



GOBIERNO DE CHILE

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

MODELACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y DESCARGA DE AGUA EN GLACIARES
DE CHILE CENTRAL

REALIZADO POR:

UNIVERSIDAD DE CHILE,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE

S.I.T. Nº307

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministra de Obras Públicas

Abogada Sra. Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas

Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe Departamento de Glaciología

Geógrafo PhD. Sr. Gonzalo Barcaza Sepúlveda

Inspector Fiscal

Geóloga M^a Belén Varela Mattatall

UNIVERSIDAD DE CHILE

Jefe de Proyecto

Ingeniero Civil PhD James McPhee Torres

Profesionales

Ingeniero Civil PhD Francesca Pellicciotti

Ingeniero Civil MSc Maximiliano Rodríguez Moreno

Resumen

El recurso hídrico es de suma importancia para una serie de actividades humanas en la zona de Chile central, por lo que es imperativo estudiar cuál es su procedencia y cómo evoluciona a lo largo de la temporada. Los glaciares son los proveedores de parte del caudal que nace en la Cordillera de Los Andes, por lo que este proyecto busca aumentar el conocimiento en cuanto a la evolución de las masas de hielo en época de deshielo.

Se instalaron en primavera 3 estaciones meteorológicas en 2 glaciares de la zona central. Una estación meteorológica de 3 niveles y una estación meteorológica portátil en el Glaciar San Francisco, y una estación meteorológica portátil en el Glaciar Pirámide. Se realizó la mantención de otras 2 estaciones meteorológicas, como lo fueron la estación meteorológica Glaciar San Francisco en aguas Panimávidas y la estación meteorológica de 3 niveles ubicada en el Glaciar Pirámide, ambas instaladas anteriormente por la Dirección General de Aguas.

Por otra parte, son importantes los caudales que nacen de estas cuencas para realizar los estudios de balance de masa. Por tal motivo se instaló una estación fluviométrica en el Estero El Yeso en las cercanías del Glaciar Pirámide y se hizo la mantención de la estación fluviométrica en el Estero Morales.

Con los datos obtenidos de estas estaciones, más la información obtenida de imágenes satelitales y balizas, es que se realizaron los estudios de reconstrucción del equivalente en agua de nieve y el balance de masa.

Los resultados muestran que entre el periodo desde el 31 de Octubre y 10 de Diciembre el Glaciar San Francisco presentó una acumulación de alrededor 3 millones de metros cúbico, mientras que el Glaciar Pirámide registró un derretimiento cercano a los 3 millones de metros cúbicos.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos del Estudio.....	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos.....	2
2.	Zona de Estudio	3
2.1	Glaciar San Francisco, Cuenca Río Maipo	3
2.2	Glaciar Pirámide, Cuenca Río Maipo.....	3
3.	Propuesta estandarización estaciones.....	5
3.1	Variables e instrumentos	5
3.2	Estaciones de monitoreo automáticas.....	15
3.2.1	Estación meteorológica portátil.....	15
3.2.2	Estación meteorológica fija	16
3.3	Zona de posicionamiento y alturas de sensores en una AWS	18
3.4	Intervalos y frecuencia de medición	20
3.5	Experiencias anteriores.....	21
4.	Actividades en terreno.....	22
4.1	Instalación y mantención de estaciones meteorológicas.....	22
4.2	Secciones de aforo.....	23
4.3	Datos recolectados.....	28
4.3.1	Estaciones en glaciar Pirámide.....	28
4.3.2	Estaciones, calicata y balizas en glaciar San Francisco	29
4.3.3	Estaciones fluviométricas	32
5.	Metodología para el modelamiento de balance de masa en glaciares	36
5.1	Modelos de derretimiento	36
5.1.1	Factor Grado-Día	36

5.1.2	Índice de Temperatura Mejorado	37
5.2	Inicialización de los modelos de derretimiento: estimación de la acumulación nival inicial	37
5.2.1	Reconstrucción grado - día.....	38
5.2.2	Reconstrucción con Imágenes Satelitales.....	38
5.3	Modelo balance de masa y escorrentía.....	40
6.	Resultados.....	44
6.1	Modelos de derretimiento	44
6.2	Estimación acumulación inicio temporada	45
6.2.1	Reconstrucción glaciar San Francisco.....	45
6.2.2	Reconstrucción glaciar Pirámide.....	47
6.3	Modelo balance de masa y escorrentía TOPKAPI	54
6.4	Balance de masa en glaciares del periodo en estudio.....	57
6.4.1	Glaciar Pirámide	58
6.4.2	Glaciar San Francisco	58
6.5	Análisis de la respuesta de glaciares frente a condiciones climáticas actuales.....	59
7.	Conclusiones.....	64
8.	Bibliografía	67
ANEXOS	.....	70
Anexo A	.....	71
Anexo B	.....	74
Anexo C	.....	77
Anexo D	.....	78

Índice de Figuras

Figura 2-1: Zona de estudio con estaciones presentes revisadas o instaladas por la Universidad de Chile. Las estaciones meteorológicas se clasifican en AWS (portátil), E3N (3 niveles) y EM (convencional). Las estaciones fluviométricas se señalan con FL. La denominación PIR señala al glaciar Pirámide y SF al glaciar San Francisco, mientras que TP, PV y EM hacen referencia a Termas del Plomo, Aguas Panimávidas y Estero Morales respectivamente.....	4
Figura 3-1: Pantalla protectora para el sensor de temperatura y humedad relativa	7
Figura 3-2: Sensor de temperatura y humedad relativa	7
Figura 3-3: Piranómetros.....	8
Figura 3-4: Instrumento para la medición del viento	9
Figura 3-5: Versión del pluviómetro OTT	11
Figura 3-6: Protección para el viento en pluviómetro.....	12
Figura 3-7: Sensor SSG Snow Scale.....	14
Figura 3-8: Estación meteorológica automática sobre superficie de glaciar.....	16
Figura 3-9: Esquema estación meteorológica propuesto por la Universidad de Chile..	17
Figura 4-1: Modificación de instrumentos en Estación en Aguas Panimávida.....	23
Figura 4-2: Estaciones meteorológicas sobre glaciares. (A) AWS sobre glaciar San Francisco, (B) AWS sobre glaciar Pirámide, (C) estación de 3 niveles en glaciar San Francisco, (D) barra de sujeción de estación de 3 niveles, (E) estación de 3 niveles en glaciar Pirámide y (F) operaciones de instalación de estaciones.....	25
Figura 4-3: Ubicación de zonas de aforos en Estero El Yeso. En B1-B2-B3 sitios de aforo en cercanías de Termas del Plomo y en B4 antes de glaciar Pirámide. El punto señala la ubicación de la estación fluviométrica. Google (2012). Foto de satélite del Termas del Plomo. Consulta: 27 diciembre 2012, http://earth.google.com	26
Figura 4-4: Ubicación de zonas de aforo en Estero Morales. En A1, A2 y A3 los lugares de aforo cerca de la Estación fluviométrica en Estero Morales. El punto señala la ubicación de la estación fluviométrica. Google (2012). Foto de satélite de Baños Morales. Consulta:27 diciembre 2012, http://earth.google.com	26
Figura 4-5: Archivo fotográfico estaciones de aforo.....	27
Figura 4-6: Estación meteorológica de 3 niveles en glaciar Pirámide en el 14-11-2012.....	28
Figura 4-7: Variación de la radiación de onda corta (OC) tomada por el radiómetro en estación meteorológica de 3 niveles en glaciar Pirámide.....	29

Figura 4-8: Esquema de balizas, pozos y estaciones sobre glaciar San Francisco. B1, B2, B3, B4 y B5 hace referencia a las balizas especificadas en la Tabla 4-3. GSF hace mención al glaciar San Francisco. Por su parte AWS y 3N muestran las estaciones meteorológicas. Google (2012). Foto de satélite del Glaciar San Francisco. Consulta: 27 diciembre 2012, http://earth.google.com	30
Figura 4-9: Balizas instaladas en glaciar San Francisco.....	30
Figura 4-10: Avalancha producida en el glaciar San Francisco el día 25-10-2012	31
Figura 4-11: Curva de calibración en Estero El Yeso en Termas del plomo	33
Figura 4-12: Caudal medio diario Estero Morales en puente Conaf	35
Figura 5-1: Esquema de reconstrucción del equivalente en agua de nieve.....	39
Figura 5-2: Esquema de estradas y salidas del modelo TOPKAPI.....	42
Figura 6-1: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve para el glaciar San Francisco en zona alta (3800 msnm).....	46
Figura 6-2: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve para el glaciar San Francisco en zona media (3500 msnm)	46
Figura 6-3: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve utilizando el caudal de la estación fluviométrica del Estero El Yeso en Termas del Plomo.....	48
Figura 6-4: Balance de energía en glaciar Pirámide. OC y OL se refieren a onda corta y onda larga respectivamente.	50
Figura 6-5: Máxima extensión de la cobertura nival para el glaciar Pirámide. El color celeste indica un valor 1 con presencia de nieve y el color negro un valor 0 con ausencia de nieve.	51
Figura 6-6: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve para el glaciar Pirámide. Los resultados muestran en escala de colores la acumulación de equivalente en agua en mm para la superficie del glaciar.	52
Figura 6-7: Distintas variables de las semanas de modelación con imágenes MODIS .	53
Figura 6-8: Derretimiento acumulado del equivalente en agua para la parte media del glaciar San Francisco, en la baliza situada a 3320 msnm.	56
Figura 6-9: Derretimiento acumulado del equivalente en agua para la parte alta del glaciar San Francisco, en la baliza situada a 3677 msnm.	56
Figura 6-10: Caudal total de derretimiento horario modelado por TOPKAPI para el glaciar San Francisco.	57
Figura 6-11: Variación de radiación y temperatura en glaciar San Francisco.....	61
Figura 6-12: Variación de la humedad relativa y velocidad del viento en el glaciar San Francisco.....	61

Figura 6-13: Variación de radiación y temperatura en glaciar Pirámide.....	62
Figura 6-14: Variación de la humedad relativa y velocidad del viento en el glaciar Pirámide.....	62
Figura A-1: Soporte de apilamiento para incrementar su rango de operación	71
Figura A-2: El BP24 puede suministrar de energía un sistema que tiene requerimientos sobre el promedio.....	72
Figura A-3: Caja del PS24, junto al regulador CH100, cables de poder y el soporte de batería. Esta última debe ser instalada por el usuario.	72
Figura A-4: El PS200 y CH200 tienen dos terminales de entrada que permiten simultáneamente la conexión de 2 fuentes de carga.	73
Figura A-5: Panel solar de alimentación a la estación meteorológica	73
Figura B-1: Esquema conceptual Estación Meteorológica del Embalse Hornitos	76

Índice de tablas

Tabla 3-1: Intervalos y frecuencias de muestreo por instrumento	21
Tabla 4-1: Resumen de estaciones incluidas en este estudio	22
Tabla 4-2: Aforos realizados en las cuencas de estudio.....	26
Tabla 4-3: Balizas posicionadas en glaciar San Francisco	29
Tabla 4-4: Altura de Balizas en Diciembre de 2012	31
Tabla 4-5: Calicata efectuada en glaciar San Francisco	32
Tabla 6-1: Parámetros modelos de derretimiento glaciar San Francisco	44
Tabla 6-2: Parámetros modelos de derretimiento glaciar Pirámide	45
Tabla 6-3: Información de la reconstrucción semanal	49
Tabla 6-4: Parámetros ocupados en el modelo TOPKAPI	55
Tabla B-1: Instrumentos utilizados en Pellicciotti et al. (2007)	74
Tabla C-1: Instrumentación de estación AWS	77
Tabla C-2: Modelos, marcas y precisión de los instrumentos de la AWS	77
Tabla D-1: Datos de temperatura diaria en estaciones meteorológicas	78
Tabla D-2: Continuación de Tabla D-1	79
Tabla D-3: Datos de radiación diaria en estaciones meteorológicas en W/m^2	80
Tabla D-4: Continuación de Tabla D-3.....	81

1. Introducción

1.1 Introducción

En la cordillera de Los Andes de Chile central, el derretimiento de glaciares, junto con el manto de nieve estacional, representan el grueso del aporte de recursos hídricos para actividades productivas, consumo humano y preservación de ecosistemas. Sin embargo, se tiene poca información sobre i) la contribución real de los glaciares a la escorrentía total, ii) el rol que estas masas de hielo juegan en el ciclo hidrológico a distintas escalas espaciales y temporales, iii) su respuesta a variaciones climáticas, y iv) su interacción con el manto de nieve estacional (Favier et al., 2008; Gascoin et al., 2011).

Existe alguna evidencia de contracción de glaciares en Chile central (Rivera et al., 2002, Bown et al, 2008; Rabatel et al., 2011). Sin embargo, no se tienen bases de datos sistemáticas de observaciones de procesos glaciológicos, lo que redundaría en un bajo nivel de conocimiento sobre los fenómenos clave que gobiernan la evolución de glaciares, así como una baja capacidad para reconstruir cambios pasados y para proyectar a futuro los posibles escenarios de evolución. Solamente para el glaciar Echaurren se tiene un registro suficientemente largo de balance de masas (Peña et al., 1978)

Gascoin et al. (2011) argumentan que la discrepancia entre la evidencia de retroceso glaciar y los vacíos de conocimiento relativos al rol de glaciares en el ciclo hidrológico puede deberse a que mientras los cambios glaciares pueden inferirse a partir de datos obtenidos remotamente (fotografías, imágenes satelitales), los estudios hidrológicos requieren modelos complejos del comportamiento glaciar. Estos modelos se basan en el conocimiento de procesos y deben alimentarse con información de terreno que muchas veces es difícil de obtener en ambientes remotos. De hecho, existen pocos estudios que cuantifiquen la contribución de escorrentía glaciar al total del caudal en zonas andinas (Gascoin et al., 2011; Ragettli and Pellicciotti, 2011). De éstos, sólo el segundo es un estudio de modelamiento, por lo tanto, para mejorar el entendimiento con respecto a la dinámica de los glaciares, mayores esfuerzos deben llevarse a cabo. Hasta la fecha, no existen estudios detallados que estimen, cuantitativamente, la posible evolución de los caudales glaciales en el futuro.

Este informe se refiere a los resultados de un estudio encargado por la Dirección General de Aguas (DGA) a la Universidad de Chile (UCH) que busca primordialmente sentar las bases para un esfuerzo de modelamiento del balance de masas de glaciares en cuencas de alta cordillera en Chile Central. A continuación se presentan los resultados asociados a los objetivos específicos del trabajo, que se pueden agrupar en: diseño e instalación de estaciones de medición, monitoreo glacial, y modelamiento de balance de masas.

1.2 Objetivos del Estudio

1.2.1 Objetivo General

Este trabajo busca sentar las bases para un programa de monitoreo sistemático de los glaciares en la zona central de Chile, recolectando datos específicos que permitan calibrar y validar modelos matemáticos hidro-glaciológicos con el fin de evaluar la evolución futura de los aportes hídricos de estos glaciares a la escorrentía en los ríos de la zona. Por lo tanto, este trabajo contempla una combinación de *monitoreo* y *modelamiento*, de glaciares en Chile central.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Formular una propuesta de estandarización de estaciones de monitoreo hidrometeorológico con énfasis en el seguimiento del balance de masas glacial en Chile Central
- Realizar un estudio comparativo del derretimiento de glaciares de distintas características superficiales, ya sean superficies descubiertas o con detritos, y tamaño, y estimar su aporte hídrico a la escorrentía superficial.
- Realizar mediciones de balance de energía superficial para conocer las transferencias de energía entre superficies glaciares y la atmósfera.
- Analizar modelos de ablación de distinta complejidad a partir de datos de temperatura del aire, radiación solar y balance de energía.
- Cuantificar el aporte hídrico de los glaciares a la escorrentía superficial durante el período estival.

2. Zona de Estudio

Este estudio se enfoca en glaciares de la hoya alta del río Maipo (Figura 2-1), que concentra una fracción significativa de la población del país y por lo tanto reviste importancia estratégica. Se realiza un estudio comparativo en dos glaciares de distintas características superficiales, es decir uno de tipo descubierto otro con cubierta de detritos. Se estima que los glaciares cubiertos de detritos representan una masa de hielo comparable a la de los glaciares descubiertos a nivel regional, por lo que reviste especial importancia desarrollar las bases de conocimiento necesarias para entender la evolución futura de este tipo de cuerpos.

2.1 Glaciar San Francisco, Cuenca Río Maipo

El glaciar San Francisco, Cuenca del Río Maipo, se encuentra ubicado en la sub-cuenca del río Volcán, en las coordenadas $33^{\circ} 44' 59''$ S - $70^{\circ} 07' 25''$ W, en un rango de elevaciones aproximado de 2.550 – 3.950 m.s.n.m. Específicamente, el glaciar se encuentra ubicado al interior del parque Monumento Natural El Morado, administrado por CONAF, a 70 km al SE de Santiago.

Según el levantamiento del tipo LIDAR efectuado por la DGA en abril de 2009, la superficie del glaciar es de 1,88 km². Ese mismo año mediante radio-eco sondaje se obtuvo el espesor del glaciar, el que fluctúa entre los 58 m y 120 m, según se trate de la zona alta o baja del glaciar.

2.2 Glaciar Pirámide, Cuenca Río Maipo

El glaciar Pirámide corresponde a un glaciar cubierto que presenta un área de 4,88 km² y una elevación media de 3.550 m.s.n.m. (rango de elevaciones entre 3.200 y 3.900 m.s.n.m). Está ubicado en las nacientes del río Yeso en las coordenadas $33^{\circ} 34' 7''$ S - $75^{\circ} 53' 25''$ W, Cuenca del río Maipo, 70 km al SE de la ciudad de Santiago.

Corresponde a uno de los glaciares de la cuenca del río Yeso que aportan sus deshielos al embalse El Yeso, principal reserva de abastecimiento de agua potable de la región

Metropolitana. En primavera y verano, el glaciar pirámide cuenta con acceso terrestre apropiado.

En la Figura 2-1 se aprecian las cuencas en estudio y los glaciares que se encuentran dentro de ellas.

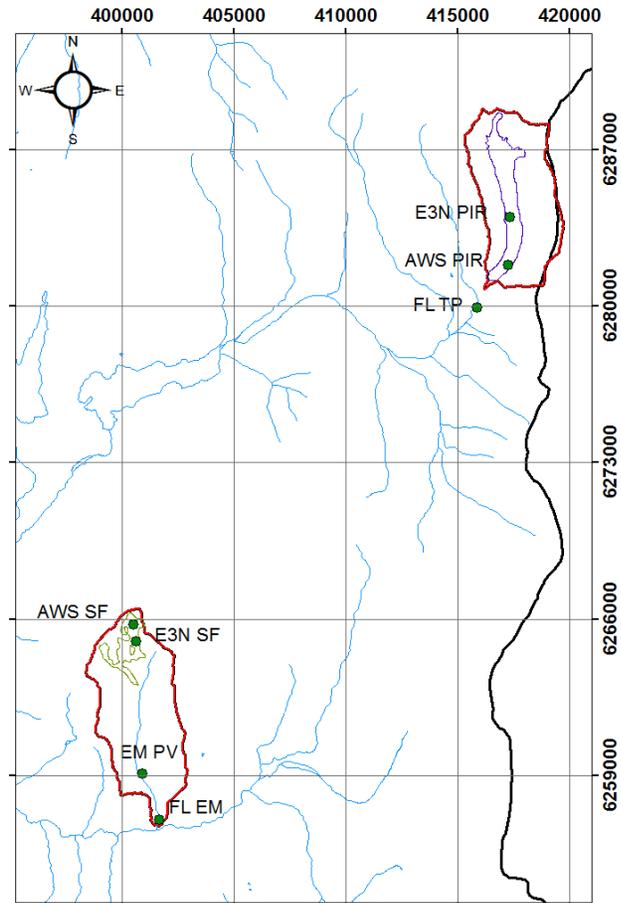


Figura 2-1: Zona de estudio con estaciones presentes revisadas o instaladas por la Universidad de Chile. Las estaciones meteorológicas se clasifican en AWS (portátil), E3N (3 niveles) y EM (convencional). Las estaciones fluviométricas se señalan con FL. La denominación PIR señala al glaciar Pirámide y SF al glaciar San Francisco, mientras que TP, PV y EM hacen referencia a Termas del Plomo, Aguas Panimávidas y Estero Morales respectivamente.

3. Propuesta estandarización estaciones

La puesta en marcha de estaciones meteorológicas en zonas altas de la Cordillera de Los Andes es de fundamental importancia puesto que un paso clave en el entendimiento de los impactos del cambio climático en glaciares es el estudio del balance de masa en la interfaz glaciar-atmósfera y de los procesos de ablación (Pellicciotti et al., 2007)

Esta sección establece las bases para la correcta implementación de equipos de medición en las cuencas en estudio. En este sentido es preciso determinar su ubicación espacial y el tipo de equipo.

Esta sección se refiere a dos tipos de estaciones meteorológicas. Las primeras son del tipo fijas, ubicadas en las cercanías de los glaciares en estudio y de carácter permanente con mediciones durante todo el año. Las segundas corresponden a equipos de medición portátil y temporal, que se ubican sobre los glaciares en campañas de medición *ad-hoc* (usualmente en verano), y que son retiradas una vez finalizada la campaña.

