del agua utilizada, fue de $0,001[Pa\ s]$, considerando una temperatura del agua de $20^\circ C$.

Mediante los cálculos realizados, se pudo determinar la altura óptima a la cual debe ubicarse la fuente de agua para abastecer adecuadamente el reservorio de hielo. Esta altura está directamente relacionada con la velocidad que el agua debe alcanzar al llegar al reservorio, ya que es la energía potencial gravitatoria generada por la caída del agua la que posibilita la operación eficiente de la boquilla nebulizadora, como se indica en la figura 4.2. Esta energía potencial se convierte en presión, y es esencial que dicha presión esté dentro de los valores especificados por el fabricante de la boquilla para garantizar su funcionamiento adecuado. Así, al ajustar la altura de la fuente en función de la velocidad del agua, se asegura que la presión de trabajo requerida sea alcanzada, lo que facilita la nebulización del agua en pequeñas gotas, favoreciendo su congelación y por lo tanto, el correcto almacenamiento de hielo (Oerlemans et al, 2021).

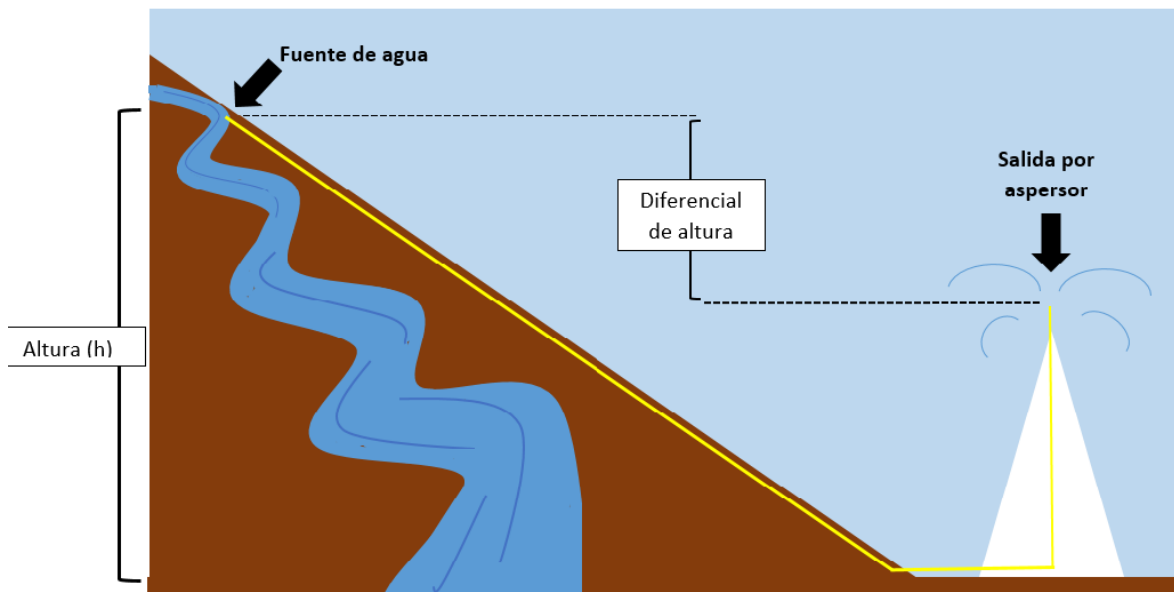


Figura 4.2: Diseño de la ruta de suministro de agua.

Luego, para obtener la distancia entre la fuente de agua y la estupa de hielo, se utilizó la herramienta de medición aproximada de distancias en la plataforma satelital de Google Earth, que permite medir distancias con diferentes alturas topográficas. Una vez obtenida la distancia se pudo considerar la cantidad de material necesario para la ruta de suministro de agua. Cabe mencionar que, para instalar la fuente de agua, se debe construir una bocatoma en el estero, la cual no está considerada en el diseño de la ruta de suministro.

4.3.4 Operación y mantenimiento.

Se establecieron las principales operaciones del funcionamiento del reservorio de hielo artificial, considerando las actividades necesarias para la operación óptima en la acumulación de hielo del reservorio, junto a esto, se estimaron las actividades de mantenimiento estructural y material del

reservorio de hielo artificial, identificando sus respectivos periodos de funcionamiento y operadores.

4.4 Estimación de costos de inversión y operación del reservorio de hielo.

Se estimaron los costos asociados para realizar el proyecto diseñado, detallando costos de inversión y operación de la propuesta, como se detalla a continuación.

4.4.1 Costos de inversión.

Se identificaron los costos de inversión, en los que se consideraron los costos de los materiales de construcción, y los costos de la puesta en marcha, como del traslado de los materiales hacia el lugar del proyecto y la instalación de la estructura, que consideran el uso de empresa contratista para la realización. Como fuente informativa de los valores considerados, se utilizaron los precios de mercado vigentes a la fecha, y el detalle de precios se muestran detallados en una Tabla que indica el producto, la cantidad y su respectivo precio como se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Ejemplo de tabla de costos de inversión.

<i>Ítem</i>	<i>Unidades por ítem</i>	<i>Valor por unidad \$</i>	<i>Costo total \$</i>

4.4.2 Costos de operación y mantenimiento.

Se identificaron los costos de operación y mantenimiento del proyecto, de los cuales se detallaron los costos de ejecución del reservorio de hielo, y la mantención de la estructura que compone a la estupa de hielo, estableciendo un periodo de operación el cual se determinó de acuerdo con el flujo de energía negativo estimado. El detalle de cada costo se muestra en una Tabla de valores, en la cual se identificó cada operación con su respectivo valor en el periodo de tiempo establecido, como se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Ejemplo de tabla de costos de operación y mantenimiento.

<i>Operación</i>	<i>Hora-persona</i>	<i>Periodo total (años)</i>	<i>Valor hora \$</i>	<i>Costo total \$</i>

5 Resultados

5.1 Caracterización Meteorológica.

Área de estudio

El área del Valle Juncal está constituida por varias sub-cuencas que dan origen a diversos afluentes del río Juncal, cuyo origen se encuentra en la lengua glaciaria del Juncal Norte. En la figura 5.1 se ilustra la formación del río Juncal en su tramo inicial, que es la zona donde se llevó a cabo la caracterización meteorológica.

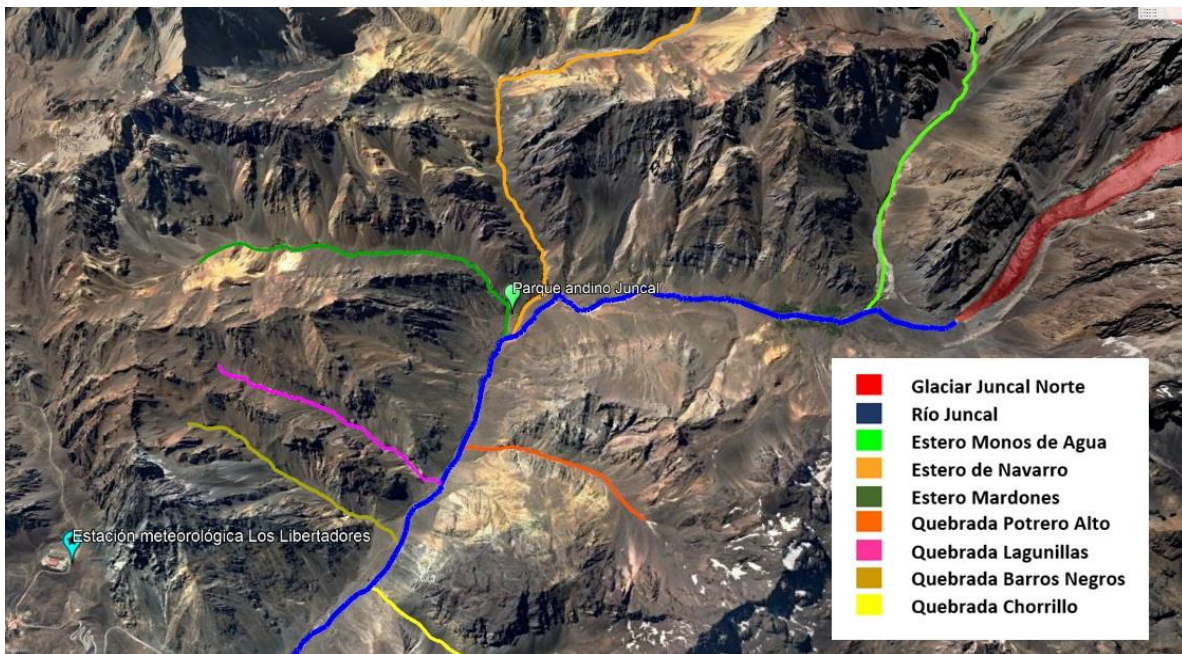


Figura 5.1: Mapa del área de estudio.

5.1.1 Temperatura.

En la tabla 5.1 se presentan los promedios de temperatura mensual y el promedio histórico mensual en los horarios de día y de noche en unidad de grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), desde agosto del año 2012 hasta abril del año actual, con ausencia de datos en algunas fechas específicas, las cuales se omitieron en el cálculo realizado, para obtener un promedio solo con los datos disponibles en la estación.

De acuerdo a los datos obtenidos, se observa un incremento progresivo de la temperatura desde el año 2012 al año 2024, ya que en el verano del año 2013 las temperaturas alcanzan un promedio de 13°C y 12°C en los meses de enero y febrero, mientras que en el verano de 2024 el promedio de la temperatura asciende a 14°C y $14,8^{\circ}\text{C}$ en los mismos meses, mostrando aproximadamente 1 grado Celsius de aumento, por otra parte, en el invierno de 2013 la temperatura tiene un promedio de $1,2^{\circ}\text{C}$ y $1,3^{\circ}\text{C}$ en los meses de julio y agosto, mientras que en el invierno de 2023 la temperatura alcanzó un promedio de $3,7^{\circ}\text{C}$ y $2,9^{\circ}\text{C}$ en los mismos meses, mostrando un aumento de alrededor de 2 grados Celsius. De acuerdo a los datos obtenidos, se describe que las temperaturas anuales en la zona presentan una oscilación entre los 13°C en los días de enero y los $-0,7^{\circ}\text{C}$ en las noches de

septiembre, mostrando un diferencial de temperaturas anual de 13,7°C, como se grafica en la figura 5.2.

Tabla 5.1: Promedios de temperatura mensual en °C entre los años 2012 y 2024.

Mes	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
Año	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	13,1	11,4	12,0	10,5	9,6	8,1	8,1	6,2	3,3	2,3	1,6	0,2
2014	13,1	11,4	10,8	9,0	8,9	7,2	7,5	6,0	3,0	2,1	-0,1	-1,3
2015	13,8	12,0	11,8	10,4	12,1	10,3	9,9	8,1	5,2	3,8	3,9	2,4
2016	12,3	10,9	13,6	11,8	12,0	10,1	4,7	3,7	2,7	1,9	0,9	-0,6
2017	14,7	12,8	11,9	10,2	10,0	8,2	6,3	5,0	1,3	-0,2	0,4	-1,1
2018	11,9	10,1	12,7	11,0	10,9	8,9	10,0	8,5	4,7	3,8	0,2	-1,3
2019	13,0	11,3	13,5	11,9	10,6	8,7	8,8	7,2	3,8	2,7	0,5	-0,8
2020	-	-	12,9	11,4	12,6	10,8	9,8	8,2	8,1	6,8	-	-
2021	-	13,7	-	-	9,9	7,6	8,6	6,3	3,8	1,7	4,1	2,2
2022	14,2	11,6	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	1,6
2023	11,3	9,2	-	-	-	-	-	-	6,5	3,4	6,5	2,4
2024	14,0	12,2	14,8	13,0	13,6	11,5	7,6	6,3	-	-	-	-
Promedio	13,1	11,5	12,7	11,0	11,0	9,1	8,1	6,5	4,2	2,8	2,0	0,4
Año	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
2012	-	-	7,1	4,5	4,8	3,1	3,7	2,2	9,2	7,1	9,9	8,3
2013	1,2	0,1	1,3	-0,2	0,7	-0,5	5,6	3,7	8,1	6,0	13,0	11,1
2014	0,5	-0,5	3,0	1,9	1,2	0,0	8,2	6,2	7,8	6,0	10,0	8,2
2015	-0,1	-1,4	0,5	-0,8	1,1	-0,4	1,9	0,6	5,4	3,7	10,6	8,8
2016	-0,3	-1,4	2,6	0,9	5,8	3,6	4,6	2,9	8,7	6,7	10,5	8,9
2017	2,0	0,8	0,8	-0,8	4,0	2,4	3,9	2,3	7,7	6,0	11,8	10,0
2018	-0,3	-1,4	2,3	0,8	4,8	3,3	4,5	2,8	8,3	6,4	10,4	8,4
2019	1,5	-0,1	3,5	2,0	3,7	2,2	4,8	3,2	11,3	9,3	-	-
2020	-	-	0,0	-1,8	-21,2	-22,9	5,1	2,8	-	-	-	-
2021	3,8	0,3	2,7	1,9	-	-	-	-	-	-	15,8	14,5
2022	-0,8	-2,4	1,4	-0,6	2,2	0,6	5,8	3,8	10,9	8,8	11,7	9,7
2023	3,7	2,0	2,9	1,8	2,1	1,0	4,6	3,0	7,1	5,2	11,6	9,9
2024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	1,1	-0,4	2,3	0,8	3,0	-0,7	4,8	3,0	8,5	6,5	11,5	9,8

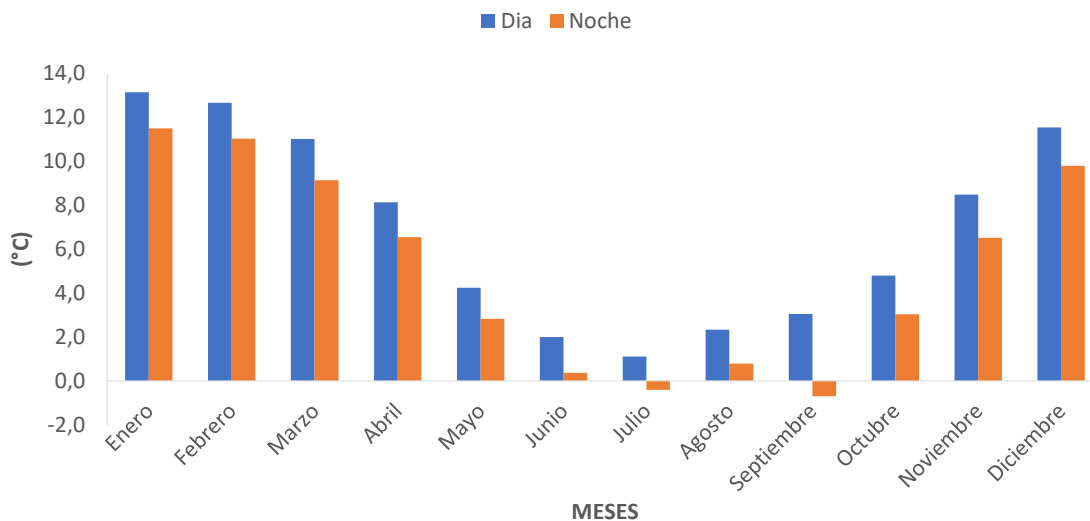


Figura 5.2: Temperaturas históricas mensuales desde 2012 a 2024.