Pellicciotti et al. (2007) ocupan estaciones meteorológicas automáticas portátiles (AWS), la cuales pueden ser definidas como "estaciones meteorológicas en las cuales las observaciones son hechas y transmitidas automáticamente" (OMM¹, 1992a). Estas son de utilidad donde las condiciones de acceso al punto de medición son difíciles y se desea una medición continua.

3.1 Variables e instrumentos

Una estación ubicada en la alta cordillera de los Andes debiera incluir instrumentos para la medición de temperatura del aire, radiación solar incidente y reflejada, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, precipitación tanto sólida como líquida y acumulación de nieve. A continuación se detallan las variables y los instrumentos que sirven para su medición.

¹ OMM: Organización meteorológica mundial

A. Temperatura y humedad relativa del aire

Los tipos de termómetros más comunes usados en los AWS son aquellos que tienen una resistencia de metal. Las resistencias de platino (100Ω a 0°C) muestran muy buena estabilidad a largo plazo y se pueden considerar como los sensores tipos preferidos.

Es de gran importancia disponer de la protección adecuada para el sensor que mide la temperatura contra los efectos de la radiación. Los protectores de radiación ajustados al tamaño del sensor se usan ampliamente y reemplazan las pantallas de ventilación Stevenson en una AWS. Para mediciones precisas, los protectores de medición debieran ser artificialmente aspirados con un ventilador de cerca de 3m/s , pero se debe tener la precaución de prever la entrada de aerosoles y llovizna para evitar los efectos sobre el bulbo húmedo.

Los sensores para la medición directa de la humedad relativa son ampliamente empleados en las AWSs, aunque sean susceptibles de un pobre rendimiento en presencia de contaminantes y que se requieran filtros para una protección especial. Comparaciones entre equipos revelan que se debe aplicar correcciones adicionales para mediciones bajo los 0°C , incluso si los sensores incorporan circuitos de compensación de temperatura y si ocurren problemas de histéresis cuando se exponen a condiciones de saturación (EPA, 2000)².

Medidores del punto de rocío, tales como el sensor de litio-cloruro saturado y el sensor de espejo enfriado, son también usados en un AWS. El mayor inconveniente de los sensores de litio-cloruro es su sensibilidad a fallas de poder. Estos requieren intervenciones en terreno después de una interrupción en la energía. El medidor de punto de rocío óptico es considerado como la técnica más prometedora, pero se requieren más investigaciones de modo de desarrollar un dispositivo automático de limpieza (EPA, 2000).

Tal como para las mediciones de temperatura, todos los tipos de sensores de humedad tienen que ser instalados dentro de protectores de radiación. Se debe dar preferencia a la aspiración o buena ventilación de los protectores. Estos pueden ser similares a los usados para las mediciones de temperatura. Debe considerarse que se pueden obtener importantes errores cuando existe una mala aspiración o hay problemas de limpieza.

² EPA: Environmental Protection Agency

Un sensor de temperatura posible de utilizar es el modelo HMP60, el cual mide rangos de temperatura de aire entre -40°C y 60°C y la humedad relativa entre 0 y 100% (Figura 3-2).

Cuando existe una alta exposición al sol el sensor debe ser protegido de la radiación, típicamente mediante una pantalla similar a la 41303-5A. Esta es una protección ventilada naturalmente de 6 platos (Véase la Figura 3-1).

La medición de la temperatura del aire se hace mediante un sensor de platino y su rango de medición es entre los -40°C y los 60°C , mientras que su precisión es de $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$.



Figura 3-2: Sensor de temperatura y humedad relativa

Figura 3-1: Pantalla protectora para el sensor de temperatura y humedad relativa

Por su parte, el sensor de humedad relativa mide de un rango de 0 a 100% en condiciones sin condensación. Su precisión varía de acuerdo a la temperatura y al rango en que se está midiendo la humedad relativa, llegando a ser el máximo error de un 7% cuando la temperatura está entre los -40°C a 0°C y el rango de humedad relativa está entre 90 y 100%.

B. Radiación solar

La radiación solar en el espectro visible se mide mediante piranómetros (Figura 3-3). Uno útil para las mediciones en terreno es el modelo LI 200SA. Bajo la mayoría de las condiciones de luz de día natural el error es menos de un 5% y no presenta errores

inducidos por la orientación. La temperatura de operación es sobre los -40°C y bajo los 65°C .

La mayoría de los sensores usados para estas mediciones en las estaciones convencionales pueden ser conectados a un sistema automático. El principal problema técnico es que estos sensores son usualmente dispositivos análogos que producen voltajes muy pequeños y continuamente variables como salida. Estos voltajes son muy vulnerables en cuanto a la interferencia electromagnética sobre los cables que llevan la señal. La depositación de polvo en el domo de los piranómetros sin limpiar provoca una pérdida de un 2% en la precisión (excluyendo días con escarcha o rocío). Como resultado, el uso efectivo de instrumentos de radiación en sitios de baja supervisión es difícil de llevar a cabo. Una precisión de observación alcanzable es del orden de 5% (en mediciones medias diarias).



Figura 3-3: Piranómetros

C. Viento

El uso de anemómetros de copa o de hélice con salidas de pulso o frecuencia está muy aceptada y no presenta otros problemas particulares a los asociados con la formación de hielo en condiciones atmosféricas severas (Figura 3-4). Esta complicación puede ser sobrellevada calentando el sensor donde la formación de hielo es moderada, pero esto resulta en un significativo aumento en el consumo de energía. Es recomendable que, para nuevos anemómetros de copa o hélice, el largo de respuesta debería ser menor que 5 m y que, en los sistemas digitales nuevos, la frecuencia del muestreo debe ser compatible

con el filtrado aplicado. En dispositivos de conteo, esto implica que el número de pulsos sobre un intervalo de conteo es considerado como una muestra.

El uso de instrumentos análogos convencionales equipados con un potenciómetro para las mediciones de la dirección del viento se acepta también en las AWSs. Los dispositivos de veleta para el viento con codificadores digitales han incrementado su uso.



Figura 3-4: Instrumento para la medición del viento

La comisión para instrumentos y métodos de observación (CIMO, por sus siglas en inglés) recomienda que para nuevos sistemas, debería ser posible reportar la desviación estándar de la velocidad y dirección del viento con una resolución de 0.1 m/s y 10° respectivamente.

Un sensor útil para la medición del viento es el modelo 05103 de marca Young. Este monitor de viento mide horizontalmente la velocidad y dirección del viento. Fue originalmente diseñado para ser usado en el océano sobre boyas. Es un instrumento fuerte y resistente a la corrosión, así como preciso y de peso liviano. El rango de operación del instrumento es de entre los 0 y 100 m/s, velocidad por encima de la que se registra usualmente en los valles de la alta cordillera. La sensibilidad es de 1 m/s para la medición de velocidad del viento y de 1.1 m/s cada 10° de desplazamiento para la dirección del viento. La precisión para la velocidad es de ± 0.3 m/s o 1% de la lectura y de $\pm 3^\circ$ para la dirección.

D. Precipitación

El equipo de precipitación más común en un AWS es el pluviómetro de balancín. Estos medidores son obstruidos rápidamente por escombros tales como hojas, arena o excrementos de aves; por lo tanto se debe tener cuidado con las AWS cuando operan por largo tiempo sin supervisión. Para mediciones de lluvia y nieve bajo los 0°C, se deben calentar diferentes partes del medidor apropiadamente. Esto puede aumentar riesgo de mal funcionamiento por problemas en el suministro de energía, en particular para aquellas estaciones operadas mediante baterías. Se debe tener cuidado con los calentadores de instrumentos, ya que estos introducen error debido a las pérdidas por evaporación. Puede considerarse como excelente cuando se obtienen observaciones con una precisión de entre 5% a 10%. Se puede mejorar la precisión rodeando del pluviómetro con una pantalla contra el viento adecuada (Un ejemplo es la pantalla protectora Nipher), y esto es altamente recomendable en zonas con alta exposición al viento, así como en situaciones donde la precipitación cae mayoritariamente en forma sólida.

Un equipo para la medición de precipitación es el pluviómetro de marca OTT. El Pluvio² OTT se puede utilizar para la medición automática de la intensidad y cantidad de precipitación. En contraste con los medidores convencionales, el Pluvio² OTT (Figura 3-5) trabaja usando un balance de masas. Este pluviómetro reconoce la precipitación de manera confiable, si es líquida o sólida, determinando el peso del cubo recolectado. Este pluviómetro requiere baja mantención debido a que tiene una alta capacidad de recolección y posee un diseño robusto del sistema de balance que se usa para pesar el contenido en el cubo.

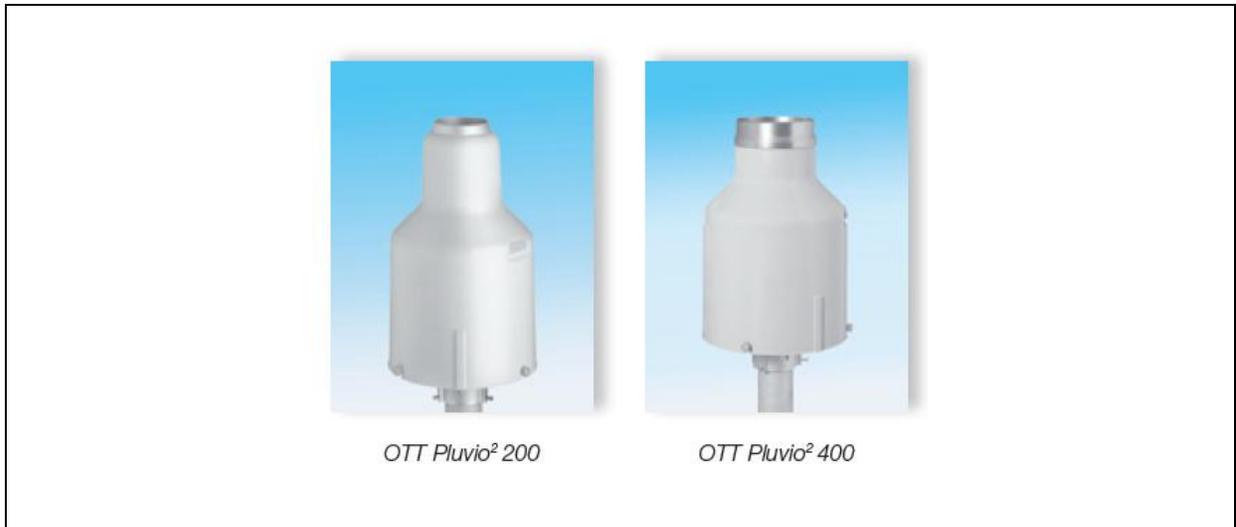


Figura 3-5: Versión del pluviómetro OTT

Una celda de carga de acero inoxidable de alta precisión se usa para pesar el contenido del cubo y esta herméticamente sellado contra cualquier influencia ambiental, permaneciendo estable por largos periodo de tiempo. Un sensor de temperatura compensa los cambios de temperatura en el balance del sistema. Una protección mecánica previene daños sobre la celda de carga en la dirección vertical, como por ejemplo durante el transporte o cuando se vacía la cubeta de recolección.

Nótese que una protección especial puede colocarse para el viento cuando este es fuerte. En alta montaña, en general, las condiciones climáticas son adversas y es deseable establecer todas las protecciones disponibles. La Figura 3-6 muestra un ejemplo de un protector en un pluviómetro.



Figura 3-6: Protección para el viento en pluviómetro

La capacidad de captura es de 1500 mm para el modelo Pluvio² 200 y de 750 mm para el Pluvio² 400. La cantidad de 1500 mm es superior a la precipitación promedio anual de varias cuencas de alta montaña, con lo que este pluviómetro puede considerarse suficiente para la medición de un año normal sin supervisión de la estación. Las condiciones ambientales de operación del instrumento se sitúan entre los -40°C y los 60°C, rango en el cual se encuentra la temperatura la mayoría de las veces en cuencas andinas. La temperatura de almacenamiento puede estar entre los -50°C y los 70°C. En condiciones no calefaccionadas, el sensor requiere la adición de líquido anticongelante para fluidizar la nieve capturada en su interior.

E. Presión atmosférica

El sensor de presión atmosférica es usualmente implementado dentro de la caja de protección del datalogger. El sensor está encapsulado dentro de una caja plástica que lo protege. Algunos sensores de presión disponen de un dispositivo de encendido y apagado lo que permite que solo se active cuando se necesita la medición ahorrando energía.

La temperatura de operación del sensor puede variar entre los -40 a 60°C y esto determinará la precisión del sensor, teniéndose los mayores errores cuando las temperaturas son muy bajas o muy altas llegando a los 1.5 mb de error en el caso más desfavorable.

F. Medición del equivalente de agua de nieve (SWE)

Es usual y recomendable instalar sensores de medición directa del SWE en combinación con totalizadores de precipitación tales como los descritos arriba. Los totalizadores no son capaces de estimar la intensidad de precipitación en intervalos cortos, y además es necesario estimar las tasas de derretimiento de nieve en condiciones naturales en un punto del espacio. Más detalles y formas de registrar esta variable pueden encontrarse en Egli (2011).

- Snowpillow

El sensor snowpillow (de SOMMER GesmbH&Co KG <http://www.sommer.at>) estima SWE mediante la medición de la presión hidrostática de un líquido anticongelante (agua con glicol de propileno) dentro del instrumento. La nieve acumulada sobre este provoca una presión sobre el líquido dentro, el cual corresponde directamente al peso de la masa de nieve que yace sobre él. El SWE se mide como lámina de agua en mm, como la diferencia de presión, asumiendo que no hay otros efectos, tales como mecanismos de deformación de la cubierta de nieve que influyen la presión. El snowpillow debe ser ubicado en un lugar plano para asegurar una distribución uniforme del líquido dentro de él. Más aún, para evitar derrames, este debe ser instalado en una superficie suave, como en una cama de arena por ejemplo (Egli, 2011).

- Snow Scale

Otro dispositivo para la medición de nieve es el "SSG Snow Scale" (Figura 3-7), instrumento que permite medir de manera continua el equivalente en agua de la nieve (SWE). Sus propiedades y beneficios radican en la minimización del efecto de la acumulación de hielo, optimizando el flujo de calor entre el sensor y el suelo para una alta precisión durante el proceso de derretimiento; además, al utilizar elementos mecánicos de medición de presión, no requiere líquido anti refrigerante. Posee la ventaja de ser liviano y de larga duración y puede medir hasta 200/500/1000/2000 mm de SWE dependiendo del modelo instalado.



Figura 3-7: Sensor SSG Snow Scale

Su manera de operar es a través de la carga de celdas. El sensor consiste en siete paneles perforados cada uno de tamaño 80x120 cm. El centro del panel, así como los seis paneles que lo rodean permiten la percolación a través de ellos. Los paneles perforados permiten minimizar las diferencias de temperatura entre el sensor y los paneles que actúan como un amortiguador del panel central, donde el SWE es medido. Este sistema permite mediciones más precisas incluso durante periodos de rápida deposición de nieve seguidos por largos periodos de acumulación.

- Sensor de altura

Es posible medir la altura de nieve mediante un sensor ultrasónico. Este debe ser instalado sobre una mástil fijo o sobre alguna zona que se mantenga inmóvil durante la época de deshielo, para así medir las variaciones en la altura de nieve. Este instrumento permite la medición de la nieve sin tener un contacto directo con ella, a través de pulsos ultrasónicos, los cuales una vez que hacen contacto con la superficie objetivo se reflejan permitiendo la medición de la altura.

Las características de almacenamiento de datos y requerimientos de energía puede verse en Anexo A.

3.2 Estaciones de monitoreo automáticas

Las estaciones automáticas se usan para incrementar el número y la confiabilidad de las observaciones superficiales. Esto se logra gracias a las siguientes propiedades.

- a. Incrementando la densidad de una red existente proveyendo datos desde nuevos sitios y de aquellos que son difíciles de acceder e inhóspitos.
- b. Administrando datos fuera de las horas de trabajo normal por parte de un equipo humano.
- c. Aumentando la confiabilidad de las mediciones usando tecnología más sofisticada y moderna, así como técnicas de mediciones digitales.
- d. Asegurando la homogeneidad de las redes y estandarizando las técnicas de medición.
- e. Satisfaciendo las necesidades y requerimientos de nuevas observaciones.
- f. Reduciendo los errores humanos.
- g. Bajando costos operacionales mediante la reducción del número de observadores.
- h. Midiendo y reportando con una alta frecuencia o continuamente.

Las estaciones automáticas pueden establecerse de dos maneras, aquellas que proveen información en tiempo real, y aquellas que recolectan los datos.

- **AWS en tiempo real:** Es aquella estación que provee datos a los usuarios de observaciones meteorológicas en tiempo real, típicamente programada a ciertos intervalos, pero que también trabaja cuando se le solicita en condiciones de emergencia o bajo requerimientos externos. Típicamente el uso de una AWS en tiempo real es para la provisión de datos sinópticos y el monitoreo de alertas sobre tormentas, caudales o niveles de marea.
- **AWS sin conexión:** Es aquella estación que recolecta datos en un sitio sobre un almacenamiento externo o interno, posiblemente combinado con un visualizador de los datos actuales. Se requiere la intervención de un observador para enviar los datos guardados a un equipo remoto. Típicamente estas estaciones son climatológicas y complementan a los observadores de las estaciones de medición.

3.2.1 Estación meteorológica portátil

Para efectos de un monitoreo temporal y estudio a corto plazo la instalación óptima que debería considerarse para un estudio de balance de masa y modelamiento de deshielo por parte de una AWS es la siguiente:

- Velocidad y dirección del viento
- Humedad relativa
- Temperatura del aire
- Radiación solar incidente
- Radiación visible reflejada
- Presión atmosférica

Los sensores se pueden instalar en un trípode adecuadamente diseñado que maximice su estabilidad durante el proceso de derretimiento de la nieve/hielo, como se indica en la Figura 3-8.

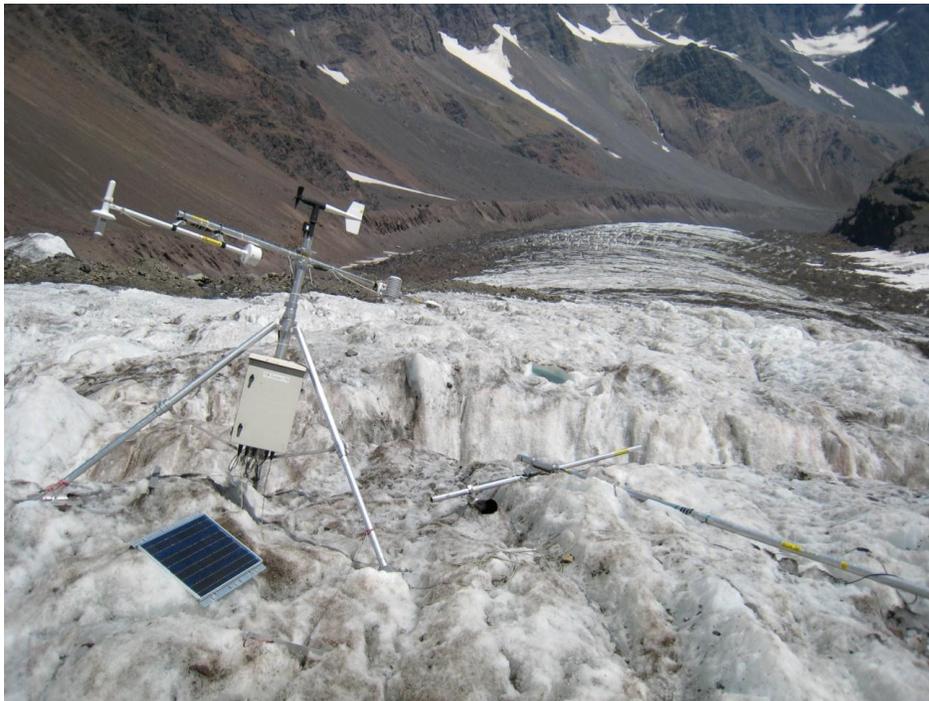


Figura 3-8: Estación meteorológica automática sobre superficie de glaciar

3.2.2 Estación meteorológica fija

La estación modelo debe cumplir ciertos criterios de ubicación y equipamiento que se detallaran y debe cumplir con las necesidades de los usuarios, por lo cual es necesario definir las variables a obtener y de ellas los instrumentos a ocupar. De las variables descritas anteriormente, una estación meteorológica permanente debería incluir como mínimo:

- Dirección y velocidad del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Radiación solar incidente
- Precipitación

Si la estación se ubicara en una zona donde se espera acumulación no despreciable de nieve durante la temporada de invierno, es deseable complementar los sensores indicados arriba con:

- Sensor de equivalente en agua de nieve
- Sensor ultrasónico de altura de nieve
- Sensor de radiación de onda corta reflejada

Finalmente, la estación debe ser protegida de la influencia de animales u otros por un cierre perimetral que en lo posible no interfiera con las mediciones de cada sensor (Figura 3-9). Asimismo, la disposición interna de los sensores debe ser tal que se minimice la interferencia entre ellos. Con este fin, se presenta a continuación un plano tipo de ubicación de sensores.