5.1.2 Radiación solar

En la tabla 5.2 se presentan los promedios de radiación solar mensual por año y el promedio histórico mensual en unidad de Watt por metro cuadrado ($W m^{-2}$), desde agosto del año 2012 hasta mayo del año actual, con ausencia de datos en algunas fechas específicas, las cuales se omitieron en el cálculo realizado.

De acuerdo con los datos obtenidos, se observa un ligero aumento de la radiación solar en los meses más cálidos de verano desde el año 2012 al presente año 2024, mientras que, en los meses fríos de invierno, la radiación solar ha presentado una disminución desde el año 2012 al año 2024. Según los datos presentados se puede describir que la radiación solar alcanza sus máximos valores en los meses de diciembre y enero, promediando magnitudes de hasta $1200 W m^{-2}$ aproximadamente, mientras que sus magnitudes mínimas se presentan en los meses de junio y julio, promediando alrededor de 550 watt por metro cuadrado, como se grafica en la figura 5.3.

Tabla 5.2: Promedios de radiación solar mensual en $W m^{-2}$ entre los años 2012 y 2024.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Año						
2012	-	-	-	-	-	-
2013	1203,1	1172,7	1041,4	860,1	595,3	566,5
2014	1214,5	1160,2	1022,8	861,6	646,4	526,8
2015	1209,3	1134,9	978	871	660,9	527,1
2016	1132,3	1152,3	1004,4	596,5	596,2	504,3
2017	1193,9	1151	1036,9	848	599,1	536,1
2018	1219,4	1145,2	1034,2	842,4	603,8	575,1
2019	1214,5	1112,8	1038,2	818,6	649,7	496
2020	-	1138,7	1010,2	820,2	696,9	-
2021	-	-	957,3	887	675,3	579,1
2022	1220,7	1152,1	1054,7	851,8	-	-

2023	1209	1087,4	1013,9	891,7	622,1	652,2
2024	1220,4	1124,4	1026,5	749,6	762,9	-
Promedio	1203,7	1139,2	1018,2	824,9	646,2	551,5
Año	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2012	-	789,9	921,4	946,2	1119,6	1174,8
2013	585,9	656,6	837,6	1003,7	1215,9	1233,8
2014	587,5	697,5	813,6	1020,3	1124,1	1218,9
2015	496,7	609	844,5	916,3	1205,2	1267,1
2016	512	730,2	954,1	1015,8	1197,6	1211,2
2017	580,3	727,2	830,5	1038,2	1076,9	1213,2
2018	497,9	727,6	764,6	978,8	1095,9	1241,1
2019	600,6	735,9	906,1	977,2	1137,7	-
2020	-	779,4	1072,5	1026	-	-
2021	638,4	658,8	898,3	-	-	1235,2
2022	544,9	770,2	892,3	1146,2	1180	1201,7
2023	504,8	640,5	725,5	1027,4	1128	1193,4
2024	-	-	-	-	-	-
Promedio	554,9	710,2	871,8	1008,7	1148,1	1219,0

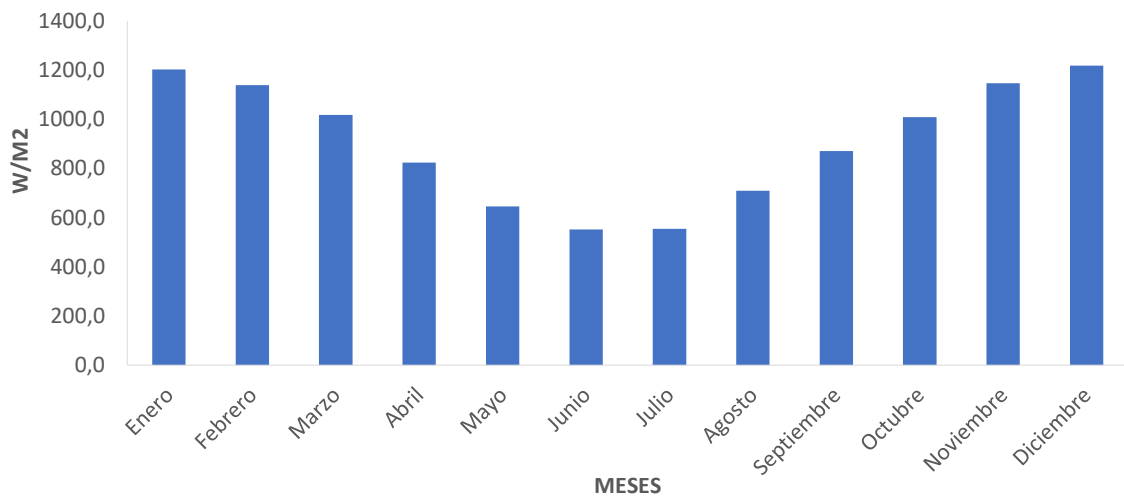


Figura 5.3: Radiación solar histórica mensual desde 2012 a 2024.

5.1.3 Vientos

En la tabla 5.3 se disponen los promedios de velocidad y dirección del viento mensual por año y el promedio histórico mensual en los horarios de día y de noche, presentando la velocidad del viento en unidad de nudo (*kt*) y dirección del viento en unidad de grado ($^{\circ}$), desde agosto del año 2012 hasta abril del año actual, con ausencia de datos en algunas fechas específicas, las cuales se omitieron en el cálculo realizado.

De acuerdo a los datos presentados, se observa que la velocidad del viento ha aumentado alrededor de 2 nudos desde el año 2012 al año 2024, principalmente en los meses de febrero a octubre, mientras que en los meses de noviembre a enero la velocidad del viento se ha mantenido

aproximadamente constante con el pasar de los años presentados. Por otra parte, según los datos obtenidos, se describe que la velocidad del viento en primavera y verano por las noches es más débil que en el día, ya que en los días de diciembre y enero se alcanzan velocidades de hasta 9 nudos, y en las noches las velocidades no superan los 6,5 nudos, Luego, a partir de los meses de mayo hasta agosto las velocidades se estabilizan de día y noche, obteniendo velocidades no superiores a los 7 nudos en ambos horarios, como se grafica en la figura 5.4.

Tabla 5.3: Promedios de velocidad en nudos (kt) y dirección del viento (º) mensual entre los años 2012 y 2024.

Mes	Enero				Febrero				Marzo			
Año	Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección	
	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	8,3	6,4	191	159	7,6	5,9	193	170	7,2	5,2	197	186
2014	8,7	6,8	199	178	8,6	6,4	191	169	7,8	5,8	197	174
2015	8,8	6,4	199	182	7,7	5,8	198	175	7,2	5,8	182	160
2016	7,8	5,5	205	181	8,5	6,2	195	175	7,9	6,0	184	172
2017	8,4	6,4	196	170	8,3	6,4	192	161	8,1	6,0	192	173
2018	8,6	6,4	199	176	7,4	6,3	189	168	9,2	6,9	187	173
2019	7,8	6,2	206	179	8,9	7,3	192	175	8,1	6,8	187	172
2020	-	-	-	-	9,5	7,2	198	175	8,4	6,2	181	163
2021	-	3,4	-	202	-	-	-	-	8,7	7,1	175	160
2022	12,2	10,1	251	241	11,7	9,9	254	242	11,3	8,4	249	235
2023	10,6	7,1	220	267	9,2	6,8	184	160	8,1	5,6	182	162
2024	8,3	6,3	189	147	8,1	6,4	189	151	7,7	4,5	184	125
Promedio	8,9	6,5	206	180	8,7	6,8	197	175	8,3	6,2	191	171
Mes	Abril				Mayo				Junio			
Año	Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección	
	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>
2012	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-
2013	6,1	5,1	179	155	6,9	5,8	192	156	6,1	6,8	159	155
2014	6,7	5,4	190	161	6,3	6,1	183	172	7,8	6,9	174	167
2015	7,4	5,5	184	167	6,6	5,9	188	169	7,6	6,9	204	173
2016	6,8	6,1	195	183	5,4	4,8	168	148	6,0	6,3	145	149
2017	7,3	6,6	188	167	4,5	4,5	153	133	6,3	6,6	161	168
2018	7,5	5,9	191	181	6,0	5,5	196	178	5,9	6,3	176	170
2019	7,1	5,6	167	158	6,3	5,4	188	168	6,8	6,6	188	175
2020	7,7	6,0	180	158	6,1	6,2	157	128	-	-	-	-
2021	7,4	5,6	180	157	7,1	6,5	200	155	5,3	6,2	208	134
2022	9,8	8,6	242	267	-	-	-	-	-	11,0	-	236
2023	9,0	7,1	191	169	6,7	6,3	193	166	7,6	7,1	213	135
2024	8,1	6,1	206	190	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	7,6	6,1	191	176	6,2	5,7	182	157	6,6	7,1	181	166
Mes	Julio				Agosto				Septiembre			
Año	Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección	
	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>
2012	-	-	-	-	4,8	5,4	167	147	6,6	5,6	174	160
2013	5,6	6,1	175	157	7,1	6,8	173	162	7,1	6,4	200	188
2014	5,3	5,9	174	164	7,8	7,7	173	160	7,0	5,7	188	184

2015	6,2	6,6	191	180	7,1	6,9	192	174	6,5	5,8	198	170
2016	6,3	6,0	187	172	7,1	6,9	168	151	7,9	7,7	169	156
2017	7,1	6,7	189	168	6,6	6,4	206	173	7,4	5,8	186	169
2018	5,9	6,7	183	152	6,9	7,0	168	149	7,1	6,0	194	175
2019	6,1	5,9	180	158	7,2	6,9	186	177	8,1	6,7	188	169
2020	-	-	-	-	7,3	6,4	179	167	7,7	5,8	190	180
2021	6,7	8,5	184	121	7,9	7,0	180	142	6,1	5,7	191	157
2022	7,8	7,3	200	168	6,3	7,2	164	148	9,4	7,6	150	156
2023	7,5	6,5	198	161	10,2	9,5	207	193	8,1	7,2	210	204
2024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	6,5	6,6	186	160	7,2	7,0	180	162	7,4	6,3	186	172
Mes	Octubre				Noviembre				Diciembre			
Año	Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección		Velocidad		Dirección	
	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>	<i>Dia</i>	<i>Noc</i>
2012	6,5	4,9	211	173	7,7	5,6	206	181	8,8	5,7	218	194
2013	7,1	5,8	187	164	8,2	5,8	204	184	8,7	5,9	203	179
2014	8,1	5,3	212	177	8,1	6,1	212	200	8,8	6,3	211	188
2015	6,5	5,7	206	195	7,9	6,6	189	171	7,5	5,5	203	181
2016	6,9	5,5	209	180	8,3	7,2	201	179	8,3	5,8	204	184
2017	8,2	6,7	204	188	7,6	5,9	216	195	8,2	5,8	205	184
2018	7,0	5,4	216	189	7,6	5,8	207	180	8,6	6,2	205	172
2019	8,7	6,1	206	176	8,6	5,5	207	172	-	-	-	-
2020	10,0	7,0	203	193	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	-	-	-	-	-	-	-	-	12,0	11,5	249	248
2022	10,9	8,6	200	200	8,8	7,2	199	176	9,0	6,4	197	172
2023	8,0	6,1	213	187	8,0	5,4	203	167	8,2	5,7	192	156
2024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	8,0	6,1	206	184	8,1	6,1	204	180	8,8	6,5	209	186

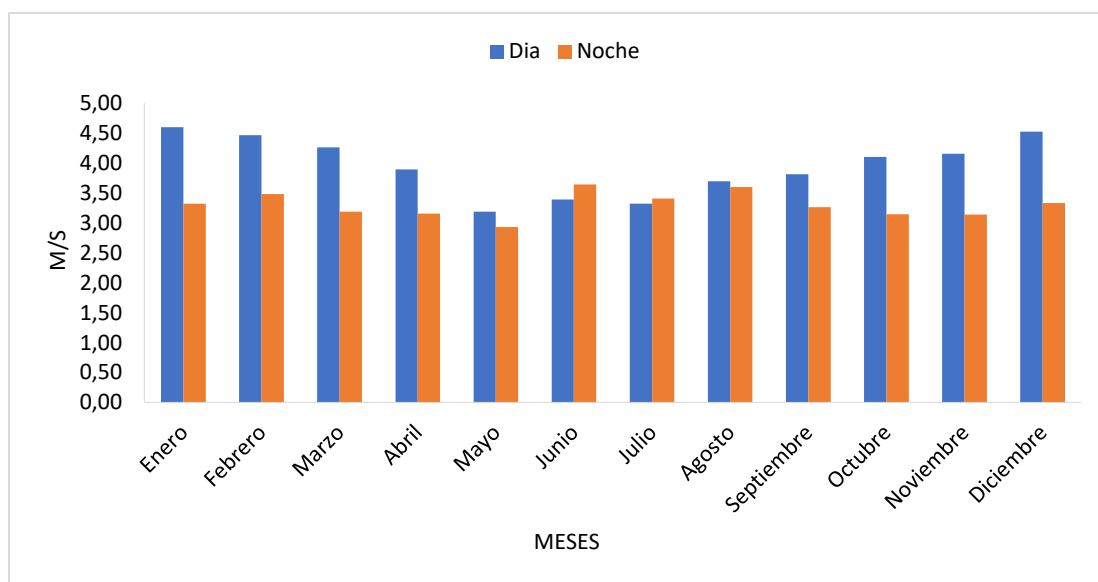


Figura 5.4: Velocidad en m/s del viento histórica mensual desde 2012 a 2024.

Por otra parte, las direcciones del viento se mantienen aproximadamente constantes en el transcurso del año, ya que, existe una frecuencia de vientos que predominan con dirección suroeste y sur, mostrando mayor tendencia entre los 180° y 200° (suroeste), con pocas variaciones de direcciones menores a los 180° (sur) y mayores a los 150° (sureste), representando una frecuencia menor al 13% del total de direcciones, como se puede apreciar en la rosa de los vientos de la figura 5.5.

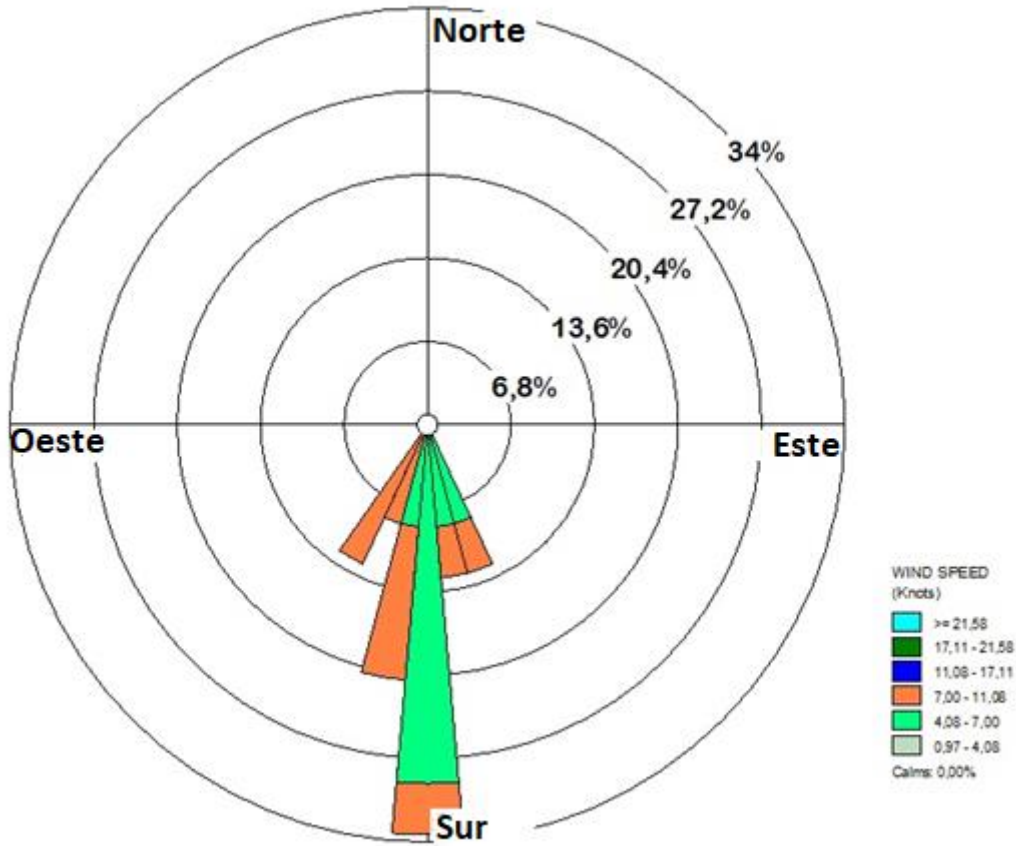


Figura 5.5: Rosa de los vientos de estación Los libertadores con promedios de velocidad y dirección históricos mensuales desde 2012 a 2024.

5.1.4 Humedad relativa

En la tabla 5.4 se presentan los promedios de humedad relativa mensual y el promedio histórico mensual en los horarios de día y de noche en unidad de porcentaje (%), desde agosto del año 2012 hasta abril del año 2024, con ausencia de datos en algunas fechas específicas, las cuales se omitieron en el cálculo realizado.

De acuerdo a los datos de humedad relativa presentados, no existe una tendencia clara en la fluctuación de la humedad relativa en el periodo de años desde el 2012 hasta el año 2024, ya que, en algunos años hay aumentos de hasta un 10% de humedad y otros con una disminución igual o mayor. Por otra parte, la tendencia anual histórica, indica que los periodos con mayor humedad

relativa en el aire son los meses de enero y septiembre, alcanzando promedios máximos cercanos al 40% de humedad relativa, mientras que los meses de marzo y abril son en los que la humedad relativa alcanza promedios mínimos cercanos al 30%, como se grafica en la figura 5.6.

Tabla 5.4: Promedios de % humedad relativa mensual entre los años 2012 y 2024.

Mes	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
Año	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>	<i>Día</i>	<i>Noc</i>
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	44,2	44,1	38,9	38,9	28,6	29,0	23,5	24,0	35,4	35,6	41,0	41,1
2014	40,6	40,7	35,2	35,3	37,1	37,4	25,1	25,5	34,7	35,0	40,2	39,9
2015	31,5	31,7	40,5	40,5	33,5	34,1	19,8	19,9	22,7	22,7	19,5	19,6
2016	40,2	40,1	30,2	30,5	28,3	28,3	52,2	52,0	54,2	54,1	43,9	44,5
2017	33,7	33,9	42,5	42,4	38,3	38,5	41,8	41,7	47,8	47,4	39,1	39,0
2018	39,3	39,5	42,3	42,5	26,3	26,7	22,1	22,3	31,2	31,2	38,2	38,1
2019	32,3	32,3	33,2	33,1	27,1	27,3	23,8	24,0	30,7	30,7	36,0	36,3
2020	-	-	31,0	31,0	27,3	27,5	24,5	24,5	16,2	16,1	-	-
2021	-	61,1	21,2	-	21,2	23,4	25,6	25,8	27,9	27,8	29,4	29,2
2022	26,5	27,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,1
2023	44,8	45,8	-	-	-	-	-	-	36,6	36,8	24,6	24,4
2024	33,7	33,7	40,4	40,3	27,2	27,3	31,8	32,0	-	-	-	-
Promedio	36,7	39,1	35,5	37,2	29,5	29,9	29,0	29,2	33,7	33,7	34,7	35,0
Año	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
2012	-	-	26,1	26,8	35,8	35,8	42,8	42,9	32,9	33,0	39,1	39,0
2013	37,8	37,7	39,3	39,2	44,0	43,9	31,4	32,3	35,6	36,2	31,2	31,2
2014	41,4	41,5	32,1	32,4	51,0	50,9	33,0	33,2	31,9	32,2	33,9	34,2
2015	45,2	44,9	52,3	52,0	48,8	48,7	51,9	52,1	44,4	44,5	33,9	34,0
2016	47,6	47,6	34,7	34,9	24,7	25,1	46,4	46,2	38,1	38,3	43,0	43,0
2017	30,6	30,5	37,6	37,5	38,8	38,9	36,6	36,7	40,5	40,2	30,8	31,1
2018	38,6	38,5	29,7	29,8	33,5	34,0	43,4	43,9	38,9	39,2	34,7	34,8
2019	28,6	28,7	26,3	26,8	32,8	32,9	30,4	30,8	24,2	24,2	-	-
2020	-	-	33,9	33,8	33,5	33,4	24,8	24,9	-	-	-	-
2021	20,0	20,0	28,2	28,2	-	-	-	-	-	-	25,1	24,8
2022	44,2	44,0	35,2	35,2	31,4	31,1	37,1	36,5	33,7	33,5	37,1	37,6
2023	35,0	34,8	44,0	43,7	52,4	52,2	37,4	37,4	39,8	39,9	30,8	31,1
2024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	36,9	36,8	35,0	35,0	38,8	38,8	37,7	37,9	36,0	36,1	34,0	34,1

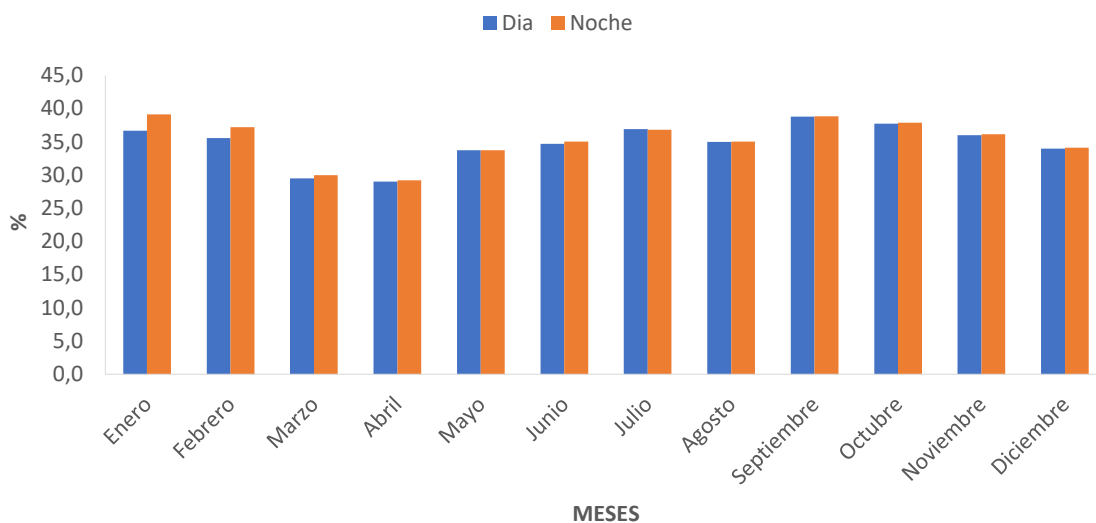


Figura 5.6: Humedad relativa histórica mensual desde 2012 a 2024.

5.1.5 Presión atmosférica

En la tabla 5.5 se presentan los promedios de presión atmosférica mensual y el promedio histórico mensual en unidad de hectopascal (*hPa*), desde agosto del año 2012 hasta abril del año 2024, con ausencia de datos en algunas fechas específicas, las cuales se omitieron en el cálculo realizado.

De acuerdo a los datos presentados de presión atmosférica, se observa que no existe una variación significativa en el periodo de años obtenido, ya que los valores de presión atmosférica son aproximadamente constantes en el tiempo, por lo que se describe que en los meses de enero, febrero y marzo se presenta un promedio máximo de presión atmosférica de 717 hPa, mientras que en los meses de septiembre y octubre se presentan promedios mínimos de 714 hPa, como se grafica en la figura 5.7.