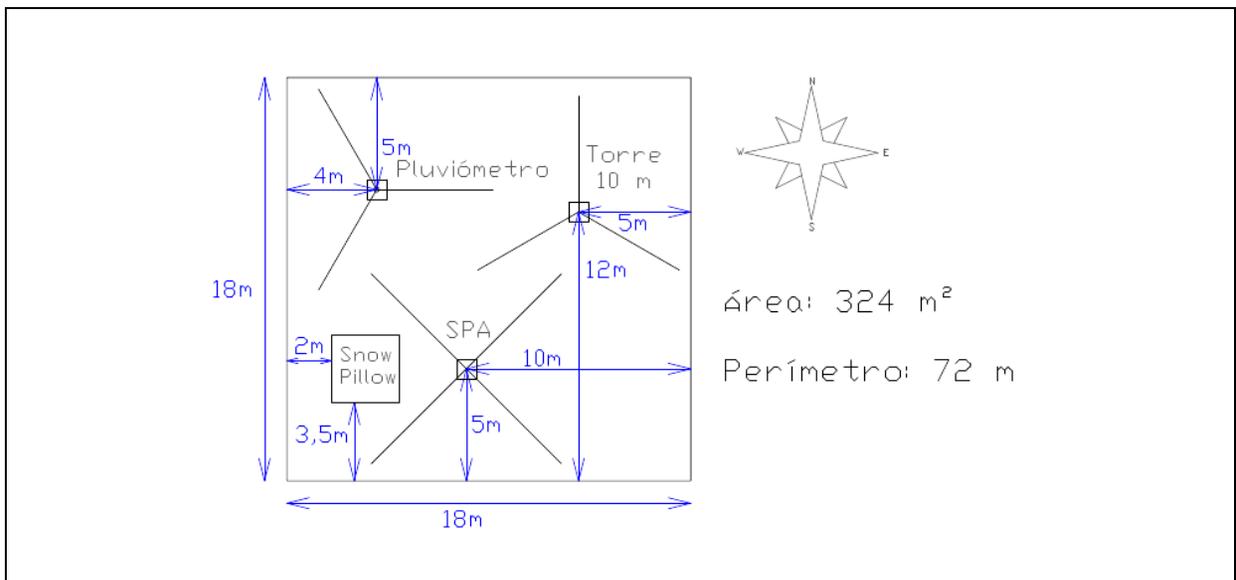


Figura 3-9: Esquema estación meteorológica propuesta por la Universidad de Chile

En la selección de la reja no es recomendable utilizar aquellas muy densas, esto porque puede alterar el flujo de viento lo que afecta las mediciones. Una malla posible de utilizar

es la "URSUS" que ofrece una buena abertura y previene la entrada de animales, aunque no es suficientemente resistente si se desea usar como protección contra intervención humana. Las mallas URSUS están fabricadas de alambres galvanizados con curvas de tensión en sus hebras horizontales y estructuradas en base a nudos lo que le da una mejor resistencia. Es posible generar una cerca suficiente con una malla de 7 hebras. Se puede necesitar más de un rollo para cerrar la cerca y alcanzar mayores alturas dependiendo de la seguridad que se le quiera dar al sitio. No se recomiendan mallas demasiado finas, ya que ayudan a la acumulación de nieve interfiriendo en las mediciones de algunos sensores.

3.3 Zona de posicionamiento y alturas de sensores en una AWS

El sitio donde se ubique la estación meteorológica debe permitir el correcto funcionamiento de todos los instrumentos en cuestión. Esto implica que no se afecten las mediciones de temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación, entre otros. Lo ideal es que el sitio escogido represente de la mejor manera posible el área que se desea estudiar y debe estar lejos de objetos que obstruyan las mediciones como árboles o edificios.

En términos generales los sensores deberían estar localizados en zonas abiertas. La EPA recomienda que los sensores de viento estén a una distancia de al menos 10 veces el alto de los edificios, arboles u otras obstrucciones más cercanas. Las alturas para su ubicación recomendadas son de $3,0\text{m} \pm 0,1\text{m}$ (AASC)³, de $2,0\text{m} \pm 0,1\text{m}$ y $10,0\text{m} \pm 0,5\text{m}$ opcional (AASC) o a $10,0\text{m}$ (WMO⁴ y EPA⁵).

Por su parte el sensor temperatura y humedad relativa debe contar con protección contra la radiación. La EPA recomienda que el sensor no se encuentre más cerca que 4 veces la altura de la obstrucción más cercana, al menos a 30 m de las extensas áreas pavimentadas y en un área abierta en al menos 9 m. Las áreas abiertas debieran estar cubiertas de pasto corto o, en su defecto, sobre tierra natural. Deben evitarse fuentes de calor producidas por industrias, tejados, pendientes pronunciadas, depresiones protegidas, alta vegetación, áreas sombreadas, pantanos, áreas donde se producen acumulaciones de nieve y lugares bajos donde el agua se acumule después de una lluvia.

³ AASC: American Association of State Climatologists.

⁴ WMO: World Meteorological Organization.

⁵ EPA: Environmental Protection Agency

Las alturas típicas para colocar el instrumento son de $1,5\text{m}\pm 1,0\text{m}$ (AASC), 1,25m a 2,0m (WMO), 2,0m para la temperatura (EPA) y a 2,0m y 10m para la diferencia de temperatura (EPA).

Los instrumentos para medir la precipitación deben ubicarse en lo posible a una distancia igual al menos a cuatro veces la altura de la obstrucción más cercana. El orificio de la cubeta debe colocarse horizontal, abierto al cielo y sobre el nivel de cualquier objeto que salpique y de la acumulación de nieve. Es usual que los instrumentos para la medición de precipitación se ubiquen a nivel de suelo donde existe pasto corto o gravas. Es de considerar, sin embargo, que en alta cordillera esto puede ser un problema, ya que existe el riesgo de sobrepasarse el nivel del instrumento por la nieve acumulada sobre la cuenca. Por tal motivo, el instrumento no puede colocarse a nivel de suelo y siempre debe ir sobre la altura de máxima acumulación de nieve de cada sitio. Es recomendable colorar protectores para el viento, para minimizar el sesgo negativo (undercatch) producto de la acción del viento sobre los hidrometeoros que caen.

Los piranómetros para la medición de la radiación solar deben ubicarse fuera de sombras, superficies reflectantes y fuentes de radiación artificial. Ubicando el instrumento en la parte que se encuentra más hacia el norte (En el hemisferio sur) de la estación meteorológica, se debería minimizar la sombra de la estructura propia de la estación y de otros instrumentos. La altura a la que se monta el sensor no es crítica para la precisión de la medición. Sin embargo, los piranómetros montados a alturas de 3 m o menos son más fáciles de nivelar y limpiar.

En general, para la ubicación de todos los instrumentos debe cuidarse colocar los sensores sobre la altura de máxima acumulación de nieve. En general, en los valles de la cordillera de Chile central, esto puede estar cerca de los 3 m. De ese nivel debe considerarse las alturas de referencia de la EPA y las otras organizaciones. Además, dada las alturas de las grandes cumbres en la cordillera, es posible que si la estación se ubica muy cerca de alguna ladera se capturen efectos locales de esa zona de la cuenca. Por ejemplo, puede existir una cumbre muy alta que genera sombra gran parte del día provocando una baja medición de la radiación no característica de toda la cuenca. Por tal motivo, es recomendable buscar lugares planos en la cuenca, alejados de las laderas y otras obstrucciones, como rocas grandes, refugios, entre otros, que puedan generar una distorsión de una medición característica de la cuenca.

3.4 Intervalos y frecuencia de medición

La frecuencia de muestreo recomendada para un sistema de adquisición depende del uso final de los datos. La evidencia y experiencia sugieren que 360 valores espaciados en el intervalo de muestreo proveerá una desviación estándar entre un 5 a 10%. Las estimaciones del promedio deberán basarse en al menos 60 muestreos para obtener similar nivel de exactitud (Como recomendación se sugiere una muestra por minuto para un promedio horario). Algunas veces un muestreo menor será suficiente, pero no existe una guía general que se pueda establecer antes del muestreo, siendo necesaria algunas veces una frecuencia de muestreo superior. En el caso del sensor de viento, la dirección del viento (medida por veleta) debe ser muestreada al menos una vez por segundo para evitar que valores consecutivos varíen más de 180°.

Las frecuencias recomendadas de muestreo son valores mínimos y la exactitud de los datos se mejorara incrementando la tasa de muestreo.

En términos de las estrategias de muestreo debe asumirse una medición horaria, a menos que sea establecido de otra manera anteriormente. Esto es para mantenerse acorde con el tiempo promedio usado en la mayoría de los modelos de calidad de regulación del aire. El valor horario promedio es asociado con el producto final del procesamiento de los datos (es decir, los valores que son ya modelados). Los promedios horarios podrían ser obtenidos promediando los muestreos sobre una hora o promediando un grupo de cortos periodos. Si el promedio horario se basa en promedios de periodos cortos, entonces se recomienda que esto sea en intervalos de 15 minutos. Al menos dos periodos de 15 minutos son requeridos para representar un periodo horario. El uso de promedios en periodos más cortos para calcular un valor horario tiene ventajas que minimizan los efectos de variación bajo condiciones de viento para el cálculo de la desviación estándar del viento, provee información más completa para revisar los datos en periodos de transición y también permite recobrar datos que pudieron haberse perdido si solo parte de estos se perdieron.

Las estrategias de muestreo variaran dependiendo de la variable medida, el sensor empleado, y la exactitud requerida en el uso final de los datos. El tiempo de muestreo promedio recomendado para la velocidad del viento es de 1-5 segundo; para la temperatura y diferencias de temperatura, lo recomendado es un tiempo de muestreo promedio de 30 segundos (EPA, 2000).

Considerando las recomendaciones anteriores, las frecuencias e intervalos de muestreo se definen de la siguiente manera (Tabla 3-1) para el presente estudio.

Tabla 3-1: Intervalos y frecuencias de muestreo por instrumento

Instrumento	Intervalo	Frecuencia
Anemómetro (medición velocidad)	10 min	10 seg
Anemómetro (medición dirección)	10 min	5 seg
Termómetro	10 min	10 seg
Barómetro	10 min	10 seg
Piranómetro	10 min	10 seg

3.5 Experiencias anteriores

Se registran dos experiencias de estaciones en zonas con glaciares y nieve que sirven de referencia para el presente estudio. Sus características y detalles con los instrumentos pueden verse en Anexo B.

4. Actividades en terreno

4.1 Instalación y mantención de estaciones meteorológicas

En el marco de este estudio se instalaron tres estaciones meteorológicas, y se hizo mantención de dos estaciones previamente instaladas por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA. Además se implementaron dos secciones de aforo en las cuencas asociadas a cada uno de los glaciares en estudio. Las estaciones implementadas se resumen en la Tabla 4-1, y el detalle de los equipos y sensores instalados (marca, modelo y precisión) en la estación AWS se presenta en Anexo C. La ubicación de cada estación puede verse en la Figura 2-1.

Tabla 4-1: Resumen de estaciones incluidas en este estudio

Nombre	Tipo	Coordenadas		Elevación
		E	N	m.s.n.m.
San Francisco Superior	Meteorológica portátil	400.492	6.265.730	3.806
San Francisco Media	Meteorológica tres niveles	400.612	6.265.003	3.466
San Francisco en Aguas Panimávida	Meteorológica fija	400.879	6.259.054	2.237
Estero Morales en Puente Conaf	Fluviométrica	401.646	6.257.022	1.860
Pirámide Media	Meteorológica tres niveles	417.320	6.283.960	3.563
Pirámide Baja	Meteorológica portátil	417.242	6.281.841	3.288
Estero el Yeso en Termas del Plomo.	Fluviométrica	415.874	6.279.896	2.981

En el caso de la estación de tres niveles sobre el glaciar San Francisco, se implementó una innovación en el diseño del mástil con objeto de maximizar la estabilidad de la estación y al mismo tiempo permitir que los sensores se mantuvieran en los niveles 0.5, 2 y 4 m. Para ese efecto, se construyó un sistema telescópico en el cual los instrumentos de la estación se sitúan sobre brazos que descansan en un tubo central de 2 ½ pulgadas y 4 m de largo. Este tubo central a su vez mantiene su posición gracias a otro tubo 2 pulgadas y 6 m de largo que hace de guía sobre el primero. Una base evita que el tubo de mayor diámetro se sumerja en la nieve. Véase la Figura 5-D para detalles de la instalación de la estación de 3 niveles.

Los trabajos en la estación meteorológica en Aguas Panimavidas se limitaron a su mantención. Se modificó la pastilla del radiómetro, para asegurar el buen funcionamiento del instrumento y se cambió una batería antigua de 28 Amp por una nueva de 100 Amp (Figura 4-1).

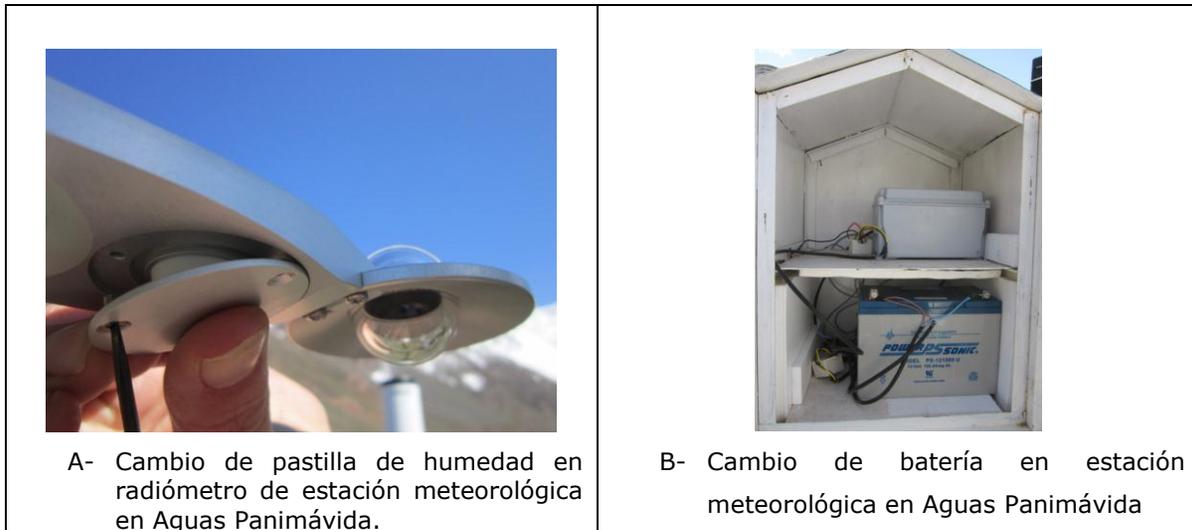


Figura 4-1: Modificación de instrumentos en Estación en Aguas Panimávida.

4.2 Secciones de aforo

Se instalaron y mantuvieron dos secciones de aforo, en los esteros Morales y El Yeso, respectivamente.

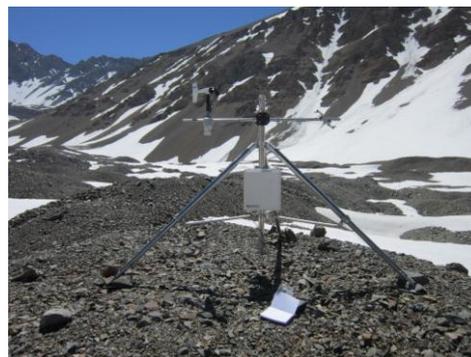
Se realizó la mantención a la estación fluviométrica ubicada en el Estero Morales (en puente Conaf) la cual se encontraba fuera de operación debido a la presencia de agua en el gabinete. Para la obtención de datos se instaló una nueva estación en dicha zona. En la Figura 4-5 (A y B) puede verse el nuevo gabinete instalado para la medición de caudal y el reposicionamiento del sensor. Se instaló una nueva caja protectora con índice de protección IP66 lo que permite evitar la entrada de agua ante una eventual sumersión de la caja, así como garantizar la ausencia de polvo al interior del gabinete.

Una estación fluviométrica fue instalada en las cercanías de las Termas del Plomo para tener registros del estero que nace del glaciar Pirámide (Figura 4-5 en C y D). Desafortunadamente, no existe una sección de aforo adecuada para medir solamente las aguas provenientes del glaciar Pirámide, por lo que se debió instalar el sensor de presión

en el estero El Yeso, que recoge los aportes tanto del glaciar Pirámide como del estero del Valle del Bello. De este modo, el caudal de derretimiento del glaciar Pirámide debe obtenerse mediante la diferencia de la medición entre el aporte del estero naciente en el Valle del Bello y de la estación fluviométrica en el estero El Yeso en Termas del Plomo. En la sección de Resultados se detalla el cálculo preliminar de este aporte.



A- Estación meteorológica portátil en glaciar San Francisco



B- Estación meteorológica portátil en glaciar Pirámide



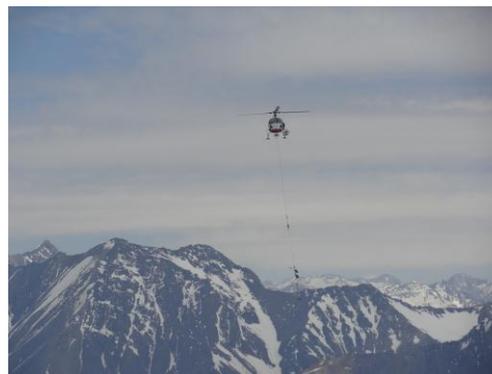
C- Estación de 3 niveles en glaciar San Francisco



D- Sistema de guía de estación de 3 niveles en glaciar San Francisco



E- Estación de 3 niveles en glaciar Pirámide



F- Operaciones de localización de estación de 3 niveles en glaciar San Francisco

Figura 4-2: Estaciones meteorológicas sobre glaciares. (A) AWS sobre glaciar San Francisco, (B) AWS sobre glaciar Pirámide, (C) estación de 3 niveles en glaciar San Francisco, (D) barra de sujeción de estación de 3 niveles, (E) estación de 3 niveles en glaciar Pirámide y (F) operaciones de instalación de estaciones.

En ambas secciones se realizaron aforos velocimétricos en el contexto de este estudio, con el fin de avanzar en la construcción de una curva de descarga. Los aforos se realizaron mediante el método de los puntos, utilizando el concepto velocidad área con un molinete Gurley modelo 622A. La Tabla 4-2 que se presenta a continuación muestra los resultados de los aforos.

Tabla 4-2: Aforos realizados en las cuencas de estudio

Código	Fecha	Hora	Ubicación	Sección de Aforo	Caudal Q
				m	m ³ /s
A1	Dic-2012	11:00	Estero Morales en Puente Conaf	5,0	2,05
A2	Dic-2012	13:00	Estero Morales en Puente Conaf	5,5	1,95
A3	Dic-2012	15:00	Estero Morales en Puente Conaf	6,5	2,47
B1	Dic-2012	11:45	Estero Yeso en Termas del Plomo	5,7	0,63
B2	Dic-2012	19:45	Estero Yeso en Termas del Plomo	9,2	2,87
B3	Dic-2012	09:00	Estero El Yeso antes glaciar Pirámide	7,0	1,78
B4	Dic-2012	10:30	Estero Yeso en Termas del Plomo	8,5	2,66

Los lugares de aforo pueden verse mejor representados en la Figura 4-3 y en la Figura 4-4.

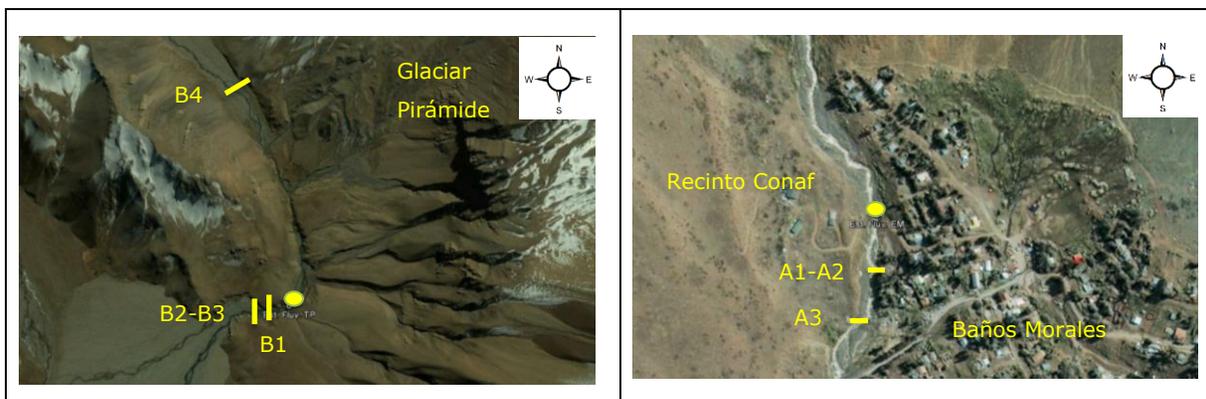


Figura 4-3: Ubicación de zonas de aforos en Estero El Yeso. En B1-B2-B3 sitios de aforo en cercanías de Termas del Plomo y en B4 antes de glaciar Pirámide. El punto señala la ubicación de la estación fluviométrica. Google (2012). Foto de satélite del Termas del Plomo. Consulta: 27 diciembre 2012, <http://earth.google.com>.