Tabla 5.5: Promedios de presión atmosférica mensual en hPa entre los años 2012 y 2024.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Año						
2012	-	-	-	-	-	-
2013	717,1	716,8	716,4	716,4	715,5	715,4
2014	716,9	715,9	716,2	715,9	715,2	713,5
2015	717,3	716,8	717,6	716,9	715,7	715,7
2016	717,4	717,2	717,9	715,0	714,9	715,9
2017	718,0	717,3	716,6	715,6	713,6	713,9
2018	716,6	717,3	716,4	717,3	715,9	714,9
2019	717,1	717,5	716,8	716,8	714,6	713,8
2020	-	717,6	718,0	718,2	718,8	-
2021	-	-	715,7	716,1	715,7	-
2022	716,4	-	-	-	-	-

2023	717,8	717,5	718,4	716,3	716,3	-
2024	718,0	718,5	718,3	715,7	713,0	714,5
Promedio	717,3	717,2	717,1	716,4	715,4	714,7
Año	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2012	-	717,9	715,1	713,8	715,8	715,4
2013	714,2	715,2	714,0	715,0	715,4	716,8
2014	715,0	715,2	713,6	715,7	715,7	715,8
2015	714,1	713,1	713,6	713,2	713,9	715,6
2016	713,7	716,1	716,7	714,5	716,2	716,2
2017	715,4	713,8	715,4	714,3	715,4	716,6
2018	713,8	715,7	715,2	714,9	715,9	716,4
2019	715,2	716,4	713,9	714,2	716,9	-
2020	-	713,3	712,7	714,7	-	-
2021	-	714,9	714,2	-	-	-
2022	712,5	715,1	714,6	715,6	716,7	716,9
2023	716,2	714,6	713,8	714,1	714,9	716,2
2024	-	-	-	-	-	-
Promedio	714,5	715,1	714,4	714,6	715,7	716,2

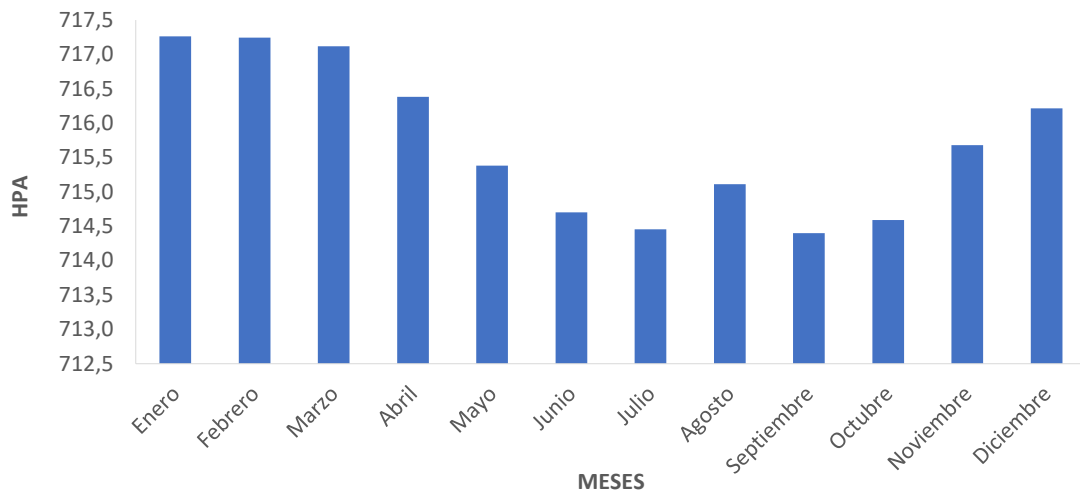


Figura 5.7: Presión atmosférica histórica mensual desde 2012 a 2024.

5.2 Flujos energéticos

5.2.1 Superficie sin nieve

En la tabla 5.6 se presentan los flujos de energía superficial mensuales, en los horarios de día y de noche en unidad de $W m^{-2}$ obtenidos de acuerdo a un albedo de 0,3 correspondiente a una superficie sin nieve, representando la peor condición de acuerdo al balance de energía.

De acuerdo a los resultados obtenidos se evidencia que existe una variación en la radiación de onda corta neta de alrededor de $467 W m^{-2}$ a lo largo del año, siendo diciembre el mes que tiene la

mayor radiación solar de onda corta en el año y junio la menor radiación de onda corta, asimismo, la radiación de onda larga neta tiene el mismo comportamiento a lo largo del año, presentando valores de hasta $65,3 \text{ W m}^{-2}$ en los días de enero y -3 W m^{-2} en las noches de septiembre. Por otra parte, los flujos de calor turbulento presentan distintos resultados. El flujo de calor turbulento latente se mantiene estable a lo largo del año, con valores entre -7 y -5 W m^{-2} , mientras que el flujo de calor turbulento sensible varía presentando un máximo de $147,3 \text{ W m}^{-2}$ en los días de enero, y un mínimo de $-5,2 \text{ W m}^{-2}$ en las noches de septiembre. De acuerdo a estos valores los flujos de energía superficial tienden a ser positivos la gran parte del año, con la excepción de las noches de junio a septiembre presentando valores entre $-13,19$ a $-1,28 \text{ W m}^{-2}$ como se muestra en la figura 5.8.

Tabla 5.6: Flujos de energía (W m^{-2}) en superficie sin nieve.

Mes	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc
RC (neta)	842,6	0	797,5	0	712,7	0	577,4	0	452,4	0	386,03	0
RL (neta)	65,3	56,3	62,7	54,3	54,3	44,5	39,4	31,4	20,1	13,4	9,1	1,6
CT(l)	-7	-5	-7	-5	-7	-5	-7	-5	-5	-5	-5	-6
CT(s)	147,3	93,12	133,4	90,9	111,7	70,3	76	49,8	32,8	20,3	16,1	3,1
Flujo	1048,2	144,46	986,5	140,2	871,7	109,76	685,8	76,18	500,3	28,68	406,24	-1,28
Mes	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc
RC (neta)	388,4	0	497	0	610,2	0	706,1	0	803,7	0	853,3	0
RL (neta)	5,3	-2,1	11,0	3,5	14,3	-3,0	22,5	14,3	40,9	31,4	56,9	47,5
CT(l)	-5	-5	-6	-6	-6	-5	-6	-5	-6	-5	-7	-5
CT(s)	9,3	-3,8	21,2	6,6	28,2	-5,2	47,1	23,2	83,9	49,3	123,5	77,2
Flujo	398,1	-10,87	523	4,08	646,8	-13,19	769,7	32,5	922,5	75,7	1027	119,74

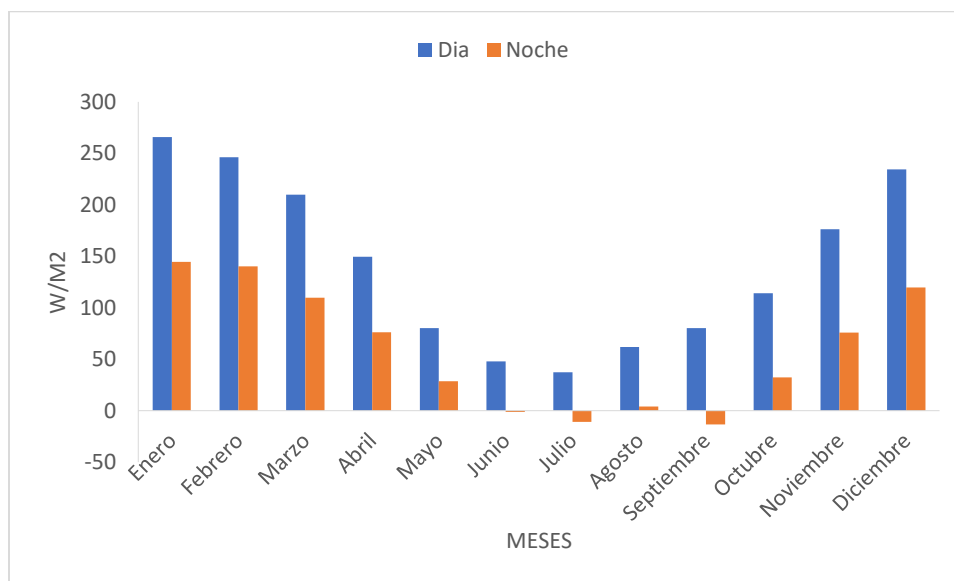


Figura 5.8: Flujos de energía en superficie sin nieve.

5.2.2 Superficie con nieve

En la tabla 5.7 se presentan los flujos de energía superficial mensuales, en los horarios de día y de noche en unidad de $W m^{-2}$ obtenidos de acuerdo a un albedo de 0,95 correspondiente a una superficie con nieve fresca (Qiu et al, 2001; Landsberg & Makvart, 2003; Temme et al, 2023), representando la mejor condición de acuerdo al balance de energía.

De acuerdo a los resultados obtenidos se evidencia que existe un diferencial de radiación de onda corta neta de alrededor de $33,95 W m^{-2}$ a lo largo del año, siendo diciembre y enero los meses que tienen la mayor radiación solar de onda corta neta, con valores de $60 W m^{-2}$ aproximadamente y los meses de junio y julio la menor radiación de onda corta neta, con valores de $27 W m^{-2}$ aproximadamente. Asimismo, los valores de radiación de onda larga neta y los flujos de calor turbulento tienen los mismos valores que los resultados obtenidos con menor albedo, ya que, para el cálculo, el albedo influye principalmente en la radiación de onda corta neta.

Los flujos de energía superficial con estos resultados, se mantienen positivos en la misma cantidad de meses que con un albedo sin nieve, pero con valores significativamente menores, que van desde $265 W m^{-2}$ en los días de enero y $28,68 W m^{-2}$ en las noches de mayo, mientras que los meses de junio a septiembre, en que los flujos son negativos, se presentan los mismos valores entre $-13,19$ a $-1,28 W m^{-2}$, como se muestra en la figura 5.9.

Tabla 5.7: Flujos de energía ($W m^{-2}$) en superficie con nieve.

Mes	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc
RC (neta)	60,2	0	56,96	0	50,91	0	41,24	0	32,31	0	27,573	0
RL (neta)	65,3	56,3	62,7	54,3	54,3	44,5	39,4	31,4	20,1	13,4	9,1	1,6
CT(l)	-7	-5	-7	-5	-7	-5	-7	-5	-5	-5	-5	-6
CT(s)	147,3	93,12	133,4	90,9	111,7	70,3	76	49,8	32,8	20,3	16,1	3,1
Flujo	265,8	144,46	246	140,2	209,9	109,76	149,6	76,18	80,21	28,68	47,783	-1,28
Mes	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc	Día	Noc
RC (neta)	27,75	0	35,5	0	43,59	0	50,44	0	57,4	0	60,95	0
RL (neta)	5,3	-2,1	11,0	3,5	14,3	-3,0	22,5	14,3	40,9	31,4	56,9	47,5
CT(l)	-5	-5	-6	-6	-6	-5	-6	-5	-6	-5	-7	-5
CT(s)	9,3	-3,8	21,2	6,6	28,2	-5,2	47,1	23,2	83,9	49,3	123,5	77,2
Flujo	37,39	-10,87	61,7	4,08	80,12	-13,19	114,1	32,5	176,2	75,7	234,3	119,74

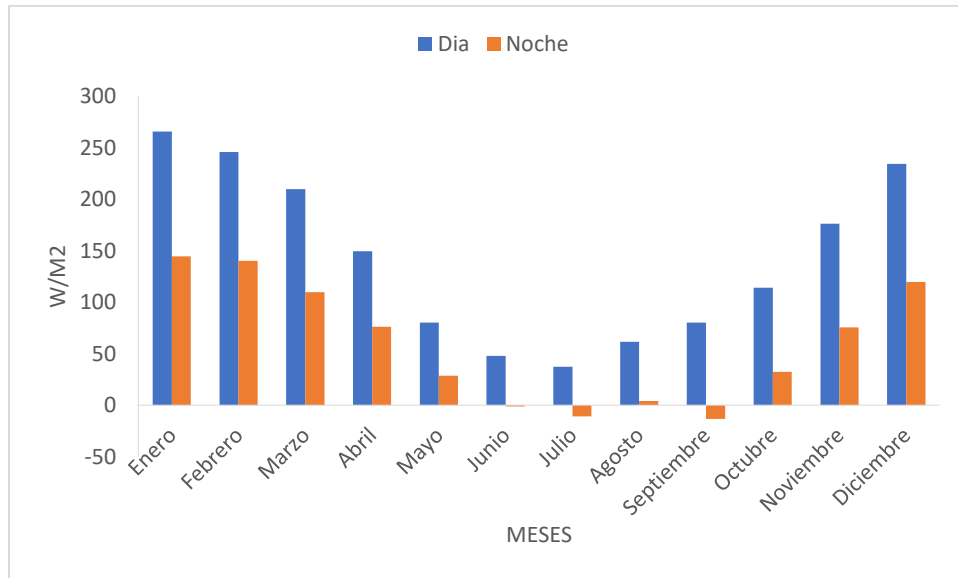


Figura 5.9: Flujos de energía en superficie con nieve

5.3 Diseño del reservorio de hielo.

5.3.1 Selección del emplazamiento y fuente de agua disponible.

La ubicación del reservorio de hielo se estableció en la confluencia del Estero Monos de Agua y el río Juncal, un área de alto potencial para el proyecto debido a sus características geográficas y su accesibilidad. En esta zona se forma una morrena como se muestra en la figura 5.10, lo cual proporciona una superficie con poca inclinación y de fácil acceso mediante senderos. Además, se ha identificado el Estero Monos de Agua como una fuente de agua potencialmente viable para el proyecto, dado que desde su punto más alto hasta el sitio seleccionado presenta un desnivel de aproximadamente 1000 metros. Esta disposición permitiría optimizar el flujo de agua hacia el reservorio, maximizando su eficiencia y funcionalidad.

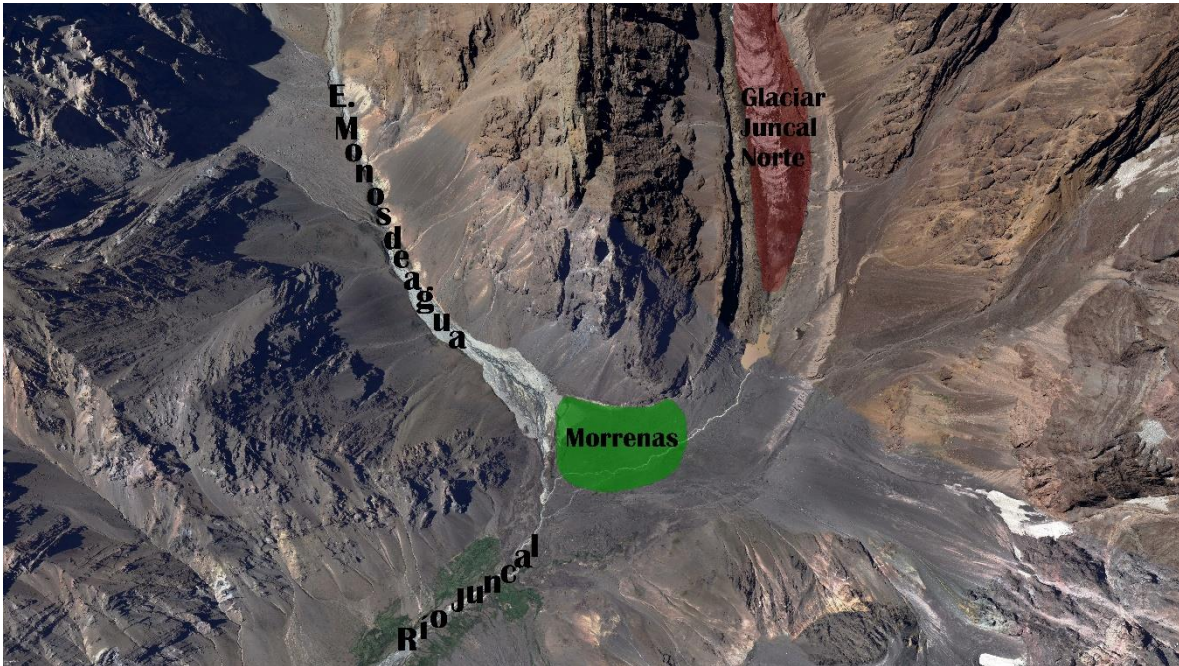


Figura 5.10: Estero Monos de agua, río Juncal y Glaciar Juncal Norte.
(Fuente: Google Earth)



Figura 5.11: Sector Morrenas
(Fuente: Google Earth)

El estero Monos de Agua es un afluente del río Juncal a escasos metros de su nacimiento en el glaciar Juncal Norte. Está situado en la subcuenca noreste de este glaciar. Su origen se encuentra en los glaciares Alto del río Plomo (figura 5.12) y León Negro (figura 5.13), a más de 4000 metros sobre el nivel del mar en la frontera trasandina (Muratti, 2016). Este estero representa una valiosa fuente de agua para el proyecto, dado que reúne las condiciones técnicas necesarias para abastecer el reservorio. Su considerable diferencial de altura desde el área de Morrenas, donde se planea

construir el reservorio de hielo artificial, proporciona un desnivel de aproximadamente 1000 metros, lo que podría optimizar el flujo de agua y a su vez maximizar la energía potencial gravitatoria para que se produzca la aspersión nebulizada del agua (Oerlemans et al, 2021; Balasubramanian et al, 2023).



Figura 5.12: Glaciar Alto del río Plomo.



Figura 5.13: Glaciar León Negro.

Marco legal

En relación con la normativa vigente para la ejecución de proyectos que puedan generar impactos ambientales, se ha determinado que este proyecto debe ser sometido al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Según las características del diseño, el proyecto presenta una posible susceptibilidad para generar impactos ambientales, especialmente en la instalación de acueductos, lo cual está claramente señalado en el Artículo 10 de la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Dado que el proyecto se encuentra ubicado en una zona cercana a glaciares, que son considerados sitios prioritarios para la conservación debido a su alta vulnerabilidad, este debe ser evaluado mediante un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Esto se justifica por lo dispuesto en el Artículo 11 de la misma ley, que establece que las áreas cercanas a glaciares son zonas susceptibles a sufrir alteraciones o daños, por lo que requieren un análisis exhaustivo para prevenir impactos negativos en el medio ambiente y en los ecosistemas circundantes. Este proceso asegura que las medidas de mitigación y los posibles impactos sean adecuadamente gestionados, de acuerdo con las exigencias legales y ambientales del país.

Por otro lado, en cuanto a los derechos de aprovechamiento de agua, no existe ningún tipo de extracción de aguas en esta sección del río Juncal (Cosmos, 2009), por lo que se considera solicitar los permisos correspondientes a la Dirección General de Aguas (DGA), mediante el Estudio de Impacto Ambiental correspondiente para la evaluación realizada por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

5.3.2 Diseño de la estructura.

El reservorio de hielo consiste en una estructura con base en forma de domo geodésico octaédrico, diseñada siguiendo el modelo de Estupa de hielo (Ravibhanu & Christy, 2018). Este diseño, ilustrado en la figura 5.14, se inspira en la arquitectura tradicional de las estupas, adaptado para optimizar el almacenamiento de agua en forma de hielo en entornos de alta montaña. La estructura permite una distribución estable y eficiente del hielo, facilitando la acumulación gradual y prolongando su conservación (Lyons, 2023).



Figura 5.14: Modelo de estupa de hielo.
(Fuente: Ravibhanu & Christy, 2018)

Las dimensiones del diseño se fundamentaron en que una estupa de hielo puede crecer entre 1 y 2 metros de altura por mes, dependiendo de las condiciones climáticas de la zona, como lo señala la evidencia (Oerlemans et al, 2021; Balasubramanian et al, 2023). Considerando que una persona debe operar en su interior para instalar tuberías durante el proceso de crecimiento (Ravibhanu & Christy, 2018), se estableció una altura interna de 2 metros y un diámetro de 4 metros como se indica en la Figura 5.15, siguiendo los principios geométricos de un domo geodésico, con una entrada a su interior de 2 metros con una altura de 1.80 metros, como se ilustra en la figura 5.16.

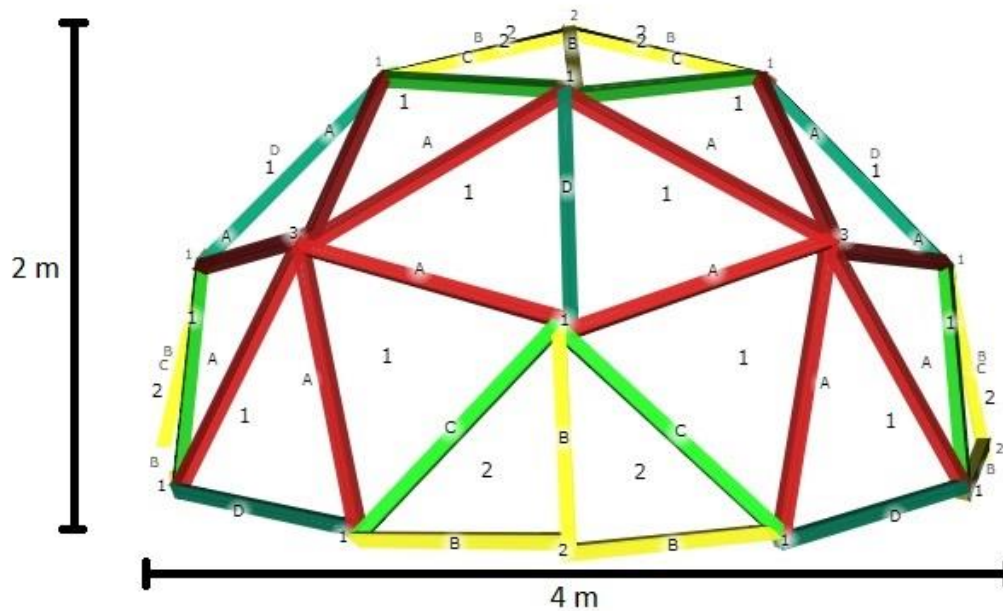


Figura 5.15: Esquema de domo geodésico.

El diseño del domo geodésico consta de un entramado de triángulos, compuestos de diferentes tipos de piezas identificadas con los colores verde, rojo, amarillo y azul, las cuales tienen dimensiones específicas ilustradas en la figura 5.16.

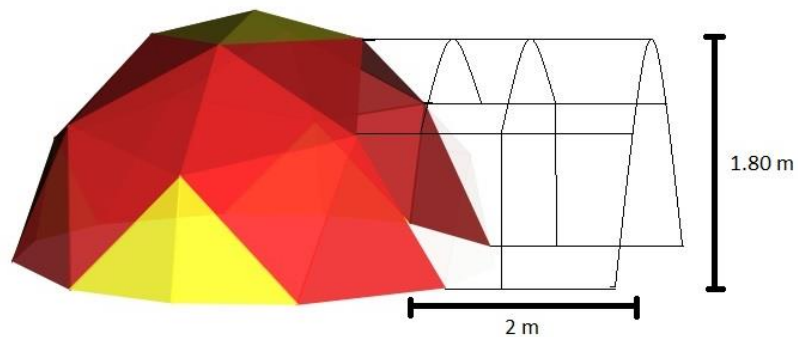


Figura 5.16: Esquema de entrada del domo.

En la cubierta del domo se considera la instalación de polietileno, para facilitar el funcionamiento del reservorio e impedir que se acumule hielo al interior de la estructura (Ravibhanu & Christy, 2018). Se consideró una materialidad estructural de acero para el aseguramiento de su resistencia, estableciendo las dimensiones y cantidades de cada una de sus partes para el armado, como se

muestra en la figura 5.17, siguiendo el esquema presentado en la figura 5.15. Se considera el pintado de la estructura con esmalte anticorrosivo de color blanco, para protegerlo de la humedad presente en el ambiente.

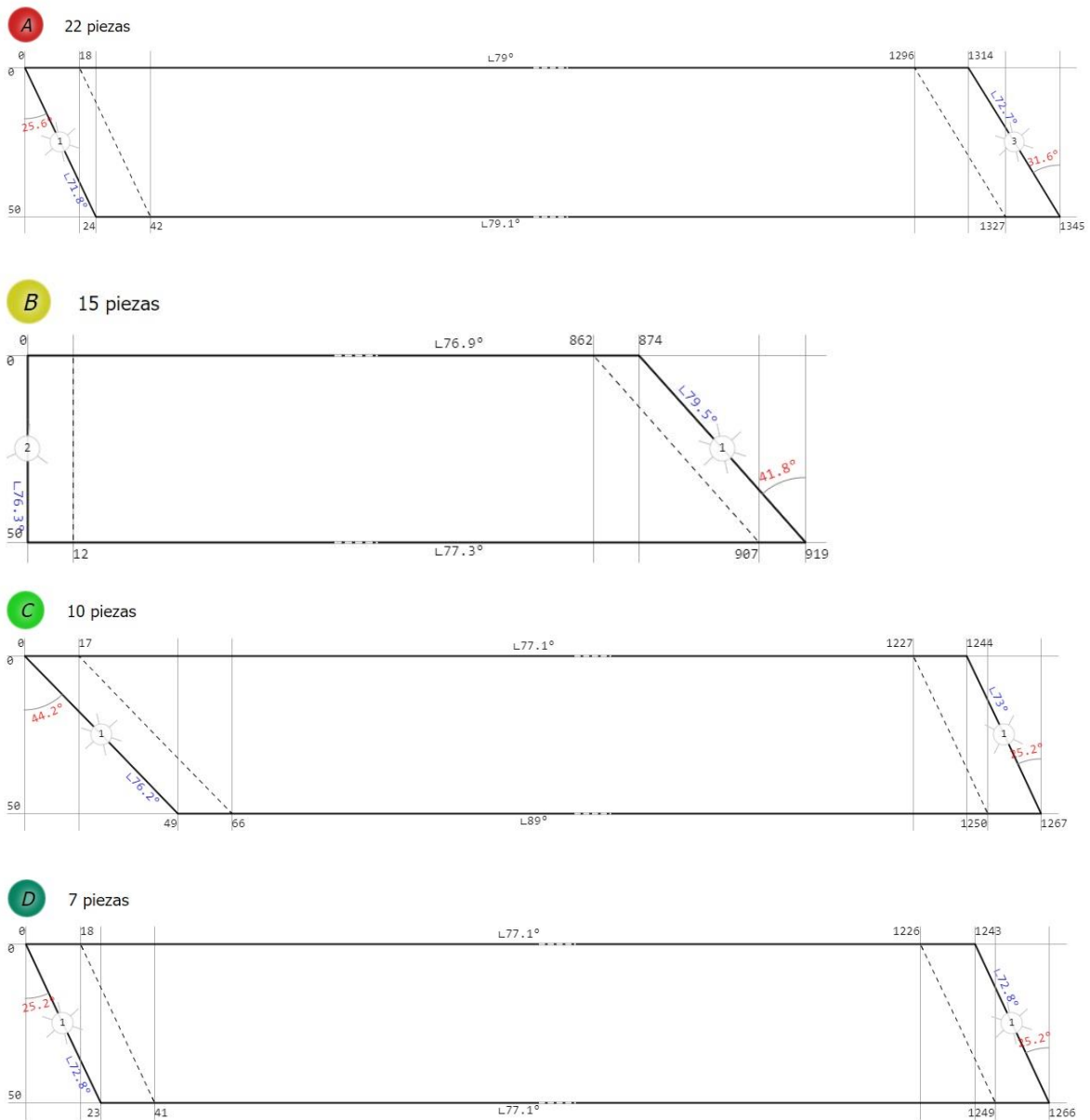


Figura 5.17: Cantidad de piezas y sus dimensiones en mm del diseño estructural del domo.

Para el sistema de funcionamiento, se ha propuesto utilizar una tubería de PVC con un diámetro de 25 mm, la cual se conectará a la tubería principal que transporta el agua desde la fuente de abastecimiento en el río. Esta tubería de PVC estará instalada de manera que salga al exterior por la parte superior de la estructura en forma de domo. En el extremo de la tubería, se planea integrar una boquilla nebulizadora también de 25 mm de diámetro, con el objetivo de pulverizar el agua y promover su congelación al entrar en contacto con el ambiente como se muestra en la figura 5.18.