Figura 4-4: Ubicación de zonas de aforo en Estero Morales. En A1, A2 y A3 los lugares de aforo cerca de la Estación fluviométrica en Estero Morales. El punto señala la ubicación de la estación fluviométrica. Google (2012). Foto de satélite de Baños Morales. Consulta: 27 diciembre 2012, <http://earth.google.com>.

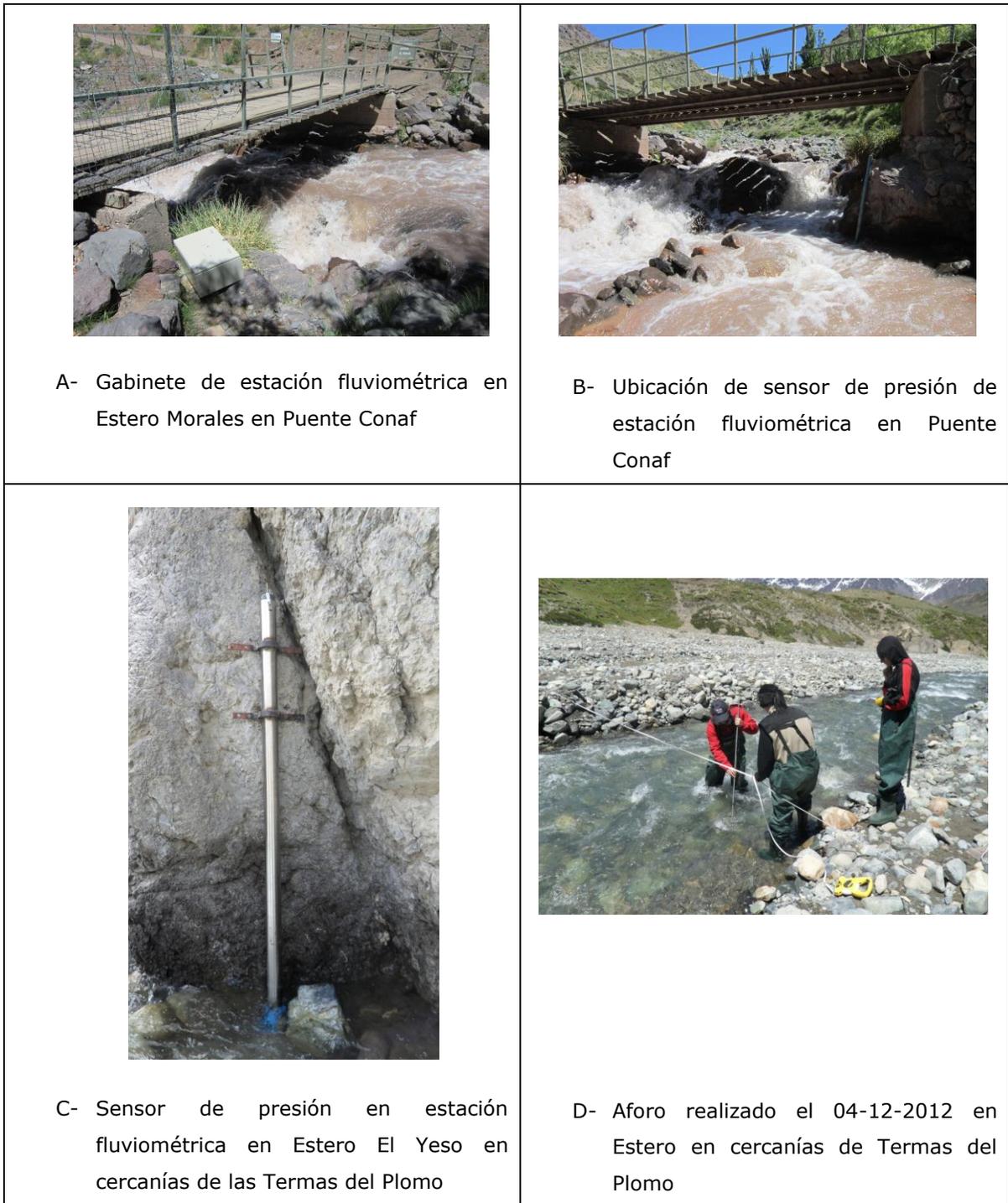


Figura 4-5: Archivo fotográfico estaciones de aforo

En la Figura 4-5 en (B) puede verse la nueva posición del sensor de presión en el Estero Morales, el cual fue inserto en el mismo tubo anterior, al cual se le agregó un codo para evitar la entrada de material suspendido al interior.

4.3 Datos recolectados

4.3.1 Estaciones en glaciar Pirámide

Los datos disponibles corresponden a los obtenidos por las estaciones en las fechas de estudio. Se utilizaron tanto las estaciones disponibles en la cuenca del Estero Morales como las ubicadas sobre los glaciares San Francisco y Pirámide (Véase Anexo D).

La estación de 3 niveles en el glaciar Pirámide presentó varios inconvenientes presumiblemente por la acumulación de nieve. En la Figura 4-6 puede verse como los brazos del segundo nivel se ven torcidos (Para el día 14-11-2012), lo que genera problemas evidentes en la medición de la radiación y otras variables.

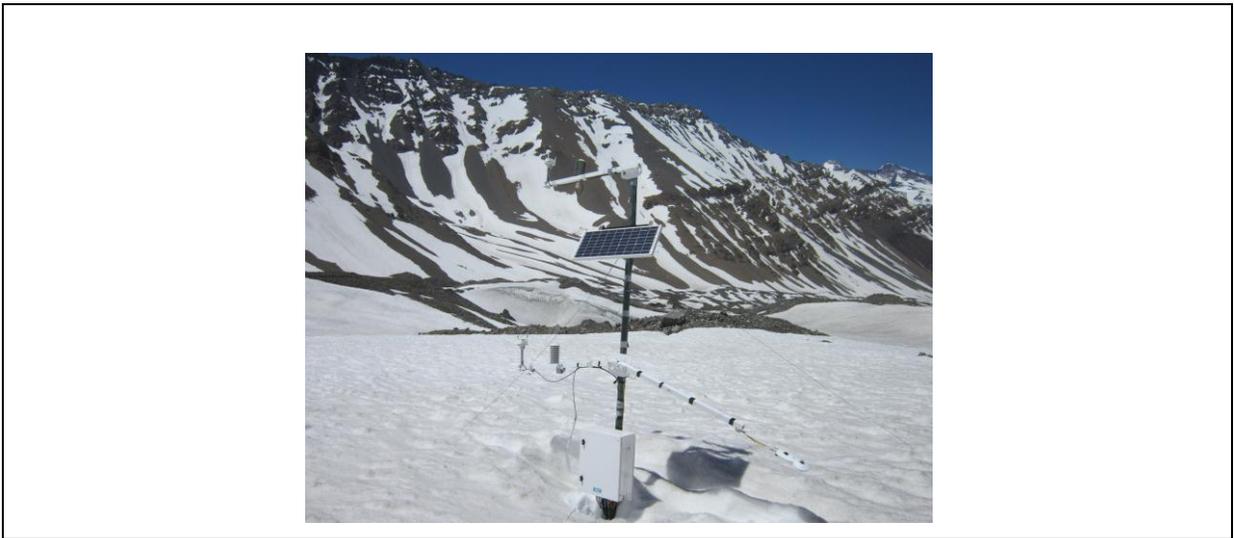


Figura 4-6: Estación meteorológica de 3 niveles en glaciar Pirámide en el 14-11-2012

Algunos de los efectos pueden verse reflejados en los datos. Por ejemplo el radiómetro no tomó datos consistentes para fechas anteriores al 7 de noviembre del 2012 (Véase la Figura 4-7).

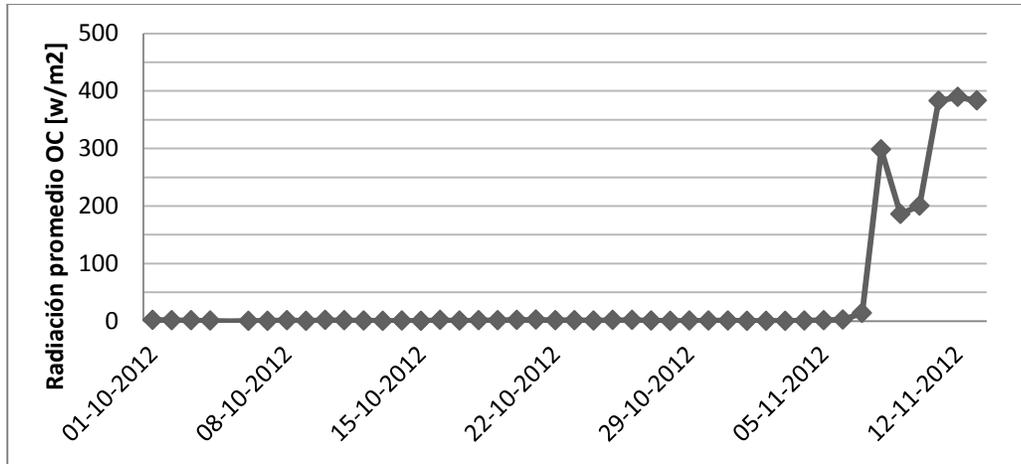


Figura 4-7: Variación de la radiación de onda corta (OC) tomada por el radiómetro en estación meteorológica de 3 niveles en glaciar Pirámide

La estación meteorológica portátil presenta datos continuos desde su instalación el día 14-11-2012 lo cuales fueron utilizados en la modelación del balance de masas.

4.3.2 Estaciones, calicata y balizas en glaciar San Francisco

La estimación de la acumulación nival se realizó mediante balizas que se instalaron en el glaciar San Francisco en el período de estudio (Figura 4-8). Cerca de la estación de 3 niveles se instalaron 3 balizas de norte a sur, mientras que en las cercanías de la estación meteorológica portátil se instalaron 2 balizas en similar dirección. Las coordenadas y puntos pueden verse en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Balizas posicionadas en glaciar San Francisco

Baliza	Fecha Instalación	Hora	Profundidad m	latitud	longitud	Altitud msnm
B1	25 Octubre 2012	12:30	8,53	33°44'55.3"	70°04'25.5"	3.337
B2	25 Octubre 2012	13:15	8,45	33°44'58.2"	70°04'24.4"	3.320
B3	25 Octubre 2012	14:45	4,54	33°45'05.1"	70°04'25.0"	3.282
B4	31 Octubre 2012	10:30	4,07	33°44'37.8"	70°04'26.9"	3.677
B5	31 Octubre 2012	11:15	6,44	33°44'34.2"	70°04'28.2"	3.707

La ubicación de las balizas y su posición con respecto a las estaciones meteorológicas puede verse en la Figura 4-8.

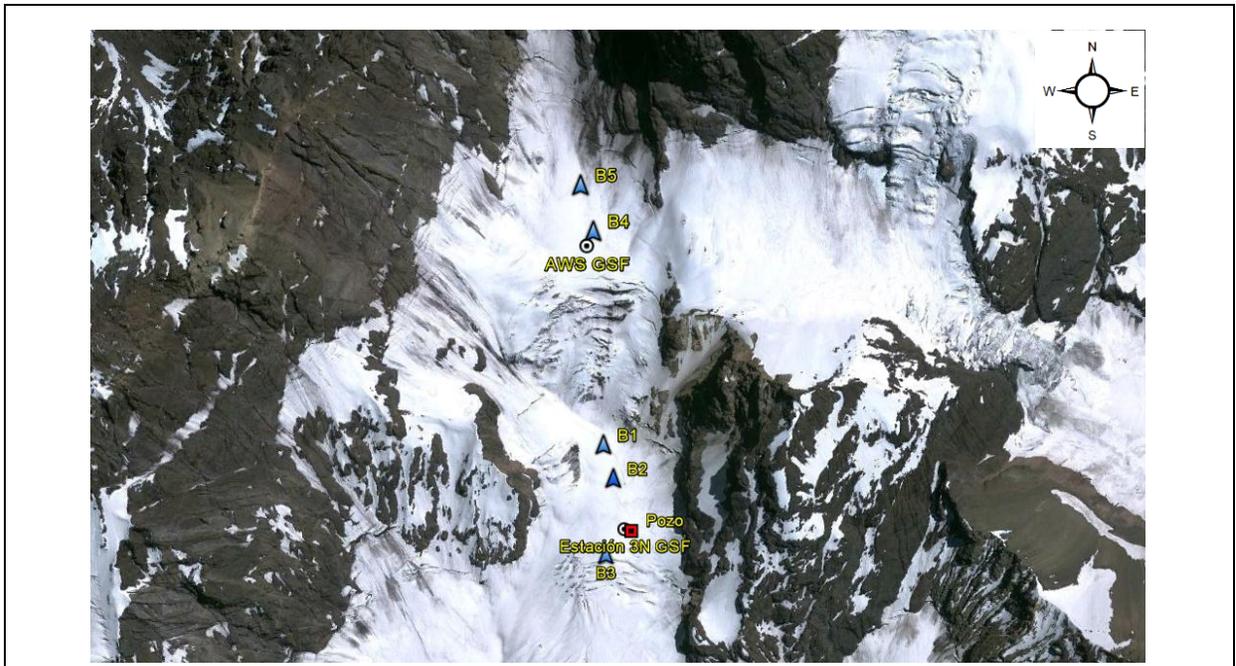


Figura 4-8: Esquema de balizas, pozos y estaciones sobre glaciar San Francisco. B1, B2, B3, B4 y B5 hace referencia a las balizas especificadas en la Tabla 4-3. GSF hace mención al glaciar San Francisco. Por su parte AWS y 3N muestran las estaciones meteorológicas. Google (2012). Foto de satélite del Glaciar San Francisco. Consulta: 27 diciembre 2012, <http://earth.google.com>.

Las balizas pueden verse en la Figura 4-9.



Figura 4-9: Balizas instaladas en glaciar San Francisco

La instalación de balizas indica una altura de nieve de 8,53; 8,45 y 4,54 m en el nivel intermedio a 3.500 msnm, mientras que en el nivel superior en 3.800 msnm se registraron alturas de 4,07 y 6,44 m en el glaciar San Francisco, para la fecha de

instalación. Una segunda medición se realizó sobre la baliza B4 el día 30 de noviembre de 2012 con un valor de 2,7 m de altura de nieve y una medición final de las balizas se realizó el 14 de diciembre de 2012, la cual puede verse en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Altura de Balizas en Diciembre de 2012

Baliza	Fecha de revisión	Profundidad m
B1	14 Diciembre 2012	Sin información
B2	14 Diciembre 2012	4,80
B3	14 Diciembre 2012	1,20
B4	14 Diciembre 2012	1,82
B5	14 Diciembre 2012	4,00

Las balizas fueron ubicadas sobre el eje central del glaciar por motivos de seguridad, ya que en general se registran avalanchas en las zonas cercanas a las laderas. Véase en la Figura 4-10 como se registra una avalancha cuando se está trabajando en la colocación de balizas.



Figura 4-10: Avalancha producida en el glaciar San Francisco el día 25-10-2012

La estación meteorológica de 3 niveles presenta datos desde el 30-10-2012 hasta el 27-11-2012. Se desconocen las causas exactas de este comportamiento de la estación, pero es posible que existan problemas con la capacidad de almacenamiento del datalogger o con la configuración de dicha estación. Por lo tanto, los modelos realizados quedan supeditados a esta condición. No obstante, la estación meteorológica portátil ubicada en

el nivel superior del glaciar San Francisco presenta datos continuos desde su puesta en marcha el día 30-10-2012. Estos datos, más los datos disponibles en la estación meteorológica de Aguas Panimavidas, que comenzó a recolectar datos después del cambio de batería realizado por el equipo de la Universidad de Chile el día 11-10-2012, se utilizan más adelante para correr los modelos de derretimiento y balance de masa.

Adicionalmente, una calicata fue realizada a comienzos de Diciembre en el glaciar San Francisco (Figura 4-8), aproximadamente en la ubicación de la estación de tres niveles. La profundidad total observada fue de 2,80 m, y la densidad promedio fue igual a 510 gr/lit. Los resultados de la calicata pueden verse en la Tabla 4-5, y se emplean para estimar el equivalente en agua de nieve sobre el glaciar San Francisco hacia el final de este estudio. El equivalente en agua inicial se estima con observaciones de densidad realizadas por el equipo Consultor en algunas laderas de la Cuenca del Estero Morales sobre los 2500 msnm, al final de la temporada de invierno, mediciones que no son parte de las bases de este proyecto (Véase informe DGA-RHMA, 2012 titulado "Análisis de la red nival necesaria para los recursos hídricos").

Tabla 4-5: Calicata efectuada en glaciar San Francisco

Altura	Densidades
cm	gr/lit
20	580
50	532
100	520
125	564
150	472
175	488
200	544
225	552
250	528

4.3.3 Estaciones fluviométricas

Las estaciones fluviométricas fueron instaladas en distintas etapas del proyecto. Primeramente entró en funcionamiento la estación fluviométrica del estero Morales el día 15-11-2012 con el equipo disponible inicialmente para la medición de caudal del glaciar

Pirámide. Posteriormente se dispuso de otra estación fluviométrica con un equipo de la Universidad de Chile en las cercanías de las Termas del Plomo en el Estero El Yeso, hacia el día 4-12-2012.

Los datos fueron calibrados mediante tres aforos realizados con molinetes. En la Figura 4-11 se aprecia la curva de calibración para el Estero El Yeso en Termas del Plomo realizado mediante los aforos disponibles a la fecha; por cierto, esta curva puede y debe refinarse con mediciones adicionales. La curva debe manipularse con precaución, dado que es compleja la extrapolación debido a que se cuenta con una baja cantidad de datos, no existe una sección regular para instalar el sensor, la granulometría es variable, hay presencia de rocas de gran tamaño y existen cambios en la geometría de la sección. Debe recordarse que lo que se realiza en la curva de calibración es correlacionar una altura en algún punto del cauce con un caudal y esta relación puede cambiar en distintos aforos, así como no quedar ver representada por una función, sea lineal o no lineal. Por lo tanto, a primera instancia, debe considerarse como válidos solo los puntos dentro del dominio de caudales que fueron aforados o aquellos muy cercanos a los límites de estos.

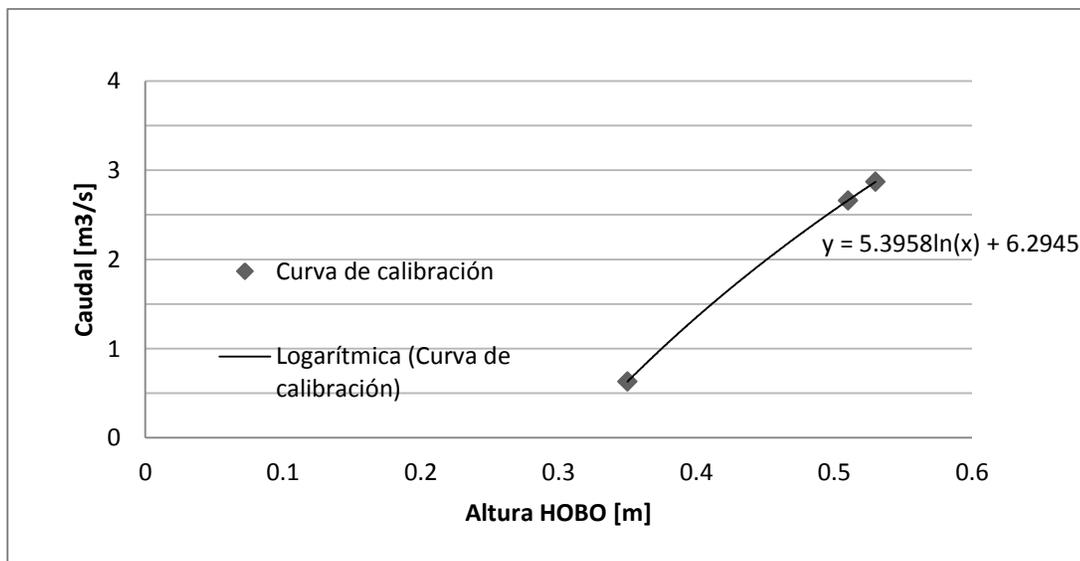


Figura 4-11: Curva de calibración en Estero El Yeso en Termas del plomo

Dada las características del glaciar Pirámide, se hace imposible medir el caudal de derretimiento en un solo punto, por lo que la estación se colocó aguas abajo donde los brazos nacientes del glaciar se unen con el Estero El Yeso, proveniente del Valle del Bello.