Figura 5.18: Boquilla nebulizadora.
(Fuente: Ravibhanu & Christy, 2018)

A medida que la superficie del domo se cubre de hielo y la acumulación supera la altura de la boquilla, se prevé la necesidad de extender su alcance para mantener una pulverización efectiva en la nueva superficie de hielo, para ello, se planea la adición de tramos de tubería de PVC de 1 metro de longitud (Oerlemans et al, 2021), permitiendo una extensión máxima de hasta 6 metros de altura, de acuerdo con las condiciones presentadas.

A continuación, se muestra en la tabla 5.8 la lista de los materiales principales y las cantidades consideradas en el diseño, según los requerimientos de funcionamiento del sistema. Junto a esto se detalla el peso aproximado por material para considerarlo en el traslado de materiales hacia la zona de estudio. Por otra parte, en la tabla 5.9 se presentan las dimensiones finales del reservorio de hielo diseñado.

Tabla 5.8: Cantidad de materiales estructurales.

Materiales estructurales	Espesor (mm)	Unidades	m	m ²	kg
Acero 50mmx50mmx2mm	2	14	84,32	-	238
polietileno	0,15	-	-	19,17	15
Tubería PVC 25mm	-	1	6	-	-
Fittings	-	2	-	-	-
Válvulas	-	1	-	-	-
Boquilla nebulizadora 5 bar 25mm	-	1	-	-	-

Tabla 5.9: Dimensiones del reservorio de hielo artificial.

Dimensión	m	m ²	m ³
Altura del domo	2	-	-
Diámetro del domo	4	-	-
Volumen del domo	-	-	16,75
Altura máx. con hielo	6	-	-
Diámetro máx. con hielo	5	-	-

Volumen máx. de hielo acumulado entre junio y septiembre.	-	-	22,5
Volumen máx. de agua acumulada entre junio y septiembre.	-	-	20,6

5.3.3 Ruta de suministro de agua

La ruta de suministro de agua abarca el traslado del agua desde el estero Monos de Agua hasta el reservorio de hielo artificial situado en el sector Morrenas. La fuente de agua debe estar ubicada a una altura de 3070 metros sobre el nivel del mar, ya que a esta altura se presenta un diferencial de altura respecto al reservorio de hielo de 290 [m], altura obtenida mediante la ecuación de Bernoulli para cumplir con las necesidades del sistema diseñado. Según esta altura, la distancia obtenida desde el reservorio hasta la fuente fue de 3388 [m]. La fuente de agua debe considerar una bocatoma instalada en el estero. Desde allí, el agua es conducida a través de una tubería de polietileno de 75 mm de diámetro, que se conecta mediante fittings a una tubería de PVC que se eleva por la parte superior del domo hasta la boquilla, de acuerdo a antecedentes previos en figura 5.20 (Ravibhanu & Christy, 2018).

La altitud de la fuente es crucial para el correcto funcionamiento del reservorio, ya que, la energía potencial gravitatoria generada por la caída del agua proporciona la presión necesaria para que la boquilla nebulizadora expulse el agua en pequeñas gotas, lo que a su vez facilita su congelamiento (Oerlemans et al, 2021), como se grafica en la figura 5.19.

Para efectos del trabajo se consideró que la fuente de agua mantiene un caudal constante, que garantiza un suministro continuo a través de la tubería seleccionada. Para controlar el flujo de agua, se consideraron dos válvulas de paso: una en el extremo superior de la ruta de suministro y otra en el extremo inferior, dentro del domo. Estas válvulas permiten regular el flujo de agua según sea necesario, lo que contribuye a la efectividad del sistema y asegura que el reservorio opere de manera óptima.

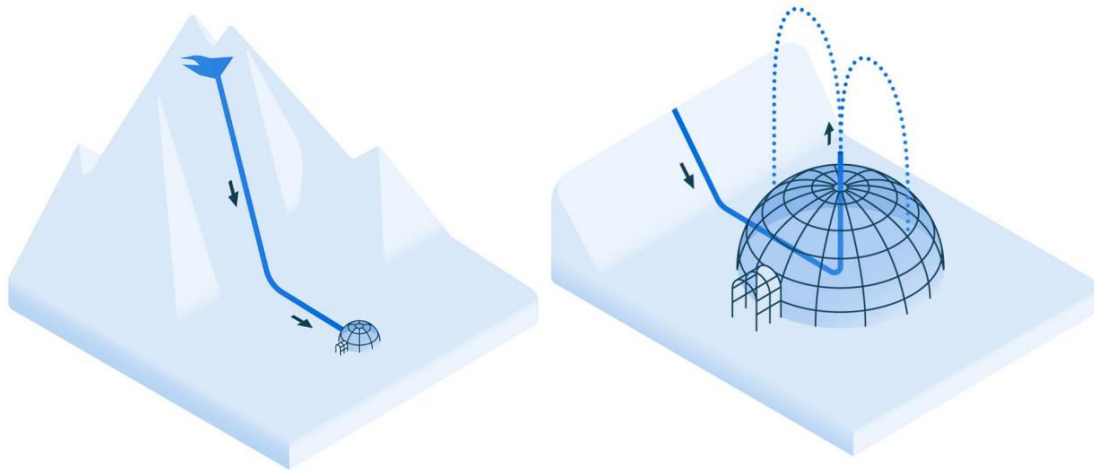


Figura 5.19: Esquema de ruta de suministro de agua.
(Fuente: Ravibhanu & Christy, 2018)



Figura 5.20: Instalación de tubería de suministro de agua en Ladakh.
(Fuente: Ravibhanu & Christy, 2018)

A continuación, se muestra la tabla 5.10 que señala los principales materiales considerados para la ruta de suministro de agua para el reservorio de hielo artificial y su respectivo peso aproximado para ser considerado en el traslado de los materiales a la zona de estudio.

Tabla 5.10: Materiales de ruta de suministro.

Materiales estructurales	Unidades	m	Kg
Tubería polietileno 75 mm	-	3388	3388
Copla compresión polietileno 75mm	34	-	40
Válvulas de paso 75 mm	2	-	-

5.3.4 Operación y mantenimiento

La operación del reservorio de hielo artificial consiste principalmente en la apertura de la válvula en la tubería principal que baja desde la fuente de agua instalada, permitiendo el acceso del agua a la estupa, esta labor debe realizarse en el periodo del día determinado por el balance de energía superficial, que indica que el agua se congela cuando el flujo es negativo (Balasubramanian et al, 2023), de acuerdo a los resultados obtenidos, esto sucede en el periodo invernal desde junio a

septiembre. Junto a esto, se debe realizar la adición de tuberías PVC hacia el exterior del domo, a medida que el hielo acumulado alcance la altura de la boquilla nebulizadora. Esta labor debe llevarse a cabo aproximadamente una vez al mes, de acuerdo a los antecedentes previos, aunque la frecuencia exacta dependerá de las condiciones climáticas, lo cual está sujeto a variaciones.

La mantención del reservorio de hielo artificial es igualmente crucial, ya que implica la constante supervisión de tuberías y la necesidad de reemplazar componentes que lo ameriten.

La correcta gestión de este sistema no solo optimiza la recolección y almacenamiento de agua, sino que también promueve la sostenibilidad del proyecto (Ravibhanu & Christy, 2018).

Recurso humano

Las actividades de operación y mantenimiento deben ser realizadas por al menos tres operadores en turnos rotativos de 10 días, lo que implica contar con seis operadores contratados por mes durante todo el período de operación. Los requisitos para cada operador incluyen: curso de montañismo básico, técnicas de progresión en hielo, manejo de sistemas de riego, primeros auxilios en áreas remotas, certificación No Footprint y conocimiento del glaciar Juncal Norte. Se ha previsto la instalación de un refugio de montaña provisional para el alojamiento de los operadores, con el equipo de protección personal necesario para trabajar en condiciones extremas. Además, el traslado de los trabajadores desde la ciudad de Los Andes hasta el Parque Andino Juncal será responsabilidad de un conductor profesional, quien utilizará dos vehículos 4x4 adquiridos para el proyecto, con uno de ellos destinado a permanecer en el parque para casos de contingencia en cada turno.

5.4 Estimación de costos de inversión y operación

5.4.1 Costos de inversión.

Tabla 5.11: Costos de inversión [CLP].

Ítem	Unidades por ítem	Valor por unidad \$	Costo total \$
Perfil tubular cuadrado 50x50x2mm x 6m	14	22.490	314.860
Poliétileno transparente Topex 4x5m Standard	1	10.490	10.490
Anticorrosivo blanco brillante 1 Galón 4 en 1 Behr	1	62.990	62.990
Tubo PVC-P Vinilit 25mm x 6m PN-12,5 Cementar	1	3.790	3.790
Tee reducción PVC-S Vinilit 75mm x 50 mm Cementar	1	2.290	2.290
Buje reducción larga PVC-P Vinilit 50mm x 25mm Cementar	1	1.290	1.290
Tapa PVC-S Vinilit 75mm Cementar	1	1.290	1.290
Adhesivo PVC riego azul 240cc	1	6.490	6.490
Válvula bola 25mm PVC Vilinit	1	3.690	3.690

Aspersor de riego agrícola Kuangye 25mm	1	41.225	41.225
Cañería polietileno planza 75mm x 50m	68	198.000	13.464.000
Copla compresión Hdpe 75mm planza polietileno Genérico	34	13.690	465.460
Válvula bola 75mm PVC Connor	2	23.140	46.280
Camioneta Mahindra Pik up 4x4 doble cabina	2	17.000.000	34.000.000
Carpa 2- METER DOME 8 personas The North Face	1	6.199.990	6.199.990
Colchón inflable Intex 1,5 plazas Prestige Downy	3	24.990	74.970
Equipo de protección personal	6	1.000.000	6.000.000
Total			60.699.105

Costos asociados a la construcción por empresa contratista

Tabla 5.12: Costos de construcción [CLP].

ítem	Costo total \$
Labor de montaje de estructura metálica de 12 m ² en áreas remotas con transporte aéreo	10.000.000
Traslado de 3670 kg de materiales de construcción por helicóptero Sikorsky S-61 desde Santiago a Glaciar Juncal Norte, sector Morrenas (1 hora de vuelo aproximadamente)	4.000.000
Total	14.000.000

Costos asociados a la evaluación de impacto ambiental.

Tabla 5.13: Costos de evaluación de impacto ambiental [CLP].

ítem	Costo total \$
Estudio de Impacto Ambiental (EIA)	20.000.000
Total	20.000.000

De acuerdo a la cotización de costos realizada, se estima un total de \$94.699.105 pesos asociados a costos de inversión.

5.4.2 Costos de operación y mantenimiento.

Tabla 5.14: Costos de operación y mantenimiento [CLP].

Operación	Operadores	Sueldo mensual (\$)	Bonos \$ (alimentación)	Periodo total (meses)	Costo total (\$)
-Apertura y cierre de válvulas de paso. -Extensión de tubería PVC. -Reparación de fugas.	6	3.000.000	200.000	4	12.800.000

-Traslado de trabajadores desde ciudad de Los Andes a Parque andino Juncal.	1	600.000	-	4	2.400.000
Combustible de traslado para 300 km por mes	-	-	-	4	160.000
Total	-	-	-	-	15.360.000

De acuerdo a la cotización de costos realizada, se estima un total de \$15.360.000 pesos asociados a costos de operación y mantenimiento.

6 Discusión

6.1 Caracterización meteorológica

Estudios meteorológicos previos en la zona han indicado un aumento en las temperaturas desde 1951 hasta 2004, a pesar de que durante ese período se observaron incrementos en las precipitaciones invernales, también se registró una mayor escorrentía superficial en verano, producto del aumento de deshielos (Masiokas, 2006). Estos resultados se asemejan a las tendencias observadas en el presente estudio, donde entre 2012 y 2024 se identificó un incremento de aproximadamente 1°C en las temperaturas, alcanzando un promedio de $11,6^{\circ}\text{C}$ en verano, lo cual confirma la tendencia histórica de aumento de temperaturas en la región. Entre 1979 y 2006, en esta misma zona de la cordillera, los veranos registraron temperaturas que no superaban los 15°C (Falvey & Garreaud, 2009).

En cuanto a las velocidades del viento, estudios previos reportaron valores promedio de $5,5 [m s^{-1}]$ en distintas épocas del año en esta área (Falvey & Garreaud, 2009), lo cual es similar a los resultados obtenidos en este trabajo, donde los valores promedio se situaron entre 3 y $4,6 [m s^{-1}]$.

Por otro lado, el promedio de radiación solar global estimado para estas latitudes oscila entre 208 y $250 [W m^{-2}]$ (Escobar et al., 2015), valores que están muy por debajo de los obtenidos en este estudio, donde el promedio anual fue de $908 [W m^{-2}]$. Este incremento significativo puede atribuirse a la altitud, que influye directamente en la cantidad de radiación solar captada en comparación con zonas más bajas, ya que factores como la menor presión atmosférica y el mayor albedo de las superficies nevadas intensifican la radiación captada en altura (Cordero et al, 2014). Según las mediciones de los parámetros meteorológicos empleadas para estimar los balances energéticos en estudios previos, se ha optado por utilizar estaciones meteorológicas ubicadas en el mismo sitio de instalación de los reservorios de hielo artificial. Un ejemplo de esto es el trabajo realizado por Balasubramanian et al, (2023), que se basó en datos obtenidos de una estación situada a solo 20 metros de los reservorios de hielo. Esta proximidad garantiza que las mediciones sean representativas de las condiciones específicas del entorno donde se encuentran los reservorios, lo que contribuye a la precisión de los análisis. Sin embargo, la estación meteorológica Los Libertadores se ubica a aproximadamente 14 km del sector de Morrenas, que ha sido seleccionada para la instalación del reservorio de hielo. Esta distancia es comparable a la utilizada en el estudio realizado por Oerlemans et al, (2021), que se basó en datos meteorológicos de dos estaciones situadas a 10 kilómetros del área de investigación, donde se llevó a cabo exitosamente la construcción de varios reservorios de hielo artificial. Esta similitud en las distancias sugiere que la información meteorológica obtenida de la estación Los Libertadores puede ser relevante y aplicable para el diseño y la operación del reservorio en el contexto del valle del glaciar Juncal.

6.2 Flujo de energía

Pese a la disminución considerable de RC_{neta} que se presentó en la superficie con nieve fresca, los resultados de los periodos con balances de energía negativos se mantuvieron constantes, con respecto al balance de energía en la superficie sin nieve. Se considera que estos resultados podrían haber sido diferentes si se hubiera tomado en cuenta una temperatura superficial más baja en condiciones de presencia de nieve. En tales circunstancias, los flujos de calor turbulento sensibles habrían disminuido significativamente, lo que a su vez habría afectado el balance de energía total. Esta variación en la temperatura y la dinámica del calor puede tener un impacto notable en el comportamiento del flujo energético superficial.

En Chile, algunos antecedentes previos de balances de energía superficial en glaciares de similares condiciones indican resultados que se aproximan a los obtenidos en la zona del glaciar Juncal Norte, uno de estos casos es el estudio realizado por Schaefer et al, (2020), que estimó el flujo de energía en el glaciar San Francisco de la región Metropolitana, quien obtuvo valores de RC_{neta} de $137 [W m^{-2}]$, RL_{neta} de $-42 [W m^{-2}]$, $CT(l)$ de $-2 [W m^{-2}]$ y $CT(s)$ de $11 [W m^{-2}]$, en los meses de enero a marzo. Por otra parte la estimación de los flujos de energía realizados por Márquez, (2021) en el glaciar Mocho de la región de Los lagos en el mismo periodo de meses, indica que la RC_{neta} fue de $112 [W m^{-2}]$, la RL_{neta} de $-54 [W m^{-2}]$, el $CT(l)$ de $-6 [W m^{-2}]$ y $CT(s)$ de $121 [W m^{-2}]$. La RC_{neta} obtenida en el glaciar Juncal Norte es considerablemente más alta que la obtenida en el glaciar San Francisco y Mocho, producto que este es el valor obtenido en la peor condición de superficie posible, es decir, que se trabajó bajo un supuesto de albedo con un valor 0,3, mientras que en los estudios de referencias mostrados se utilizaron albedos más altos. Por lo que el valor de RC_{neta} depende directamente del valor de albedo que se utilice. En cuanto a los valores de RL_{neta} obtenidos en el glaciar Juncal, fueron en su mayoría positivos, a diferencia de los obtenidos en los estudios de Schaefer et al, (2020) y Márquez, (2021), ya que estos se trabajaron con un valor de emisividad atmosférica alto y una cubierta total de nubes, para obtener valores límites en la zona, a diferencia de ambos estudios que trabajaron con mediciones empíricas de emisividad, lo cual se allega a un resultado más realista de la zona de estudio. Por otra parte, los valores de los flujos de calor turbulento sensible y latente son similares en los tres casos, siendo el glaciar Mocho el que más se aproxima a los resultados obtenidos en el glaciar Juncal Norte. Es importante señalar que los resultados obtenidos sobre calores turbulentos en este estudio se fundamentan en un supuesto de temperatura superficial. En contraste, los estudios comparativos se llevaron a cabo mediante mediciones empíricas en cada glaciar. A pesar de esta diferencia en los enfoques, se observó una escasa variación en los resultados, lo que sugiere que las condiciones generales y los patrones de comportamiento de los glaciares son consistentes, incluso cuando se utilizan metodologías diferentes.

6.3 Diseño del reservorio de hielo artificial

En proyectos anteriores la mayoría de los reservorios de hielo se han construido en lugares de fácil acceso vehicular, lo que ha facilitado el transporte de materiales y equipos necesarios (Ravibhanu

& Crhisty, 2018; Oerlemans et al, 2021; Balasubramanian et al, 2022;). En contraste, el valle del glaciar Juncal Norte presenta un desafío logístico significativo, ya que los caminos vehiculares solo llegan hasta la entrada del Parque Andino Juncal, que se encuentra a aproximadamente 7 km del sector Morrenas, donde se planea ubicar el reservorio de hielo artificial. Debido a esta limitación de acceso, el traslado de los materiales necesarios para la construcción del reservorio de hielo deberá realizarse por vía aérea. Esta modalidad de transporte, aunque efectiva, representa un aumento considerable en los costos de inversión del proyecto.

Por otro lado, la decisión de utilizar acero en la construcción del reservorio se fundamentó en la necesidad de proporcionar la máxima resistencia a la estructura, considerando las exigentes condiciones climáticas del valle del glaciar Juncal. Los antecedentes de proyectos anteriores indican que se han empleado materiales rudimentarios, como ramas de árboles, en la construcción de reservorios (Ravibhanu & Crhisty, 2018), lo que puede comprometer la durabilidad y la eficacia de la estructura. En contraste, el uso de acero garantiza una mayor robustez y capacidad para soportar las adversidades ambientales, lo que resulta crucial para el éxito.

6.4 Estimación de costos

Los resultados obtenidos en la estimación de costos del proyecto reflejan una visión preliminar del valor necesario para construir un reservorio de hielo artificial en el área del glaciar Juncal Norte. Esta estimación se centra en los costos de inversión más relevantes, incluyendo tanto los gastos iniciales como una estimación de los costos operativos. Se debe destacar que, si bien las labores técnicas involucradas son relativamente básicas, el contexto del proyecto en alta montaña añade un grado de complejidad. Las condiciones extremas de esta zona remota incrementan los riesgos y requieren medidas especiales de seguridad y logística, lo que conlleva un aumento de los costos que deben ser considerados adecuadamente. En definitiva, este valor agregado se debe reflejar en la planificación presupuestaria para asegurar que se cubran todas las contingencias y que se garantice la seguridad de las operaciones. Además, es importante destacar que los reservorios de hielo artificiales construidos hasta la fecha han surgido como soluciones de emergencia en respuesta a condiciones climáticas extremas, como sequías severas en la cordillera del Himalaya. En esa región, los habitantes han implementado estos sistemas utilizando materiales de fácil acceso, tales como ramas de árboles y otros elementos ligeros, para satisfacer sus necesidades urgentes (Clouse, 2016). Sin embargo, este proyecto plantea una aproximación distinta y más robusta en términos de materialidad, con el objetivo de garantizar la durabilidad y seguridad de la estructura, buscando minimizar los riesgos de fatiga estructural y contingencias que podrían poner en peligro a los operadores. Para ello, se propone el uso de materiales más sólidos y resistentes, capaces de soportar tanto las condiciones extremas de la alta montaña como la operación sostenida. Esta diferencia fundamental en la selección de materiales y en los estándares de construcción implica una inversión de capital mayor en comparación con los modelos de reservorios anteriores. La elección de materiales duraderos y un diseño estructural más seguro no solo protege a quienes deben trabajar en el reservorio, sino que también prolongan la vida útil de la infraestructura,

optimizando el retorno de la inversión a largo plazo. Así, aunque los costos de inversión sean superiores, estas mejoras en seguridad y durabilidad justifican la diferencia.

7 Conclusión

Este trabajo tuvo como objetivo proponer la construcción de un reservorio de hielo artificial para el glaciar Juncal Norte, con el propósito de contribuir al abastecimiento hídrico de la cuenca del río Aconcagua. Para esto se llevó a cabo una caracterización meteorológica del Valle Juncal, destacándose los resultados obtenidos durante la temporada de invierno. Se identificaron temperaturas bajo cero, principalmente durante las noches. Una radiación solar mínima de 551 W m^{-2} . Los vientos alcanzaron velocidades de hasta $3,5 \text{ m s}^{-1}$, con una dirección promedio hacia el suroeste. En cuanto a la humedad relativa del aire, los valores se mantuvieron alrededor del 36%. Los balances de energía superficial indican que existe viabilidad técnica para generar y almacenar hielo en el reservorio durante los meses de junio a septiembre. Con base en ello, se diseñó una estructura adecuada en forma de domo geodésico, con una materialidad resistente a las condiciones climáticas de la zona, capaz de almacenar aproximadamente 20 m^3 de agua por temporada. El costo estimado del proyecto considerando los costos de inversión, estudio de impacto ambiental, construcción y operación, es de alrededor de 110 millones de pesos, considerando los costos de operación para una temporada de acumulación de hielo.

Este estudio ofrece una primera aproximación a esta alternativa de almacenamiento hídrico mediante prácticas sostenibles, contribuyendo al avance tecnológico en el manejo hídrico de cuencas y promoviendo métodos que respetan el entorno natural.

Además, se considera que, de implementarse el proyecto a gran escala, podría convertirse en una alternativa relevante para la conservación de glaciares. Una mayor acumulación de hielo anual permitiría reducir las tasas de retroceso glaciar, logrando un balance positivo de masas que, en un escenario ideal, podría incluso alcanzar la neutralidad en el retroceso. No obstante, los costos asociados, considerando las tecnologías disponibles en la actualidad, podrían ser demasiado elevados para una implementación masiva, lo que plantea desafíos financieros significativos para la viabilidad de la iniciativa a gran escala.

8 Referencias bibliográficas

Ames, A., Hastenrath, S. (1996). Diagnosing the imbalance of Glacier Santa Rosa, Cordillera Raura, Perú. *Journal of Glaciology*. 42(141). 212-218.

<https://doi.org/10.3189/S002214300000407X>

Antúnez, A., Mora, D., Felmer, S. (2010). Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el seco. *Inia Tierra Adentro*. 40-43.

https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2014/06/EFICIENCIA_EN_SISTEMAS_DE_RIEGO.pdf

Balasubramanian, S., Hoelzle, M., Lehning, M., Bolívar, J., Wangchuck, S., Oerlemans, J., Keller, F., (2022). Influence of Meteorological Conditions on Artificial Ice Reservoir (Icestupa) Evolution. *Front. Earth Sci.* 9:771342.

<https://doi.org/10.3389/feart.2021.771342>

Balasubramanian, S., Hoelzle, M., Waser, R. (2023). Fountain scheduling strategies for improving water-use efficiency of artificial ice reservoirs (Ice stupas). *Cold regions science and technology ELSEVIER*. 205. 165- 232.

<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103706>

Borg, M. (2016). Unsettling Times: Living with the changing horizons of the Peruvian Andes. *Latin American Perspectives*. 43(4). 73-86.

<https://doi-org.bibliotecadigital.uv.cl/10.1177/0094582X16637867>

Breña, J. (2022). Agua para el bienestar global. *Perspectivas IMTA*. 20. 1-3.

<https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-20>

Cabello, D. (2024). Estrategia de innovación para la región de Valparaíso basada en Políticas Orientadas por Misión: Análisis del SRI y diseño de una propuesta preliminar de política pública para la superación de la escasez hídrica a través de la innovación regional. *Revista Academia & Negocios RAN*. 10(1). 208-216.

<https://doi.org/10.29393/RAN-Prc-5EIDD20005>

Carey, M., Molden, O., Borg, M., Jackson, M., Nolin, A., Mark, B. (2016). Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 350-359.

<https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1243039>

Cervantes, R., Sánchez, J., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J., Locatelli, B., Bonnesoeur, V. (2021). Contribution of high-andean ecosystems in providing the water regulation ecosystem service. *Ecología aplicada*. 20(2). 137-146.

<https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>

Chang, R., College, W. (2002). Química, séptima edición. McGrawHill.

Clarke, R., King, J. (2004). *The atlas of water: Mapping the world's most critical resource*. Earthscan publications Ltd.

Clouse, C. (2017). The Himalayan ice stupa: Ladakh's climate adaptative water cache. *Journal of Architectural Education*. 71(2). 247-251.

<https://doi.org/10.1080/10464883.2017.1340781>

Cordero, R., Seckmeyer, G., Damiani, A., Riechelmann, S., Rayas, J., Labbé, F., Laroze, D. (2014). The world's highest levels of surface UV. *Photochem Photobiol Sci* 13, 70–81.

<https://doi.org/10.1039/c3pp50221j>

Correas-Gonzales, M., Moreiras, S., Jomelli, V., Arnaud-Fassetta, G. (2020). Riesgo de crecida por rompimiento de diques de hielo en la cuenca del Plomo, Andes centrales (33°S): Perspectiva a partir de eventos históricos. *Cuadernos de Investigación Geográfica Geographical Research Letters*. 46(1). 223-249.

<http://doi.org/10.18172/cig.4219>

Cosmos, F. (2009). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)–Versión 2009-2012 Parque Andino Juncal*. Secretaría de la Convención de Ramsar.

<https://biblioteca.cehum.org/bitstream/123456789/922/1/Fundaci%C3%B3n%20Cosmos.%20Ficha%20Informativa%20de%20los%20Humedales%20de%20Ramsar%20%28FIR%29%20%2E%80%93%20Versi%C3%B3n%202009-2012.%20Parque%20Andino%20Juncal.pdf>

Coulson, J., Richardson, J. (1999). Chemical Engineering Volume 1, 6th edition. RP Chhabra.

Crispin, M., Ponce, R.D., Rendon, E., Arias, E., (2023). Modelamiento hidro-económico de los efectos del cambio climático y política en la agricultura andina. *Economía agraria y recursos naturales*, 23(1), 55-87.