Para estimar el caudal proveniente del glaciar es necesario hacer la diferencia entre los caudales medidos en este punto (Termas El Plomo) y el afluente desde el Valle del Bello. Un análisis preliminar basado en un aforo, realizado en Diciembre de 2012 indica que un 38% del caudal medido en las Termas del Plomo proviene del glaciar Pirámide. Este resultado se utiliza para calcular los caudales provenientes de dicho glaciar. Para calcular este porcentaje se realizó una proporción entre el caudal que proviene del Valle del Bello (Q_{Bello}) y el caudal de la estación fluviométrica en Termas del Plomo. ($Q_{\text{Termas del Plomo}}$). Véase la Ecuación 4-1 para ver cómo se obtiene la fracción del caudal del Bello (P_{Bello}), la Ecuación 4-2 para la obtención de la proporción que proviene del glaciar Pirámide y la Ecuación 4-3 para el cálculo del caudal del glaciar Pirámide.

$$P_{\text{Bello}} = 100 \cdot \frac{Q_{\text{Bello}}}{Q_{\text{Termas del Plomo}}} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

$$P_{\text{Glaciar}} = 1 - P_{\text{Bello}} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

$$Q_{\text{Glaciar}} = P_{\text{Glaciar}} \cdot Q_{\text{Termas del Plomo}} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Los caudales estimados para las fecha de estudio pueden verse en Figura 4-12. Si bien el período de estimación es más corto en el caso del glaciar Pirámide, es posible correlacionar los períodos de ascenso de caudal ocurridos a partir de la primera semana de diciembre, lo que contribuye a validar la estimación de caudales de derretimiento en el glaciar Pirámide.

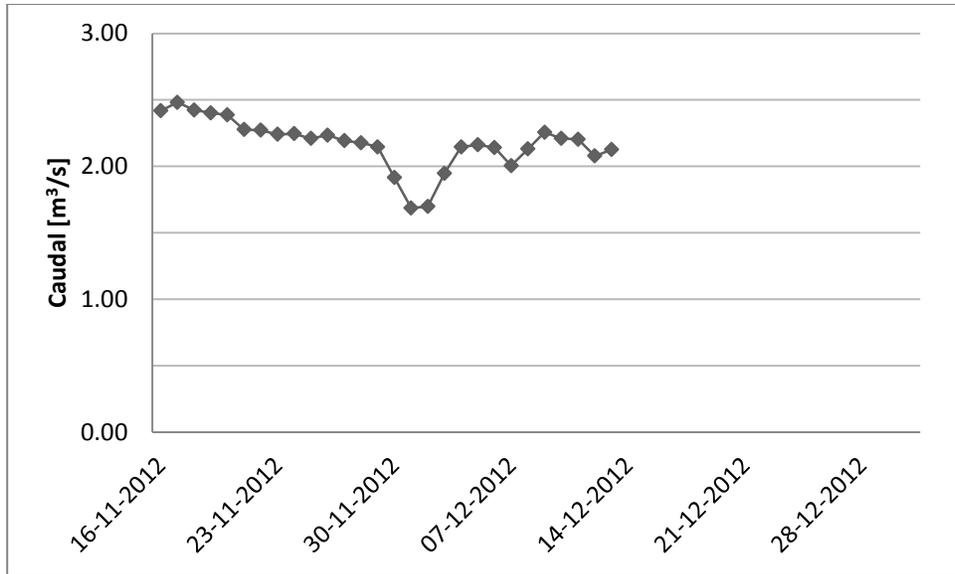


Figura 4-12: Caudal medio diario Estero Morales en puente Conaf

5. Metodología para el modelamiento de balance de masa en glaciares

5.1 Modelos de derretimiento

Este informe presenta dos metodologías alternativas de estimación de tasas de derretimiento, a saber, los métodos de grado-día y grado-día mejorado. Los modelos de derretimiento se calibraron de dos formas dependiendo de los datos recopilados hasta la fecha de término de este proyecto.

En el glaciar San Francisco se utilizaron las balizas para el cálculo del derretimiento, las cuales fueron revisadas en tres ocasiones durante el desarrollo del estudio. Esta información correlacionó con la temperatura, en busca de los coeficientes que mejor permitieran predecir el derretimiento de acuerdo a las ecuaciones de cada modelo.

5.1.1 Factor Grado-Día

Los modelos de índice de temperatura se basan en la hipótesis de que las tasas de derretimiento están linealmente relacionadas a la temperatura del aire. Así la temperatura se considera un índice integrado de toda la energía disponible para el derretimiento. El factor de proporcionalidad (DDF) es llamado "factor grado - día" donde sus unidades son $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1}$ por unidad de tiempo, T es la temperatura en $^\circ\text{C}$, T_T una temperatura de corte medida en $^\circ\text{C}$ y M el derretimiento en mm (Pellicciotti et al., 2005).

$$M = \begin{cases} \text{DDF}_{\text{snow/ice}} \cdot T & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad \text{Ecuación 5-1}$$

Por su parte, Hock (2005) establece el modelo agregado como se muestra en la Ecuación 5-2 donde DDF se expresa en $\text{mm d}^{-1} \text{K}^{-1}$ para un Δt expresado en días y temperatura en $^\circ\text{C}$. En este informe se adopta esta última formulación, ya que se obtiene una mejor correlación cuando se tienen temperaturas acumuladas.

$$\sum_{i=1}^n M = \text{DDF} \cdot \sum_{i=1}^n T^+ \Delta t \quad \text{Ecuación 5-2}$$

5.1.2 Índice de Temperatura Mejorado

Este modelo complementa las mediciones de temperatura y radiación para predecir el derretimiento, incorporando el hecho de que en muchas regiones geográficas es posible observar derretimiento aun cuando las temperaturas descienden significativamente, producto de la alta radiación solar incidente sobre nieve y hielo.

La ecuación puede escribirse como se muestra en la Ecuación 5-3.

$$M = \begin{cases} TF \cdot T + SRF \cdot (1 - \alpha) \cdot G & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad \text{Ecuación 5-3}$$

Donde α es el albedo y G la radiación de onda corta entrante en $W m^{-2}$. TF y SRF son dos coeficientes empíricos, el factor de temperatura ($mm h^{-1}0C^{-1}$) y de radiación de onda corta ($m^2 mm W^{-1} h^{-1}$) respectivamente. T_T es igual a $1^{\circ}C$ y se asume que bajo esa temperatura no existe derretimiento.

El modelo asume que el albedo diario es apropiado. De manera inicial se adoptaron los valores estimados por Pellicciotti et al. (2008) donde cuando existe una cobertura nival sobre un glaciar se tiene un albedo de 0,55, mientras que en un glaciar con detritos este baja a 0,15. El valor de 0,55 puede considerarse bajo para nieve fresca, pero realmente representa un albedo promedio para nieve de distintas características de maduración.

5.2 Inicialización de los modelos de derretimiento: estimación de la acumulación nival inicial

La estimación de la acumulación nival inicial sobre los glaciares se llevó a cabo mediante metodologías alternativas, dependiendo de la disponibilidad de datos de terreno. Así para ambos glaciares fue posible reconstruir el equivalente en agua inicial (31 de octubre) en función de las temperaturas del aire acumuladas, radiación estimada y cobertura nival observada mediante imágenes satelitales MODIS. Además, en el caso de glaciar San Francisco se contó con balizas instaladas en el mes de Octubre, que permitirían estimar la máxima acumulación en este período.

5.2.1 Reconstrucción grado - día

La reconstrucción para el glaciar San Francisco se realizó mediante un método grado-día y grado día mejorado utilizando información de balizas para conocer el derretimiento acumulado en el período de simulación. Las temperaturas y radiaciones utilizadas son suministradas por las estaciones meteorológicas ubicadas sobre el glaciar.

5.2.2 Reconstrucción con Imágenes Satelitales

La estimación del equivalente en agua de nieve máximo se realizó mediante una reconstrucción retrospectiva basada en el derretimiento semanal calculado en base al balance de energía y la disposición espacial de la cobertura nival obtenida mediante imágenes MODIS (MOD10A2). Las imágenes MODIS fueron descargadas para la zona en estudio con una resolución espacial de 500x500 m².

Se procesan las imágenes satelitales de cobertura nival junto con las series de mapas calculados para la radiación solar incidente y la temperatura media diaria extrapolada mediante un gradiente térmico del aire. El derretimiento diario se obtiene al transformar el flujo de energía neta positiva transferida en la interfaz aire-nieve en unidades de altura de agua. El equivalente en agua de nieve se obtiene al acumular progresivamente los derretimientos semanales (Cornwell, 2012). Véase el esquema de la Figura 5-1.

Se observa que la cobertura nival no desaparece de la superficie del glaciar hacia el final del estudio, por lo que se toma como condición de borde final la estimación de equivalente en agua obtenida a partir de las balizas.

Las imágenes MOD10A2 utilizadas corresponden a patrones binarios de máxima extensión de cobertura nival. La radiación utilizada se deriva del módulo r.sun del software de acceso libre GrassGis, calculadas en función de un parámetro de turbiedad atmosférica (TLK=2.5) y un coeficiente de cielo claro global (KC) calculado en base a la fracción de la radiación global modelada y la radiación observada en los piranómetro con la modificación para traspasar los datos desde el rango de longitud de onda medida por el instrumento a su equivalente considerando todo el espectro de radiación de onda corta. La temperatura del aire media diaria se extrapola mediante un gradiente semanal construido con las estaciones meteorológicas.

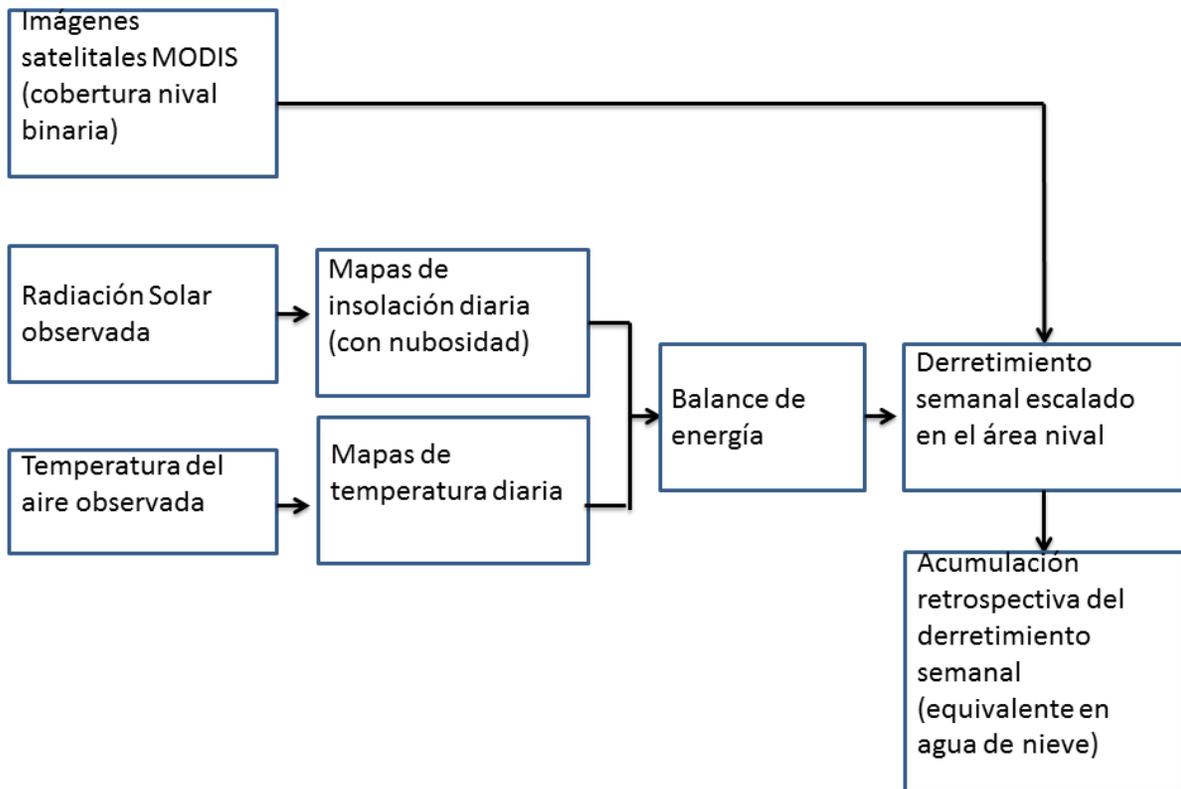


Figura 5-1: Esquema de reconstrucción del equivalente en agua de nieve

La ecuación para el cálculo del derretimiento diario utilizada se presenta en la Ecuación 5-4 (Molotch y Bales, 2006; Dewalle y Rango, 2008; Cornwell, 2012).

$$M = \left((1 - \alpha) \cdot G \cdot KC + 0,575 \cdot e_a^{\frac{1}{7}} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_a^4 - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + \rho_a \cdot c_p \cdot C_h \cdot u_a \cdot (T_a - T_s) + \rho_a \cdot 0,622 \cdot \frac{L}{P_a} \cdot C_e \cdot u_a \cdot (e_a - e_s) \right) \cdot m_1 \quad \text{Ecuación 5-4}$$

Donde α es el albedo, G es la radiación incidente a cielo claro, KC es la constante del índice de claridad, e_a es la presión de vapor del aire asumida con una temperatura de

punto de rocío nula, σ es la constante de Stefan Boltzmann, ε es la emisividad de la nieve, T_a es la temperatura promedio diaria en $^{\circ}\text{K}$, T_s es la temperatura de la nieve asumida como 0°C , m_1 es un coeficiente para la conversión en altura de agua ($0,026 \text{ cm dia}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ m}^2$), ρ_a es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire, C_h es el factor de estabilidad atmosférica para calor turbulento sensible, u_a es la velocidad del viento, L es el calor latente de sublimación, P_a es la presión atmosférica, C_e es el factor de estabilidad atmosférica para calor latente (asumido igual a C_h), e_a es la presión de vapor del aire y e_s es la presión de vapor saturada del aire.

El equivalente en agua se calculó mediante la Ecuación 5-5.

$$\text{SWE}_0 = \sum_{j=1}^n (M_j * \text{SCA}_j) \quad \text{Ecuación 5-5}$$

Donde SCA_j corresponde a la cobertura nival binaria semanal, M_j corresponde al derretimiento y SWE_0 es el equivalente en agua de nieve.

5.3 Modelo balance de masa y escorrentía

TOPKAPI proviene de las siglas en inglés "Topographic Kinematic Wave Approximation and Integration", el cual fue desarrollado en base al modelo ARNO (Todini, 1996). Es un modelo hidrológico de base física espacialmente distribuido el cual puede utilizarse para el estudio del intercambio de masa y energía entre glaciares y la atmósfera. Existen diferentes versiones de TOPKAPI como la que presenta Finger et al., (2011). En TOPKAPI es posible identificar parámetros robustos que pueden ser transferibles a otras cuencas (Ragetti, 2012). TOPKAPI ha sido recientemente adaptado para incorporar un método de índice de temperatura para nieve y derretimiento de hielo.

TOPKAPI ha sido utilizado en pronósticos de inundaciones y más recientemente en la evaluación del balance hídrico en pequeñas y grandes cuencas, así como en zonas montañosas. El modelo simula todos los componentes importantes del balance hídrico y transforma los procesos de precipitación-escorrentía en ecuaciones de reservorios no lineales, las cuales representan el drenaje del suelo, flujo superficial y flujos de cauce.

La información sobre la rugosidad de la superficie y las características del suelo se obtiene comúnmente de modelos de elevación digital, mapas del uso de tierras y mapas de suelo.

TOPKAPI usa el enfoque de onda cinemática para simular el flujo subsuperficial, flujo superficial debido a la saturación y flujos canalizados (Todini y Ciarapica, 2001). En su forma original TOPKAPI ha sido aplicado en varios caso de estudio como en Italia por Ciarapica y Todini (2002), Suiza por Foglia et al., (2009), China por Liu et al., (2005) y Sudáfrica por Sinclair y Pegram (2010), (Finger et al., 2011).

TOPKAPI ha sido modificado extensamente en aplicaciones sobre cuencas montañosas. El modelo original de TOPKAPI ha sido largamente modificado para aumentar su aplicabilidad en cuencas de alta montaña y con glaciares (Finger et al., 2011). Algunos componentes como el del derretimiento de nieves, de hielo y generación de escorrentía de glaciar han sido incorporados en el trabajo de Pellicciotti et al. (2005). El deshielo es computado usando un índice mejorado de temperatura (ETI por sus siglas en inglés, Enhanced temperature index) que incorpora el balance de radiación de onda corta (Pellicciotti et al., 2005, 2008).

Ragetti y Pellicciotti (2012) probaron TOPKAPI en la cuenca del Río Juncal, el cual consta de glaciares de importancia en el régimen hidrológico de la cuenca del Río Aconcagua, similar a como ocurre con la cuenca del Estero Morales y Pirámide con la cuenca del Río Maipo. Ambas cuencas tienen un clima similar de alta montaña. El modelo fue aplicado exitosamente en esta cuenca. Se evaluó la transferibilidad de los parámetros en el tiempo y espacio, aplicando el modelo en dos escalas espaciales. La habilidad de TOPKAPI para simular los procesos relevantes fueron testeados con la meteorología, ablación y escorrentía del glaciar Juncal Norte durante dos temporadas de ablación siendo exitosa su aplicación. Debe notarse que los parámetros del modelo de derretimiento son transferibles de una sesión a otra, mientras que los parámetros que gobiernan la extrapolación de las variables meteorológicas de entrada y el seguimiento del derretimiento del glaciar necesitan de recalibración de una estación del año a otra.

Un esquema del funcionamiento de TOPKAPI puede verse en la Figura 5-2.

- Con la estadística de precipitación 2000-2001 se construyó una serie correspondiente a un año promedio. Esta serie fue ajustada por un factor de 0,7 debido a los informes regionales de la Dirección Meteorológica de Chile (2012), que señala que el año 2012 fue en promedio un 30% más seca que lo normal para Chile central. Para desagregar temporalmente los eventos de tormenta se consideró que estos ocurrirían concentrados en un pulso de duración 1 hora a las 13:00 de cada día.
- En el caso de las temperaturas, se contó con un registro de temperaturas horarias en la estación Panimávida en los periodos 01/01/2012 a 01/07/2012 y 11/10/2012 a 10/12/12, con lo que se extrapolaron los datos mediante correlación con la información disponible del embalse El Yeso en el periodo concurrente para obtener la serie faltante.

Con los supuestos anteriormente mencionados se logró obtener una simulación en el periodo 01/01/2012 a 10/12/12. Cabe señalar, que debido a los inconvenientes tenidos con la batería en la estación Panimávida en el periodo faltante, la falla en el monitoreo de eventos de precipitación de la misma estación (No se transmiten correctamente en línea) y el no haber podido contar con información adicional del Embalse El Yeso no permitieron contar con la información necesaria para una ejecución más adecuada y realista del modelo.

Por otro lado, los parámetros físicos y atmosféricos utilizados para la modelación corresponden a los utilizados por Ragettli y Pellicciotti (2012), quienes modelaron la cuenca del río Juncal en Juncal entre los periodos 2005/06 a 2008/09.

6. Resultados

6.1 Modelos de derretimiento

A partir de la información de balizas del glaciar San Francisco se estimaron los coeficientes del método grado-día (GD) e Índice de Temperatura Mejorado (ITM). Estos coeficientes se presentan en la Tabla 6-1. Los coeficientes se estimaron primero de manera específica para cada terraza glaciar donde se contaba con datos, y luego se promediaron para representar el total del área glaciar. Evidentemente esto induce un sesgo pues no se representa adecuadamente la terraza inferior, que debería presentar un comportamiento diferente al quedar expuesto el hielo antes que en las terrazas superiores. De todos modos, se observa bastante robustez en la estimación de los parámetros del método GD, con un factor aproximadamente igual a 12 mm/°C-d. Este factor es aproximadamente el doble de lo estimado por Pellicciotti et al. (2008) en el glaciar Juncal Norte. Los coeficientes del método mejorado son 8,91 y 0,079, respectivamente, lo que implica una moderación del efecto de temperatura respecto al método simplificado al incorporarse el efecto de la radiación como modulador del derretimiento. Por cierto estos coeficientes representan una estimación preliminar y están sujetos a diversas fuentes de incertidumbre, que incluyen la dinámica del balance de energía del manto nival a medida que avanza la temporada de derretimiento.

Tabla 6-1: Parámetros modelos de derretimiento glaciar San Francisco

Método	Terraza media			Terraza Alta			Promedio		
	DDF/TF ⁶	SRF ⁷	Ta ⁸	DDF/TF	SRF	Ta	DDF/TF	SRF	Ta
	mm/°C-d	mm/W-m ²	°C	mm/°C-d	mm/W-m ²	°C	mm/°C-d	mm/W-m ²	°C
GD	11,17	-	2,20	14,39	-	1,41	12,93	-	1,80
ITM	6,93	0,113	2,20	10,89	0,044	1,41	8,91	0,079	1,80

En el caso del glaciar Pirámide, los coeficientes de los modelos se estimaron a partir del derretimiento total del glaciar estimado a partir de los aforos realizados en el Estero El Yeso y la correlación de estos caudales con los caudales observados en otras estaciones

⁶ DDF: Degree day factor, TF: Temperature factor

⁷ SRF: Solar Radiation Factor

⁸ Ta: Temperatura del aire

fluviométricas durante el período de análisis. Se observa un valor mucho menor del coeficiente de derretimiento del modelo simple en comparación con los valores obtenidos para el glaciar San Francisco. En el caso del modelo mejorado, el factor de temperatura es menor, el de radiación es similar al obtenido en San Francisco, y la temperatura umbral es más alta. Ante condiciones atmosféricas similares (similar rango de elevaciones, orientación espacial, etc.), esta diferencia en los coeficientes da cuenta de las disímiles características energéticas de ambos glaciares, producto de i) la mayor acumulación de nieve sobre el glaciar San Francisco, y ii) la cubierta de detrito sobre el glaciar Pirámide.

Tabla 6-2: Parámetros modelos de derretimiento glaciar Pirámide

Método	Promedio		
	DDF/TF mm/°C-d	SRF mm/W-m ²	Ta
GD	1,96	-	5,78
ITM	0,719	0,071	5,78

6.2 Estimación acumulación inicio temporada

La estimación de la acumulación inicial de la temporada de derretimiento sobre ambos glaciares se llevó a cabo tomando en cuenta i) los datos de balizas en el glaciar San Francisco, y ii) los modelos de derretimiento calibrados para cada glaciar en la subsección anterior.

6.2.1 Reconstrucción glaciar San Francisco

En la Figura 6-1 el modelo (a) es el grado-día mientras que el modelo (b) es el grado-día mejorado que utiliza la radiación. M1 hace referencia al modelo desarrollado en la cercanía de la estación San Francisco Superior. Por su parte TA y TM se refieren a las temperaturas usadas de la estación AWS y 3 niveles respectivamente. La reconstrucción se hace de manera retrospectiva, tomando como dato inicial la estimación de EA al final del período de análisis y sumando la energía/derretimiento acumulado estimado a partir de los datos de temperatura y radiación.

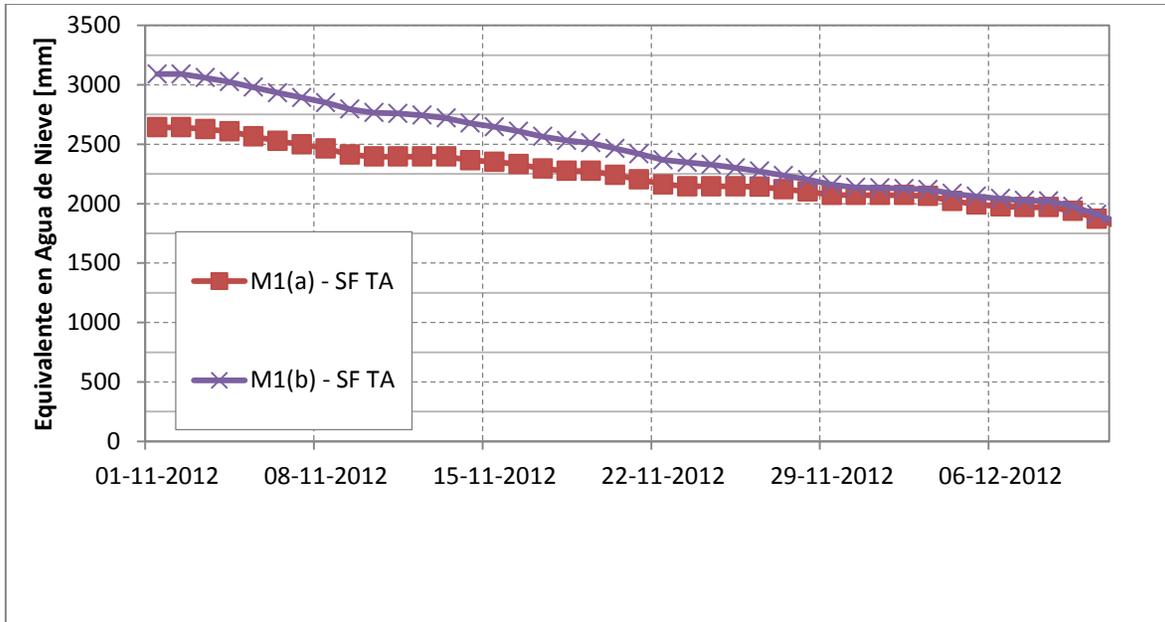


Figura 6-1: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve para el glaciar San Francisco en zona alta (3800 msnm).

En la Figura 6-2 el mismo modelo anterior se corre para la zona media del glaciar donde su ubica la estación de 3 niveles.

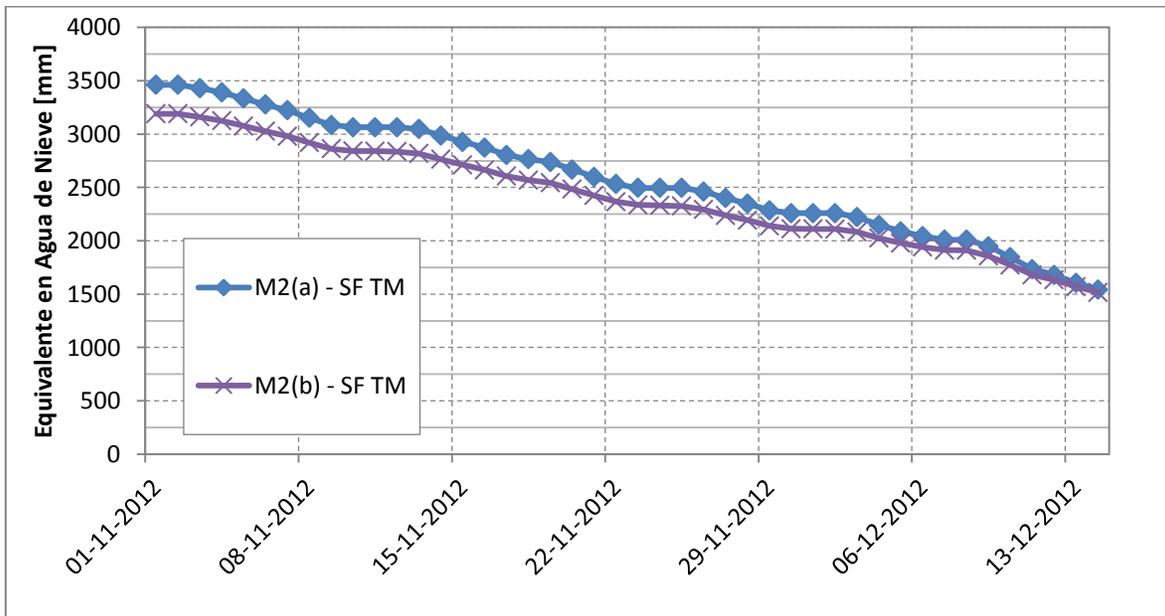


Figura 6-2: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve para el glaciar San Francisco en zona media (3500 msnm)

Puede verse que el modelo GD (M1(a)) arroja una acumulación inicial de 2600 mm aproximadamente, mientras que el modelo ITM (M1(b)) arroja una acumulación mayor, de aproximadamente 3200 mm en la terraza alta del glaciar. Por el contrario, esta relación se invierte al calcular la acumulación en la terraza media, donde el modelo GD estima una mayor acumulación que el modelo ITM (580 mm de diferencia). Los modelos además permiten cuantificar el derretimiento acumulado de la temporada, obteniéndose un mayor valor para la terraza media, como es de esperar dada la diferencia de elevación/temperatura.

6.2.2 Reconstrucción glaciar Pirámide

a) Reconstrucción basada en caudal

En el caso del glaciar Pirámide no se instalaron balizas, ya que a la fecha en que se realizaban las operaciones, la cobertura nival era escasa. Nótese que la estación meteorológica portátil fue situada en una zona sin nieve.

Una medición aproximada puede tenerse de la estación meteorológica de 3 niveles que al momento de visitarla se presentaba cubierta por nieve por debajo del nivel de 2 m, con una altura aproximada de 1m, tal como se aprecia en la Figura 4-6. Para el terreno del 14 de Diciembre de 2012 ya no se registraba nieve en esta estación, por lo que es posible determinar en este punto el descenso de nieve en la parte alta de la cuenca.

Una reconstrucción en equivalente en agua de nieve puede llevarse a cabo considerando que el derretimiento del glaciar puede ser estimado gruesamente con el caudal a la salida de la cuenca en este caso en particular, esto debido a que el glaciar cubre gran parte de la cuenca y está ubicado principalmente donde se da la mayor acumulación de la cuenca. La Figura 6-3 muestra este otro modelo de reconstrucción basado en el método grado-día (GD) (a) y grado-día mejorado (ITM) (b). En esta cuenca solo se disponen de datos antes del 13-11-2012 en la estación de 3 niveles, fecha en que el equipo de la Universidad de Chile extrajo la tarjeta de memoria con los datos recopilados, y después del 15-11-2012 en la estación AWS, fecha en que se instaló la estación meteorológica portátil. Por esto se procedió a correr el modelo con solo una serie de tiempo combinada por ambas estaciones. La serie de temperatura de la estación de 3 niveles fue llevada a una temperatura equivalente para la estación meteorológica portátil igualando las

temperaturas promedios de ambas estaciones considerando el gradiente que existe entre ambas.

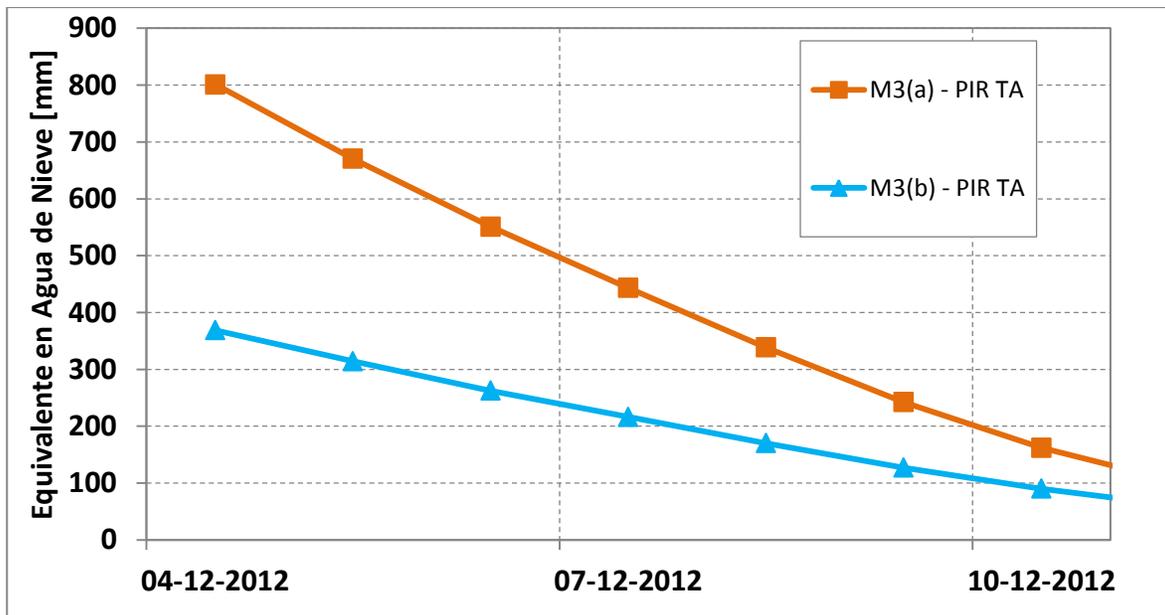


Figura 6-3: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve utilizando el caudal de la estación fluviométrica del Estero El Yeso en Termas del Plomo.

La única comparación posible de analizar es con la altura de nieve que presentaba la estación meteorológica de 3 niveles en el glaciar Pirámide. Este valor a la fecha del 14-11-2012 era de 1m aproximadamente según se constata en la Figura 4-6. Considerando una densidad similar a la medida en el glaciar San Francisco cuando se hizo la calicata (550 gr/lit) se obtiene un equivalente en agua de 550 mm. Este valor comparado con la Figura 6-3 se muestra bajo en comparación a lo que predice el modelo, ya que un modelo para el día 04-12-2012 predice 800 y el segundo (b) cerca de 350 mm, luego si se hace la proyección es muy probable que exista un equivalente en agua mayor al tomado solo con el punto de la estación de 3 niveles. Por consiguiente, se concluye que para el período analizado el caudal observado en el Estero Yeso debe provenir de una combinación de derretimiento de nieve estacional y masa de hielo del glaciar. Para verificar esta hipótesis, se reconstruye el equivalente en agua mediante el método de balance de energía con imágenes MODIS, como se explica a continuación.

b) Reconstrucción basada en imágenes MODIS

La reconstrucción con imágenes MODIS se llevó a cabo con las consideraciones que se muestran en la Tabla 6-3, donde se muestran los días julianos de las fechas consideradas en la división semanal propuesta, la radiación potencial calculada con GrassGis, la cobertura nival obtenida de las imágenes satelitales, el índice de nubosidad, el gradiente de temperatura y la temperatura base.

Tabla 6-3: Información de la reconstrucción semanal

Reconstrucción Satelital Pirámide							
FECHA	SEMANA	JULIANO MEDIO	Ghc	Ghr	KC medio	Grad TA	Ta base
1/11 al 8/11	A	309	405	375	0,93	-0,0061	5,9
9/11 al 16/11	B	317	415	395	0,95	-0,0060	4,4
17/11 al 24/11	C	325	425	287	0,67	-0,0073	4,0
25/11 al 2/12	D	333	435	197	0,45	-0,0068	3,5
3/12 al 10/12	E	341	440	217	0,49	-0,0049	6,1

Con esta información se procesaron los datos para conocer la distribución espacial de la nieve sobre el glaciar (Figura 6-5), la cual puede ser comparada con datos en terreno sobre el glaciar.

Los resultados del balance de energía semanal se presentan en la Figura 6-4. Puede verse la evolución de los cuatro componentes de transferencia de energía entre el manto nival y la atmósfera. Se observa que el derretimiento es controlado primordialmente por la energía de onda corta y calor sensible, mientras que la inercia del derretimiento es controlada por la radiación de onda larga y el calor latente. La evolución semanal de la energía de onda corta a priori no coincide con lo esperado. Esto se debe a la influencia del factor de nubosidad KC que da cuenta de la atenuación nubosa (factor calculado en base a la radiación teórica y la radiación observada en terreno). Es posible que los piranómetros no se encuentren bien nivelados en el periodo en estudio producto del movimiento que sufren los trípodes a medida que avanza el derretimiento nival. Por otra parte, los flujos de onda larga, calor sensible y latente dependen de la temperatura, la presión, y humedad relativa cuyos sensores no necesitan estar perfectamente nivelados y debieran estar correctos, aunque algún error podría generarse en la medición del viento.

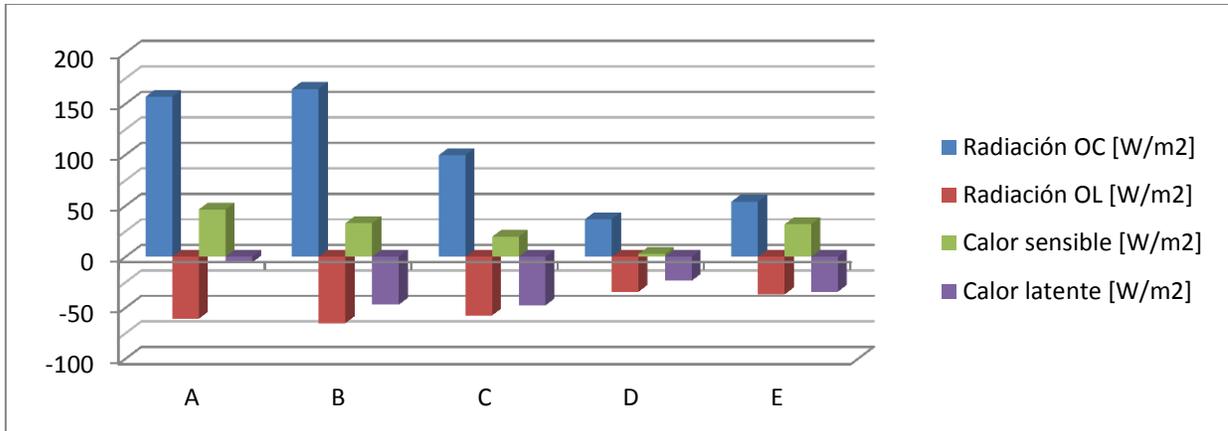


Figura 6-4: Balance de energía en glaciar Pirámide. OC y OL se refieren a onda corta y onda larga respectivamente.

El balance de masa reconstruido a partir de la energía total disponible para el derretimiento derivada del balance de energía se presenta a continuación.

La evolución de la máxima cobertura nival puede resumirse en la Figura 6-5. Existe una disminución en la cobertura hacia el mes de diciembre que se aprecia claramente en la figura, aunque hacia la primera semana de diciembre presenta un ligero incremento debido probablemente a precipitaciones en la parte alta de la cordillera, donde pudo existir un manto nuevo de nieve sobre los glaciares.

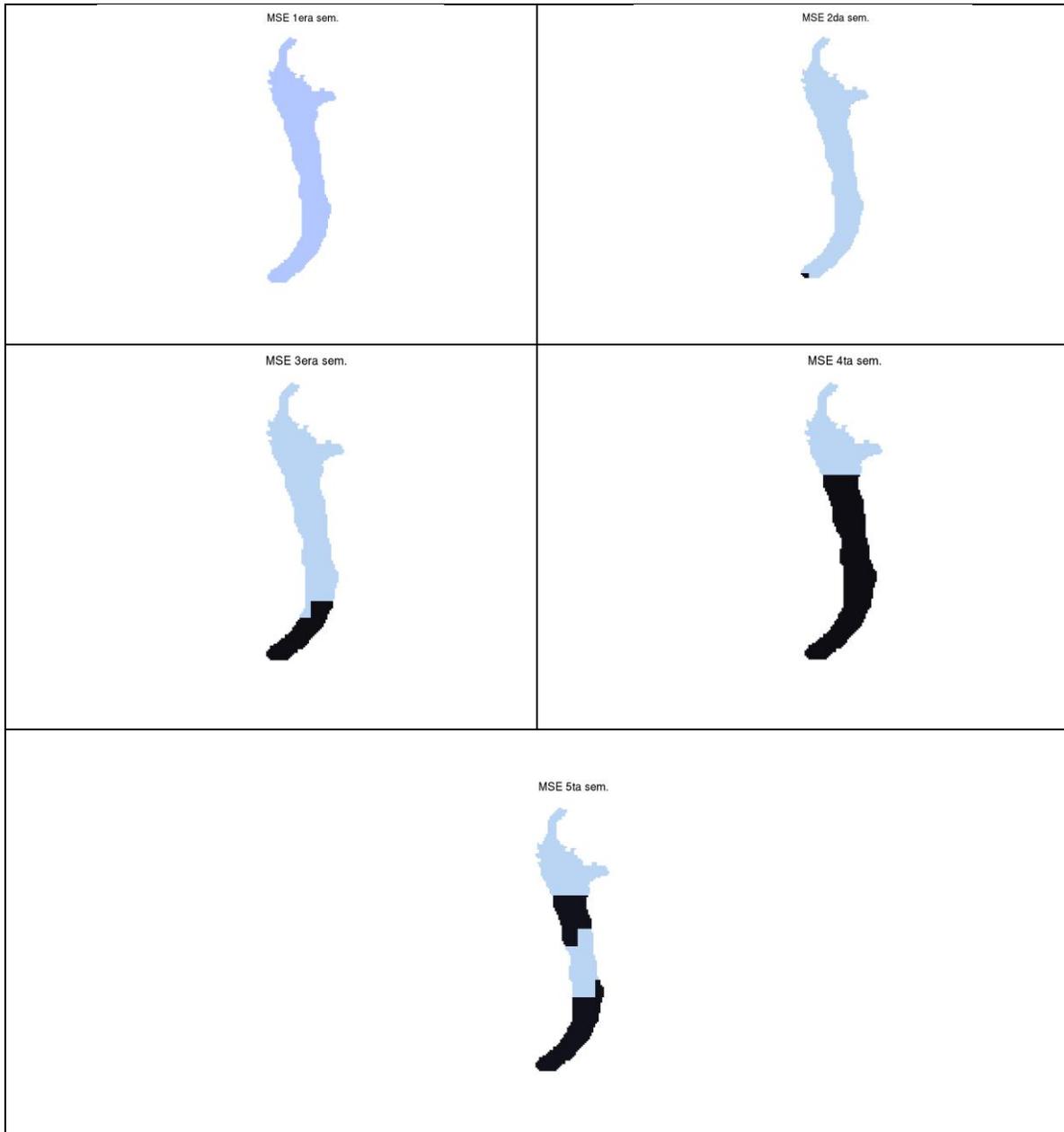


Figura 6-5: Máxima extensión de la cobertura nival para el glaciar Pirámide. El color celeste indica un valor 1 con presencia de nieve y el color negro un valor 0 con ausencia de nieve.