<https://doi.org/10.7201/earn.2023.01.03>

Cuffey, K., Paterson, W. (2010). The physics of Glaciers Fourth edition, ELSEVIER.

Dirección General de Aguas. (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares: Una oportunidad para la gestión sustentable del recurso hídrico*. Centro de estudios científicos.

<https://www.glaciologia.cl/estrategianacional.pdf>

Dirección General de Aguas. (2004). *Cuenca del Río Aconcagua: Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Cade-Idepe consultores en ingeniería.

<https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aconcagua.pdf>

Dirección General de Aguas. (17 de septiembre de 2020). *Escasez hídrica en la región de Valparaíso*. <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=677>

Dirección General de Aguas. (30 de agosto de 2021). *Las medidas del Plan sequía*. <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=777>

Dirección General de Aguas. (2022). *Inventario público de Glaciares, actualización 2022*. <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/InventarioGlaciares.aspx>

Dirección general de Aguas. (2022). *Monitoreo de detalle intensivo del glaciar Juncal Norte, región de Valparaíso, macrozona centro, 2021-2022, SIT n°528*. Laboratorio de análisis isotópico de la universidad Andrés Bello. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/server/api/core/bitstreams/5ca195e9-a795-42fc-ad3a-7bd74787bd3e/content>

Dirección Meteorológica de Chile. (2024). *Servicios climáticos*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoEmas>

Escobar, R., Cortés, C., Pino, A., Salgado, M., Pereira, E., Ramos, F., Boland, J., Cardemil, J. (2015). Estimating the potential for solar energy utilization in Chile by satellite-derived data and ground station measurements. *Solar Energy ELSEVIER*. 121, 139-151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.034>

Escenarios hídricos 2030. (2018). *Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile*. <https://escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2020/06/radiografia-del-agua-1.pdf>

Falvey, M., Garreaud, R. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4). <https://doi.org/10.1029/2008JD010519>

Felder, R., Rousseau, R. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos*, tercera edición. Limusa Wiley.

Fernández, B. (2013). *Introducción a la mecánica de fluidos, cuarta edición ampliada*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fernandez, A., Muñoz, A., Gonzales-Reyes, A., Aguilera-Betti, I., Toledo, I., Puchi, P., Sauchyn, D., Crespo, S., Frene, F., Mundo, I., Gonzales, M., Vignola, R. (2018). Dendrohydrology and water

resources management in south-central Chile: lessons from the Río Imperial streamflow reconstruction. *Hidrology and Earth System Sciences*. 22. 2921-2935.

<https://doi.org/10.5194/hess-22-2921-2018>

Fragkou, M., Monsalve-Tapia, T., Pereira-Roa, V., Bolados-Arratia, M. (2022). Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía. Un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile. *EURE (Santiago)*, 48(145). 1-22.

<http://dx.doi.org/10.7764/eure.48.145.04>

Frêne, C., Villarroel, F., Rojas, R., Sanzana, J., González, J., Alarcón, D., Gómez, F., Barra, S. (2022). Escasez de agua en Chiloé: Red Participativa de Agua como solución para el sector rural. *Revista de Geografía Norte Grande*. 82. 375-396.

<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022022000200375>

Garreaud, R., Álvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017). *Hydrology and Earth System Sciences*. 21. 6307-6327.

<https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

Germer, S., Neill, C., Kruscheck, A., Elsenbeer, H. (2010). Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology*. 380. 473-480.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.022>

Grossman, D. (24 de marzo de 2015). Has Himalayan glaciers melt, two towns face the fallout. *Yale environment 360*.

https://e360.yale.edu/features/as_himalayan_glaciers_melt_two_towns_face_the_fallout

(Consultado el 08 de junio de 2024)

Hock, R. (2005). Glacier melt: A review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 29(3), 362-391.

<https://doi.org/10.1191/0309133305pp453ra>

Huintjes, E., Sauter, T., Schröter, B., Maussion, F., Yang, W., Kropáček, J., Buchroithner, M., Scherer, D., Kang, S., Schneider, C. (2018). Evaluation of a Coupled Snow and Energy Balance Model for Zhadang Glacier, Tibetan Plateau, Using Glaciological Measurements and Time-Lapse Photography. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 47(3). 573–590.

<http://dx.doi.org/10.1657/AAAR0014-073>

Incropera, F., DeWitt, D. (1999). Fundamentos de transferencia de calor, 4ta edición. Pearson educación.

Lansberg, P., Markvart, T. (2003). Practical Handbook of Photovoltaics, Fundamentals and Applications. *ELSEVIER*. 123-134.

<https://doi.org/10.1016/B978-185617390-2/50007-6>

Ley 19.300 de 1994. Bases Generales Del Medio Ambiente. 09 de marzo de 1994.

[Ley Chile - Ley 19300 - Biblioteca del Congreso Nacional](#)

Ley 21.455 de 2022. Ley Marco de Cambio Climático. 13 de junio de 2022. D. O. No. 43.757

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286&idParte=10341110&idVersion=2022-06-13>

Liu, L., Zhang, T., Wu, Y., Niu, Z., Wang, Q. (2018). Cloud Effective Emissivity Retrievals Using Combined Ground-Based Infrared Cloud Measuring Instrument and Ceilometer Observations. *Remote Sensing*. 10(12):2033.

<https://doi.org/10.3390/rs10122033>

López, S., Ordoñez, E., Martínez, G., Roybal, J. (2013). Agua: recurso que debemos cuidar. *Cultura Científica Y Tecnológica, sustentabilidad*. 49(10). 74-87.

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/143>

López, L., Cevallos, W. (2019). Aplicación del teorema de Torricelli. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*.

<https://www.eumed.net/rev/oel/2019/01/teorema-torricelli.html>

Lyons, K. (2023) *Engineering ice stupas in response to a melting cryosphere: Questioning the transferability of climate change adaptation strategies*. Kleinman center for energy policy.

<https://kleinmanenergy.upenn.edu/wp-content/uploads/2023/01/KCEP-Digest-Engineering-Ice-Stupas.pdf>

Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Le Quesne, C., Aravena, J. (2006). Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of climate*. 19(24), 6334-6352.

<https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>

Maheshwary, S., Raspall, F., Verma, S. (2019). Optimized structure for Ice Stupa - architecture that supports nature to resist climate change. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. 1-8.

<https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2019/00002019/00000008/art00006#trend-md-suggestions>

Márquez, f. (2021). *Aplicación del modelo COSIPY para el cálculo del balance de masa superficial del Glaciar Mocho-Choshuenco*. [Tesis de Título profesional, Universidad Austral de Chile].

<https://glaciouach.cl/wp-content/uploads/2022/08/FelipeMarquez.pdf>

Mendoza, V., Villanueva, E., Garduño, R., Sánchez-Meneses, O. (2017). Atmospheric emissivity with clear sky computed by E-Trans/HITRAN, *ELSEVIER Atmospheric Environment*. 155, 174-188.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.048>

Mena, M., Bustillos, A., Eberle, C., Schneiderbauer, S. (2023). *Technical report: Mountain glaciers melting*. United Nations University UNU-ESH.

[https://s3.eu-central-](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/interconnectedrisks/reports/2023/TR_231115_Mountain.pdf)

[1.amazonaws.com/interconnectedrisks/reports/2023/TR_231115_Mountain.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/interconnectedrisks/reports/2023/TR_231115_Mountain.pdf)

Morales, A., Bru, C. (1984). Disponibilidades hídricas y modernas técnicas de embalse en el campo de Alicante: *Investigaciones Geográficas (esp)*. 2.

<https://www.redalyc.org/pdf/176/17654229002.pdf>

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*, sexta edición.

Muratti, G. (2016). *Los hielos olvidados*, segunda edición.

Naddaf, M. (21 de marzo de 2023). The world faces a water crisis 4 powerful charts show how the first UN conference on water in nearly 50 years make a difference? Hundreds of millions of people lack access to safe water and sanitation. Will the first UN conference on water in nearly 50 years make a difference. *Nature*.

<https://www-nature-com.bibliotecadigital.uv.cl/articles/d41586-023-00842-3>

(Consultado el 08 de junio de 2024)

Nüsser, M., Dame, J., Kraus, B., Baghel, R., Schmidt. (2019). Socio-hydrology of “artificial glaciers” in Ladakh, India: assessing adaptive strategies in a changing cryosphere. *Regional Environmental Change*. 19. 1327–1337.

<https://doi.org/10.1007/s10113-018-1372-0>

Nüsser, M., Dame, J., Parveen, S., Kraus, B., Baghel, R., Schmidt, S. (2019b) Cryosphere-Fed Irrigation Networks in the Northwestern Himalaya: Precarious Livelihoods and Adaptation Strategies Under the Impact of Climate Change, *Mountain Research and Development*. 39(2). 1-11.

<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00072.1>

Oerlemans, J., Balasubramanian, S., Clavuot, C., Keller, F. (2021). Brief communication: Growth and decay of an ice stupa in alpine conditions – a simple model driven by energy-flux observations over a glacier surface. *European Geosciences Union EGU*. 15(6). 3007-3012.

<https://doi.org/10.5194/tc-15-3007-2021>

Organización de las Naciones Unidas ONU (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del*

agua. Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos WWDR, UNESCO.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494/PDF/261494spa.pdf.multi>

Perry, R., Green, D. (2021). *Manual del ingeniero químico, séptima edición*. Universidad Autónoma de Madrid.

Picard, A., Davis, R., Glace, M., Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air CIPM. *Metrología*. 45. 149-155.

<https://www.nist.gov/system/files/documents/calibrations/CIPM-2007.pdf>

Qiu, J., Yurchyshyn, V., Hickey, J., Chu, M., Kolve, E., Marrón CT., Koonin, SE. (2001). Earthshine observations of the Earth's reflectance. *AGU Advancing Earth and Space Sciences*. 28(9). 1671-1674.

<https://doi.org/10.1029/2000GL012580>

Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres B., Ceballos, J., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménegoz, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., Wagnon, P. (2013) Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*. 7, 81-102.

<https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>

Ravibhanu, A., Christy, I. (2018). *Modeling Ice stupa via architectural of pagoda: the art of building artificial glaciers*. Eco Astronomy Sri Lanka.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19422.38728>

Rojas, M., Gallardo, J., Martinez, A. (2012) Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia: *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 15(1). 16-23.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v15n1/v15n1a2.pdf>

Rodríguez, C., García, B., Pinto, C., Sánchez, R., Serrano, J., Leiva, E. (2022). Water Context in Latin America and the Caribbean: Distribution, Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation. *Water*. 14(21). 3589.

<https://doi.org/10.3390/w14213589>

Serway, R., Jewett, J. (2008) *Física para ciencias e ingeniería, Vol 1, 7ma edición*. Cengage Learning.

Schaefer, M., Fonseca-Gallardo, D., Farías-Barahona, D., Casassa, G. (2020). Surface energy fluxes on Chilean glaciers: measurements and models. *The Cryosphere EGU*, 14.

<https://doi.org/10.5194/tc-14-2545-2020>

Schmidt, S., & Nüsser, M. (2012). Changes of High-Altitude Glaciers from 1969 to 2010 in the Trans-Himalayan Kang Yatze Massif, Ladakh, Northwest India. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 44(1). 107–121.

<https://doi.org/10.1657/1938-4246-44.1.107>

Schoolmeester, T., Johansen, K., Alfthan, B., Baker E., Hesping, M., Verbist, K. (2018). *Atlas de glaciares y aguas andinos: El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. UNESCO, Flandes en apoyo a la ciencia (FUST).

Skvarca, P., De Angelis, H., Ermolin, E. (2004). Mass balance of 'Glaciar Bahía del Diablo', Vega Island, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*. 39. 209-213.

<https://doi.org/10.3189/172756404781814672>

Smith, J., Van Ness, H., Abbott, M. (1997). Introducción a la termodinámica en ingeniería química, quinta edición. McGrawHill.

Souvignet, M., Oyarzún, R., Verbist, K. M. J., Gaese, H., & Heinrich, J. (2012). Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29–32°S): water resources implications for a fragile Andean region. *Hydrological Sciences Journal*, 57(3), 479–495.

<https://doi-org.bibliotecadigital.uv.cl/10.1080/02626667.2012.665607>

Taveirne, M., Ekemar, L., González, B., Axelsson J., Zhang, Q. (2021). Mass Balance Sensitivity and Future Projections of Rabots Glaciär, Sweden. *Climate*. 9(8). 126.

<https://doi.org/10.3390/cli9080126>

Tallman, P., Piland, N., Villarmarzo, M., Victoria-Lazy, L., Valdés-Velásquez, A., (2024). Waterscapes meet socio-ecological models: A relational framework to examine water insecurity and human health and well-being: *People and Nature*, 6, 1036-1047.

<https://doi-org.bibliotecadigital.uv.cl/10.1002/pan3.10635>

Temme, F., Farías-Barahona, D., Seehaus, T., Jaña, R., Arigony-Neto, J., Gonzalez, I., Arndt, A., Sauter, T., Schneider, C., and Fürst, J. (2023). Strategies for regional modeling of surface mass balance at the Monte Sarmiento Massif, Tierra del Fuego, *The Cryosphere EGU*. 17, 2343–2365.

<https://doi.org/10.5194/tc-17-2343-2023>

Xu, J., Grumbine, R., Shrestha, A., Eriksson, M., Yang, X., Wang, Y., Wilkes, A. (2009). The Melting Himalayas: Cascading Effects of Climate Change on Water, Biodiversity, and Livelihoods. *Conservation Biology*. 23(3). 520-530.

<https://doi-org.bibliotecadigital.uv.cl/10.1111/j.1523-1739.2009.01237.x>