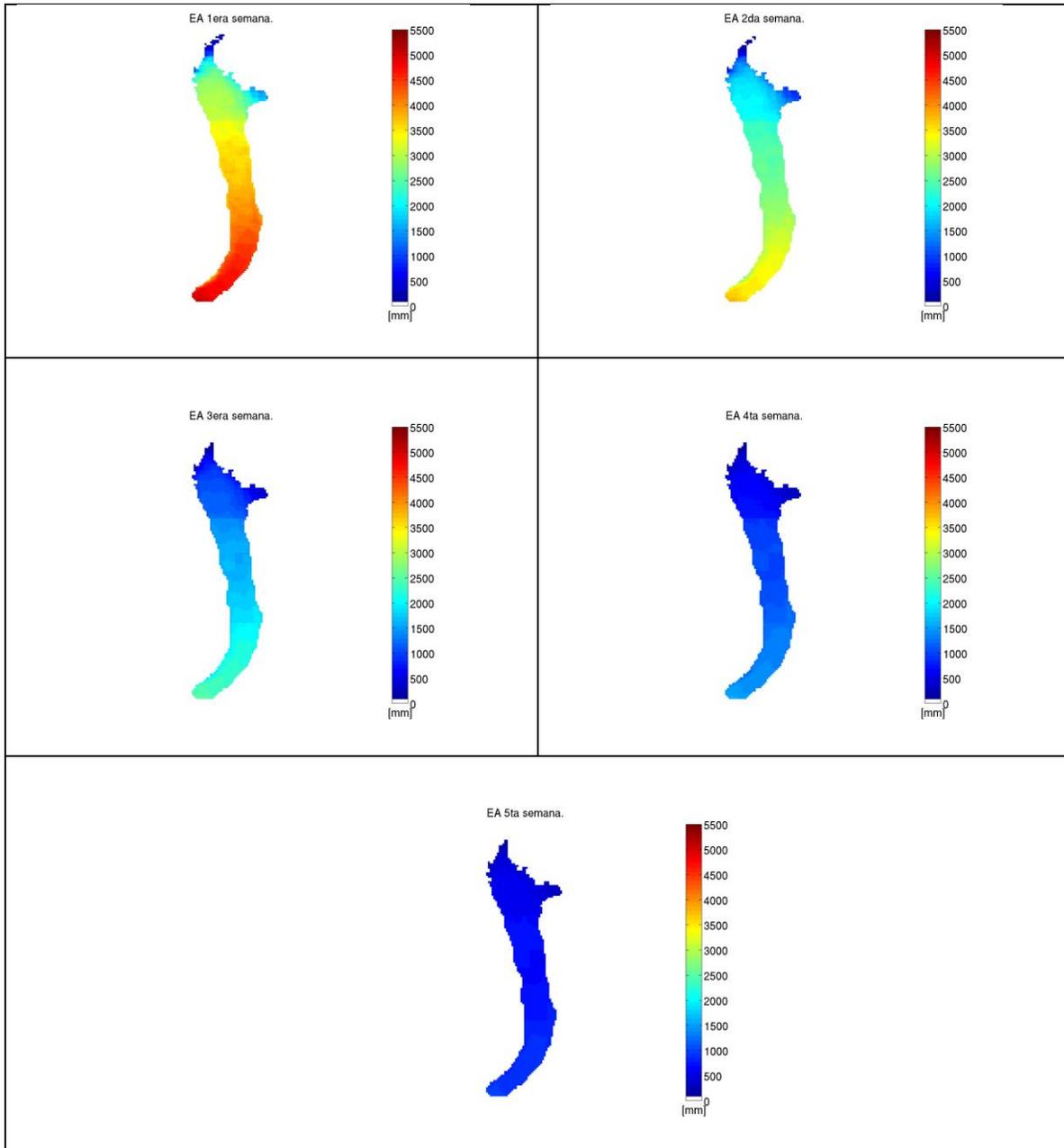


Figura 6-6: Reconstrucción del equivalente en agua de nieve para el glaciar Pirámide. Los resultados muestran en escala de colores la acumulación de equivalente en agua en mm para la superficie del glaciar.

La Figura 6-7 muestra las variables que pueden recuperarse del análisis de las imágenes satelitales. La temperatura media diaria se mantiene relativamente constante entre los 2 y 4 °C con una leve tendencia a la disminución, aunque para la última semana se aprecia un incremento hasta cerca de los 5°C. Por otra parte la cobertura nival presenta un pequeño aumento para la primera semana de diciembre con respecto a la última de noviembre debido posiblemente a alguna tormenta de verano

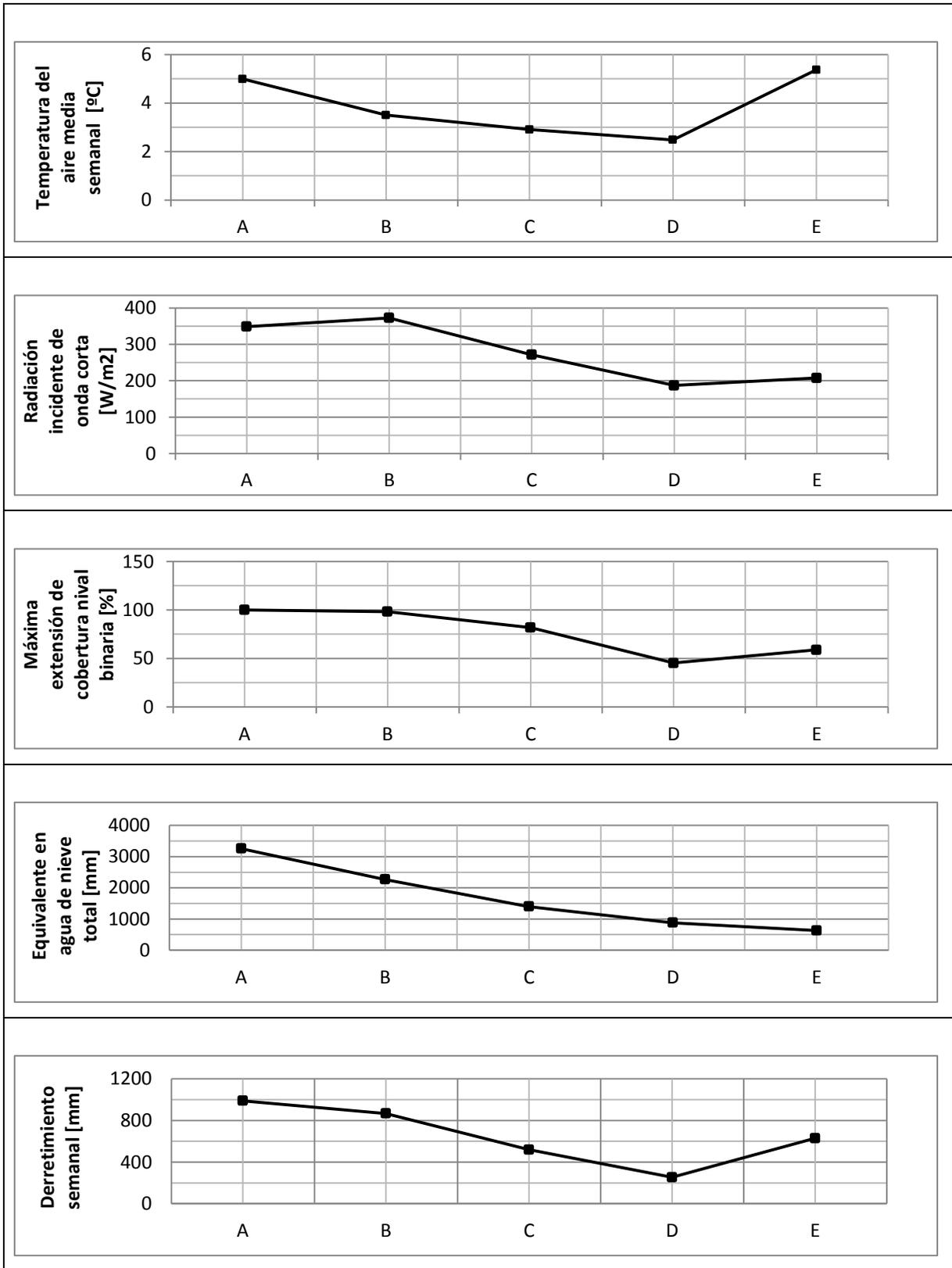


Figura 6-7: Distintas variables de las semanas de modelación con imágenes MODIS

A partir de esta reconstrucción se obtiene una estimación de la acumulación al inicio de temporada igual a 3.257 mm de equivalente en agua, promedio sobre la totalidad de la superficie del glaciar. Este resultado es coherente con la observación de acumulación en la estación de tres niveles, reportada anteriormente, ya que entre la semana B y C la cantidad varía entre 2,3 m y 1,4 m, lo que implica un resultado dentro del orden de magnitud. Además si se analiza la reconstrucción realizada mediante el caudal puede verse que para el 4 de diciembre se tiene una acumulación de 0,38 m y 0,8 m para cada modelo respectivamente, similar al resultado de la reconstrucción con imágenes satelitales donde para la semana E se tiene un equivalente en agua de 0,6 m.

6.3 Modelo balance de masa y escorrentía TOPKAPI

Se construyó un modelo hidrológico con consideración explícita del glaciar San Francisco usando el software TOPKAPI, explicado en secciones anteriores. El modelo simula los procesos de acumulación y derretimiento de nieve y hielo, así como otros procesos hidrológicos como la infiltración evapotranspiración, flujo subsuperficial y superficial. Como una forma de verificar la transferibilidad de los parámetros de TOPKAPI estimados a partir de observaciones en el glaciar Juncal Norte, se corrió el modelo con dichos parámetros (Pellicciotti et al., 2008).

Los parámetros utilizados por TOPKAPI son variados, pero los más importantes en la modelación y que fueron optimizados para la cuenca de Juncal son los que se resumen en la Tabla 6-4. Mayores especificaciones de los parámetros utilizados en el glaciar Juncal Norte y en general, en el modelo TOPKAPI puede encontrarse en Ragettli y Pellicciotti (2012).

Tabla 6-4: Parámetros ocupados en el modelo TOPKAPI

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor ocupado
β_{\max}	Determina la redistribución de la nieve debido al efecto de las laderas.	Tan($^{\circ}$)	0,9
P_T	Umbral de temperatura para distinguir entre precipitación sólida y líquida.	$^{\circ}\text{C}$	1,0
SRF	Factor de radiación de onda corta en método grado día mejorado.	$\text{m}^2 \text{ mm W}^{-2} \text{ h}^{-1}$	0,0105
TF	Factor de temperatura en método grado día mejorado.	$\text{Mm d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,0
T_T	Umbral de temperatura para el comienzo de derretimiento.	$^{\circ}\text{C}$	6,0
α_2	Parámetro para la caracterización del decaimiento del albedo en la nieve.	-	0,112
T_{grad}	Parámetro del gradiente de temperatura.	$^{\circ}\text{C m}^{-1}$	0,0065
T_{mod}	Temperatura disminuida sobre una superficie de glaciar	$^{\circ}\text{C}$	2,86
K_{ice}	Coefficiente de almacenamiento de derretimiento de hielo en el reservorio glaciar.	h	40,0
K_{snow}	Coefficiente de almacenamiento de derretimiento de nieve en el reservorio glaciar.	h	200,0

La Figura 6-8 y Figura 6-9 muestra la comparación de los modelos de derretimiento construidos en función del método grado día simple y mejorado así como los obtenidos por el modelo TOPKAPI para las balizas ubicadas en las terrazas medias y alta del glaciar San Francisco. Puede verse que el modelo, subestima la ablación acumulada por un factor de 2 respecto de los modelos de derretimiento calibrados en este estudio, lo que es consistente con el análisis de los coeficientes de los modelos presentados en secciones anteriores. No es posible modelar aun con los datos de las estaciones del glaciar San Francisco, porque TOPKAPI necesita un largo periodo para estabilizarse (periodo warm-up) y este fue generado con datos históricos de la estación del Embalse El Yeso hasta fines del 2011. Una vez que este "estado de la cuenca" se guarda, se prosigue con la modelación con datos de la Estación Panimávida. Para poder incorporar las estaciones sobre los glaciares es necesario tener datos en el mismo periodo de tiempo que Panimávida y que estos estén presentes en todo el periodo de modelación, o al menos en la misma temporada, y como TOPKAPI modela anualmente las cuencas, no se dispone de esta cantidad de datos en las estaciones meteorológicas sobre los glaciares.

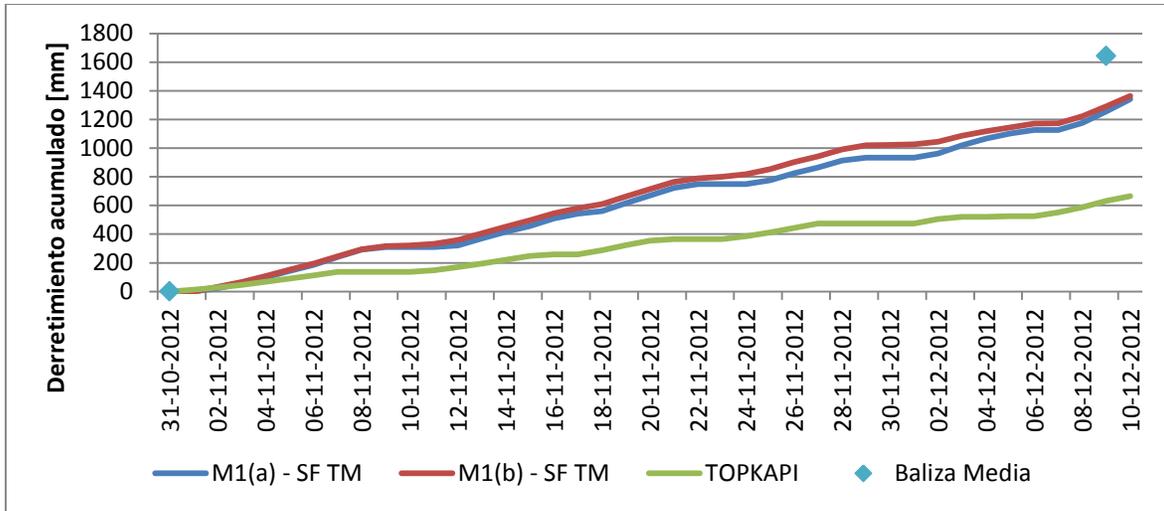


Figura 6-8: Derretimiento acumulado del equivalente en agua para la parte media del glaciar San Francisco, en la baliza situada a 3320 msnm.

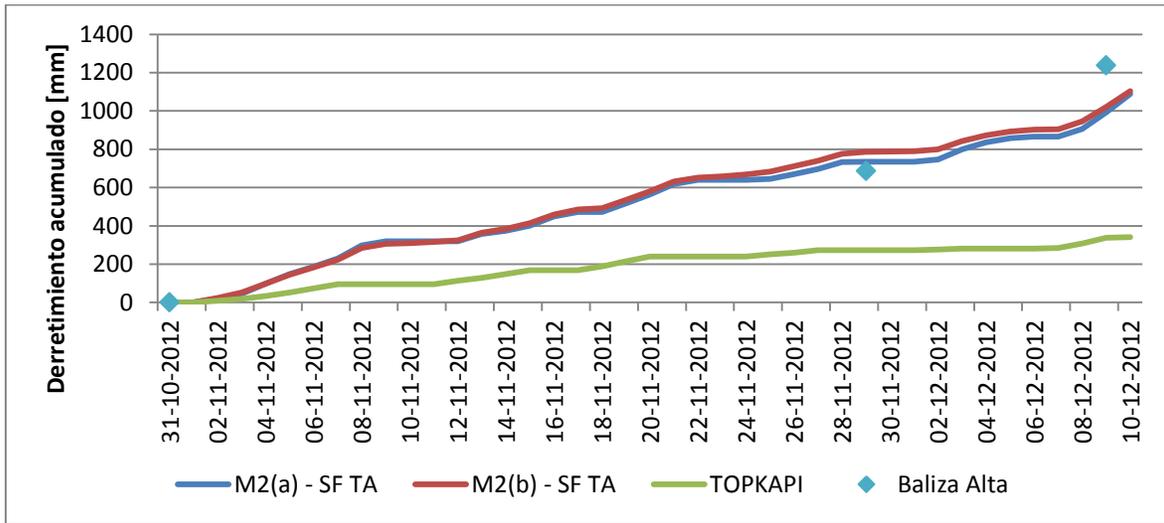


Figura 6-9: Derretimiento acumulado del equivalente en agua para la parte alta del glaciar San Francisco, en la baliza situada a 3677 msnm.

La Figura 7-9 muestra la estimación de caudal de escorrentía simulado al pie del glaciar San Francisco por el modelo TOPKAPI. Se aprecia una correcta reproducción del ciclo diario de caudales, así como variaciones semanales consistentes con la meteorología de la zona durante el período de estudio. La magnitud de los caudales (en torno a los 500 l/s),

es menor que la magnitud estimada en el Estero Morales en Puente Conaf a partir de los aforos realizados. Esto tiene dos explicaciones, que incluyen la diferencia en área aportante y las fuentes de agua aportantes a la estación fluviométrica, que incluyen el derretimiento de nieve estacional en la cuenca intermedia entre el glaciar y la sección de aforo. Adicionalmente, los caudales estimados por el modelo TOPKAPI están afectados a la menor tasa de derretimiento debido a la diferencia entre los parámetros del modelo, calibrado con datos del glaciar Juncal Norte.

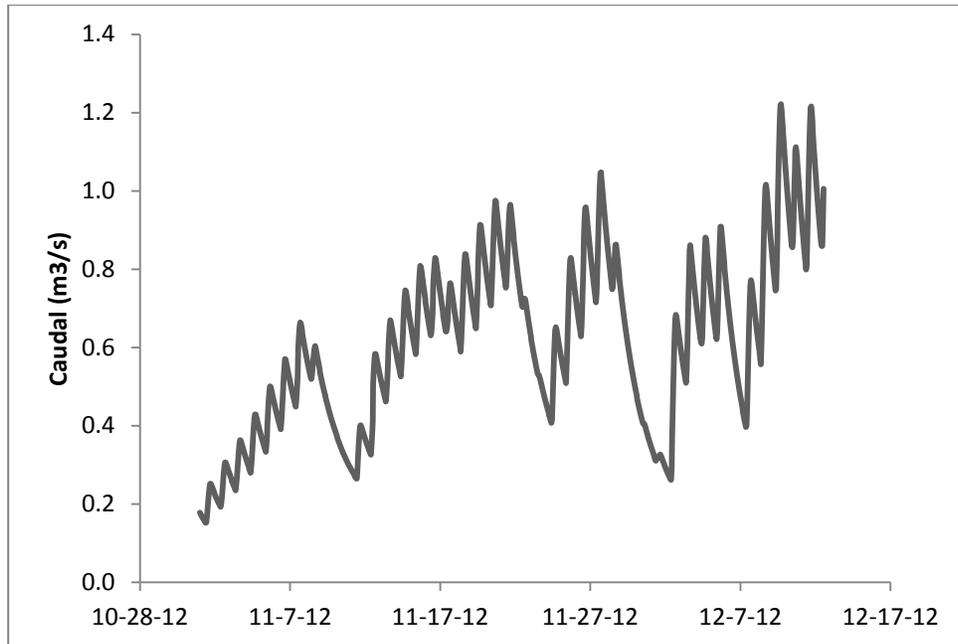


Figura 6-10: Caudal total de derretimiento horario modelado por TOPKAPI para el glaciar San Francisco.

6.4 Balance de masa en glaciares del periodo en estudio

Para realizar el balance de masa se consideran los flujos de entrada (V_e) y salida (V_s) del sistema por unidad de tiempo, así como la variación de masa en el sistema ($\Delta S/\Delta t$). El balance puede verse en la Ecuación 6-1.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} + V_s = V_e \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Los volúmenes de entrada pueden quedar representados por las mediciones de precipitación, balizas sobre el glaciar, sensor de altura de nieve o snowpillow, mientras que las salidas pueden ser registradas por el caudal de alguna estación fluviométrica.

6.4.1 Glaciar Pirámide

Se calculó el balance de masa en la salida del glaciar Pirámide, para el periodo 01/11/12 y 10/12/12, debido a que no hubo entradas significativas registradas de precipitación. Se consideró como almacenamiento inicial aquel obtenido por la reconstrucción del equivalente en agua mediante las imágenes MODIS igual a 3.257 mm sobre el glaciar. Para las salidas se utilizó la estadística de caudales registrados en la estación Estero Yeso en Termas del Plomo los cuales fueron llevados a caudal del glaciar Pirámide, extendidos en función de los registros de temperatura y aforos en la zona.

Considerando que el área del glaciar Pirámide es de 6,4 km² se tiene que la acumulación para la primera semana de noviembre es de 20,85 millones de m³. Por otro lado, al estudiarse los caudales rellenados para el periodo en estudio se obtiene que el volumen de agua que salió del glaciar fue de 3 millones de m³. Por lo tanto, el balance de masa indica un volumen positivo de 17,85 millones de m³. Debe notarse que los procesos de salida del agua desde el reservorio glaciar son lentos y es probable que mucha del agua que precipitó de forma sólida aún no se haya expresado en el caudal. De hecho, es efectivo que los mayores caudales se dan en los meses de diciembre y enero, los cuales aún no han sido registrados en plenitud. Por lo tanto, el balance debiera establecerse en los periodos de abril – septiembre y/o octubre – marzo. Este valor está sujeto a una mayor incertidumbre que el estimado para el glaciar San Francisco, por cuanto la información básica es más limitada.

6.4.2 Glaciar San Francisco

El balance de masa sobre el glaciar San Francisco puede ser calculado con las balizas instaladas. Considerando una densidad de 440 gr/lt como la estimada para la fecha 01/11/2012 según interpolación con otra calicata efectuada en la Cuenca del Estero Morales, en campañas de invierno en el marco de proyectos con la DGA – RHMA (2012) , y considerando que la calicata sobre el glaciar en Diciembre registró una densidad media de 550 gr/lt se tomará una densidad promedio de 500 gr/lt para el día 10/12/2012.

Luego el derretimiento en equivalente en agua de nieve para la terraza alta resulta en 1.500 mm, mientras que para la terraza media es de 1.455 mm. Por lo tanto, en promedio en el glaciar, el balance de masa indica que al menos restan 1.478 mm en equivalente en agua de nieve. El área del glaciar San Francisco, calculado con GrassGis es de 2,19 km², por lo tanto el balance de masa entrega que hasta el periodo en estudio se tiene una acumulación neta de 3,2 millones de m³.

6.5 Análisis de la respuesta de glaciares frente a condiciones climáticas actuales

La zona en estudio se encuentra inserta en la Región Metropolitana en la cordillera de Los Andes de Chile Central, lugar donde existe una escasa información meteorológica dado que la mayoría de las estaciones meteorológicas se encuentran en la depresión intermedia y cercanas a la costa (Cartes, 2009). El clima en Los Andes de Chile Central se define como semi-árido, caracterizado por una estacionalidad pronunciada donde el agua de los ríos proviene principalmente del derretimiento de nieve y glaciares en verano, mientras existe casi una nula presencia de precipitaciones (Pellicciotti, 2008).

En zonas de mediana, altura cercanas a los 2000 msnm, se tiene un clima templado cálido, con precipitaciones en época de invierno, y una estación seca prolongada. En alturas superiores a los 2000 msnm el clima cambia, teniendo una estación seca más corta, con precipitaciones en meses de primavera y otoño, y la presencia de algunas tormentas convectivas en verano. Existe también la presencia de una alta radiación en la zona, la cual tiene una alta correlación con la temperatura (DGA-RHMA⁹, 2011). En Chile central, las precipitaciones medias en zonas altas puede alcanzar los 1000 mm y, en general, se da de manera sólida (Cortes, 2010).

Con respecto a la variabilidad climática que ha experimentado la zona, Cartes (2009) señala en su estudio un resumen del estudio de Aceituno et al. (1992) donde se señala lo siguiente:

“En relación a la precipitación durante el siglo XX se verificó una significativa disminución de esta variable en la región subtropical de Chile. En la Región entre 30°S y 39°S se aprecia el dominio de una tendencia negativa hasta aproximadamente 1970. El aumento de la frecuencia de inviernos relativamente lluviosos en décadas posteriores contribuyó a revertir la tendencia decreciente en esta región. Durante el periodo 1970-2000, la precipitación se mantuvo aproximadamente estacionaria en las regiones IV, V y Metropolitana (30°S y 33°S). En general el ciclo anual sigue la declinación solar con meses invernales con menor temperatura de los de verano particularmente en latitudes mayores. Resultados preliminares sugieren que el régimen térmico superficial, en la región comprendida entre Santiago y Concepción, ha sufrido aumentos de +0,05

⁹ DGA: Dirección General de Aguas, RHMA: Recursos y Medio Ambiente Hídrico

°C/década y de +0,18 °C/década en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima, respectivamente”.

Variaciones históricas en el volumen de los glaciares han sido contabilizados anteriormente en otros estudios (Le Quesne, 2009). Rivera et al. (2000) estudió más de 100 glaciares donde concluyó que cerca del 87% de estos registraron una disminución en su masa, donde detectó que uno de los mayores factores que influyen en este comportamiento es el aumento de temperatura registrado en estaciones meteorológicas, ubicadas a lo largo del país, fenómeno asociado posiblemente a la variabilidad climática capturada años antes en el estudio de Aceituno et al. (1992). Debe notarse que la variabilidad interanual producto de fenómenos como el Niño o la Niña tienen influencia directa sobre el comportamiento de los glaciares. Nótese el estudio de Escobar et al. (1995) en el glaciar Echaurren, donde registró un balance de masa positivo producto de la presencia del fenómeno del Niño en la zona, para los años de estudio. Por tal motivo, es importante realizar los estudios en un periodo de tiempo que permita incorporar toda la variabilidad climática propia de la zona, de modo de no tener un resultado de balance de masa influenciado por un fenómeno que sólo ocurre en ciertos años y no refleja el comportamiento promedio de una década por ejemplo.

La información recopilada de temperatura y radiación para el periodo en estudio muestra una variación entre los 4 y -7°C aproximadamente para el glaciar San Francisco, lo que evidencia que existen periodos favorables para la entrega de masa del glaciar, reflejado en el aumento de caudal, pero también existen periodos desfavorables para el derretimiento. Con respecto a este último punto, se aprecian periodos en donde la temperatura registra una disminución en conjunto con la radiación como sucede el 10 de noviembre, donde esto se debe posiblemente a la presencia de cielos cubiertos y condiciones frías. Por otra parte, se presencia hacia el 30-11-2012 una condición donde no se correlaciona la radiación con la temperatura medida en ambas estaciones. Es probable que esto se deba fenómenos convectivos sobre el glaciar, donde existe presencia de nubosidad, pero con temperaturas altas y una humedad relativa importante (cerca al 100% según registrado por la estación AWS el día 29 de noviembre para algunas horas del día) lo que genera condiciones óptimas para caudales mayores o eventos extremos como aluviones, aunque no necesariamente se tenga la ocurrencia de estos.

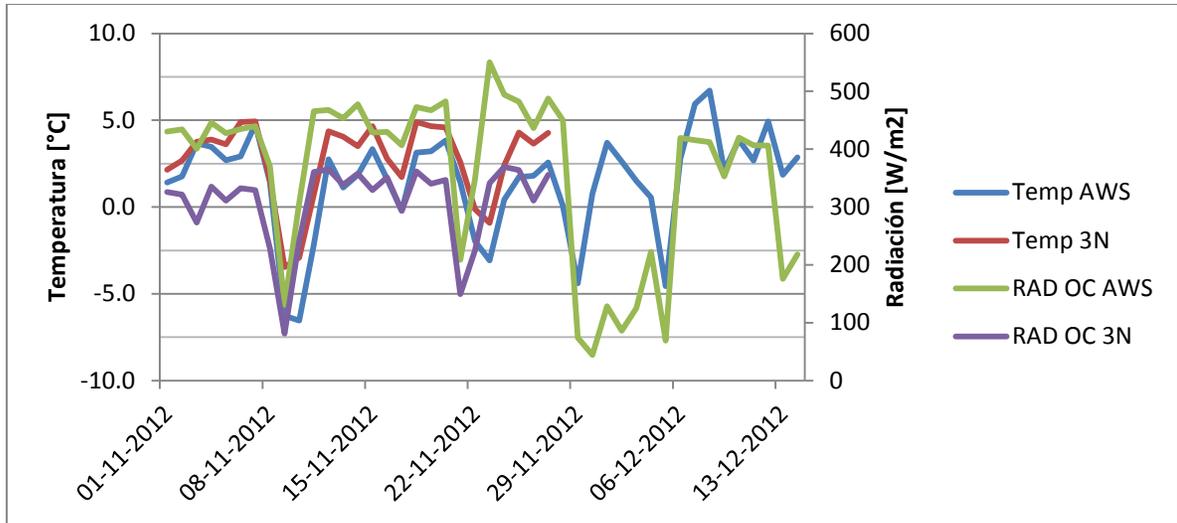


Figura 6-11: Variación de radiación y temperatura en glaciar San Francisco

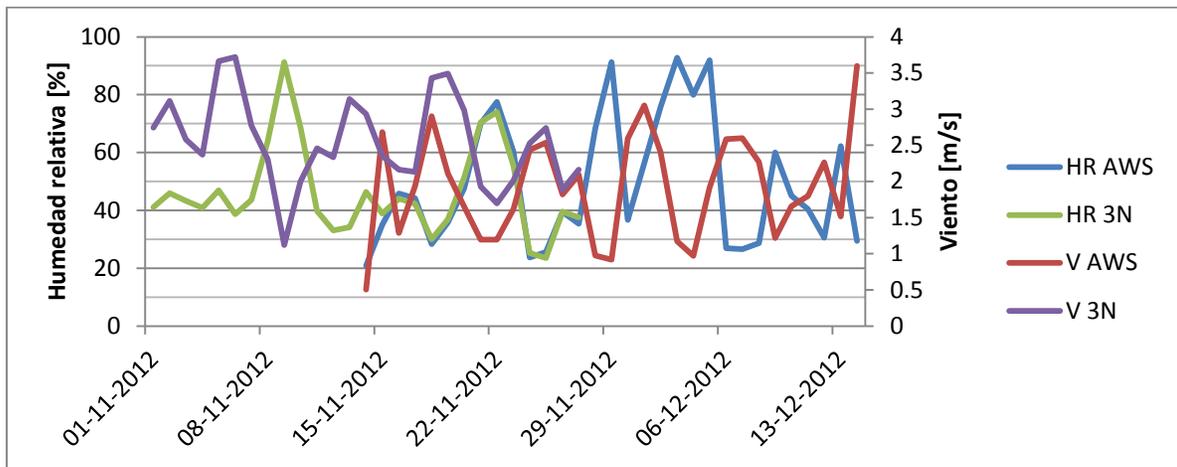


Figura 6-12: Variación de la humedad relativa y velocidad del viento en el glaciar San Francisco

En el glaciar Pirámide el registro es menor, debido a que las estaciones meteorológicas entraron en operación posterior a las estaciones del glaciar San Francisco. No obstante la baja en temperatura registrada por las estaciones meteorológicas del glaciar San Francisco el 9 y 10 de noviembre también es registrada por la estación de 3 niveles del glaciar Pirámide. Para el 29 y 30 de noviembre también puede apreciarse cierta tendencia a existir una radiación baja y una temperatura alta en el glaciar Pirámide, con la existencia de un pequeño peak que interrumpe esta tendencia, aunque la humedad relativa se mantiene cercana al 50%, lo que evidencia una condición más seca. Debe notarse también que en el trabajo de terreno del 30 de noviembre se presencié una capa de nieve fresca de unos 10 cm sobre el glaciar San Francisco (el cual presentaba una

cobertura de nieve dura superior a los 2 metros según lectura visual de una baliza) y una mínima presencia de nieve sobre el glaciar Pirámide con una alta exposición de los detritos que lo forman, hecho que apoya a los datos registrados por las estaciones meteorológicas y evidencia una diferencia en las entradas de precipitación que registran ambos glaciares, siendo más favorecido el glaciar San Francisco por sobre el glaciar Pirámide, lo que influirá directamente sobre el balance de masa, como ya se estableció en el capítulo anterior.

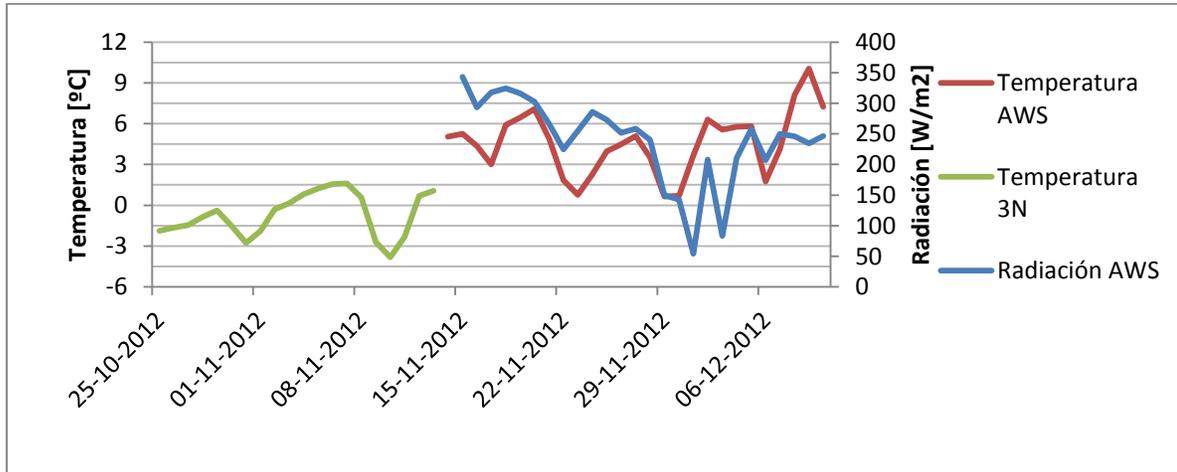


Figura 6-13: Variación de radiación y temperatura en glaciar Pirámide

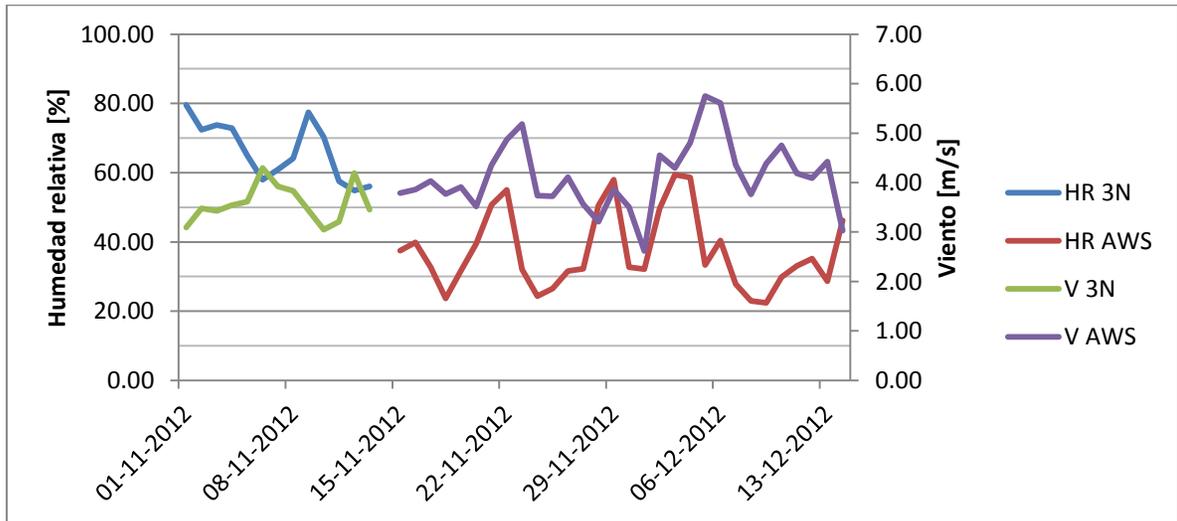


Figura 6-14: Variación de la humedad relativa y velocidad del viento en el glaciar Pirámide

La baja recolección de datos capturados hasta la fecha no permite hacer mayores inferencias acerca del comportamiento ambos glaciares y la dinámica del glaciar-atmósfera, producto de que los eventos de las características descritas anteriormente no se registran cada día, siendo necesaria una recolección más extensa de datos. Sin

embargo, es importante notar que fenómenos que ocurren en el glaciar San Francisco pueden ser vistos también en el glaciar Pirámide con cierta frecuencia y que las variables de temperatura no siempre están correlacionadas con la radiación mostrando el reflejo de distintos fenómenos atmosféricos que afectan finalmente en la entrega de masa en forma de caudal al río.

Para poder definir mejor el comportamiento de ambos glaciares es necesario establecer un monitoreo continuo y en un periodo de tiempo mayor al que se establece en el presente informe registrando datos en primavera, verano y la primera parte de otoño donde es posible entrar con mayor facilidad a la zona en estudio.

7. Conclusiones

Se implementó un programa de monitoreo meteorológico, hidrológico y glaciológico en las cuencas de los glaciares San Francisco y Pirámide, que permitió contar con datos para el último tercio del año 2012. A partir de los datos recopilados fue posible calibrar modelos de derretimiento, estimar la acumulación inicial de nieve sobre los glaciares, avanzar en la construcción de modelos de balance de masa y energía y finalmente, hacer estimaciones preliminares del balance de masa de estos glaciares en el período estudiado. A partir de las actividades realizadas se pueden enunciar las siguientes conclusiones.

La acumulación invernal (medida en altura de nieve) sobre el glaciar San Francisco es muy superior a la observada sobre el glaciar Pirámide, y muy superior a la acumulación medida por este Consultor en otras zonas de la Cordillera Central. Esta diferencia es atribuible a la disposición física del glaciar, en una garganta estrecha que concentra la precipitación nival sobre la superficie del glaciar. Estimaciones básicas indican que la acumulación para el 2012 fue al menos 5 veces mayor en el glaciar San Francisco respecto al Pirámide.

Los modelos de derretimiento calibrados muestran diferencias importantes en sus parámetros, tanto para los glaciares San Francisco y Pirámide, como comparados con los valores estimados en estudios previos sobre el glaciar Juncal Norte. Es necesario continuar la investigación sobre el origen de esta discrepancia, que tiene implicancias importantes sobre la transferibilidad de modelos y por consiguiente sobre la posibilidad de realizar modelaciones futuras a mayor escala espacial.

Se construyó un modelo hidrogliológico de la cuenca del Estero Morales, incluyendo el glaciar San Francisco. Este modelo se corrió con parámetros transferidos desde la cuenca del río Juncal en Juncal, con resultados promisorios en lo cualitativo, pero que requieren mayor refinamiento. Se espera que a medida que se recolecten mayores antecedentes durante el remanente de la temporada de deshielo 2012 (hasta marzo de 2013), será posible mejorar la calidad de las estimaciones realizadas hasta ahora.

Este estudio sienta las bases para un esfuerzo de mayor envergadura orientado a la modelación del balance de masas de glaciares en la cuenca del río Maipo. Los resultados

son acotados, dada la duración y alcance del estudio, pero promisorios respecto de las perspectivas futuras de investigación en esta área.

El presente estudio dejó una propuesta sobre la estandarización de las estaciones meteorológicas que se deseen colocar sobre un glaciar en la alta cordillera. Una estación sobre un glaciar debiera seguir las especificaciones antes señaladas en términos de los sensores, pero en particular, cuando es una estación portátil, en el sentido en que no está empotrada a la superficie y se desplaza de acuerdo al derretimiento de la nieve, debiera considerar como prioridad el trípode, pues es este el que le da la sustentabilidad a los instrumentos y permiten que estos estén a una altura en particular y nivelados, por lo tanto, la mayor dedicación debiera concentrarse en este punto. Por otra parte, fue visto que la acumulación en la estación de 3 niveles difiere de la del trípode. Esto es un punto a considerar en el diseño de próximos trípodes para estaciones de alta montaña.

Un estudio comparativo del derretimiento entre dos glaciares con distintas características en cuanto a su superficie (descubierta o cubierta) y tamaño se llevó a cabo. Esto con los datos obtenidos en ambas masas de hielo, la cual cuenta actualmente con dos estaciones meteorológicas sobre su volumen, funcionando normalmente, de acuerdo a lo especificado. Mediciones de caudal cierran la información necesaria para realizar este estudio. Con todos los datos recopilados pudo ser visto como en el glaciar San Francisco la nieve sobre el glaciar entrego la mayor cantidad de escorrentía, aunque el volumen no puede ser predicho con exactitud, mientras que en el glaciar Pirámide el glaciar jugó un papel más preponderante en la entrega de caudal dado que se encontraba descubierto. No obstante, estas mediciones deben ser refinadas en busca de cuantificar mejor la cantidad de escorrentía proveniente de glaciar o nieve y para ello se necesitan más estudios como los realizados por Rodríguez (2012) con el trabajo de hidroquímica e isótopos, información con la que es posible llevar una cuantificación del aporte de cada fuente.

La información recopilada de las estaciones meteorológicas permitió realizar el balance de energía sobre el glaciar Pirámide, el cual muestran un comportamiento atípico en el periodo de estudio, esto debido a que disminuye la radiación de onda corta a medida que transcurren las semanas. Se aprecia también que el neto de energía baja, lo que significa que existe un menor derretimiento sobre el glaciar. Esto posiblemente debido a la nubosidad de la zona. No obstante, los resultados debieran estudiarse en una escala temporal mayor para capturar los diversos fenómenos reinantes en la zona de estudio.

Distintos modelos de ablación fueron utilizados en el análisis. TOPKAPI por un lado se presenta como una herramienta útil para modelar glaciares, ya que puede incorporar gran cantidad de información, ya sea sobre variables atmosféricas, características del suelo, entre otras. No obstante, también se necesitan de una cantidad importantes de datos y lo más actualizados posibles, por lo que deben tenerse estaciones meteorológicas operando por un tiempo largo y continuo en el sitio en estudio. Esto hace que la modelación con TOPKAPI no sea del todo exacta, aunque es posible mejorar este modelo sustancialmente con los datos que se están registrando actualmente.

Los dos modelos de grados-día permiten modelar el derretimiento de manera más sencilla, sin embargo, estos necesitan de información de caudal y meteorología en el mismo tiempo, hecho que solo se tuvo en este estudio desde mitad del mes de noviembre en el Estero Morales y desde principios de diciembre para el Estero El Yeso. Esto genera que el periodo de modelación se vea en parte reducido y tenga que esperarse el procesamiento de nuevos datos, como los que a la fecha de entrega de este informe se están registrando.

En el periodo estival se pudieron registrar mediciones y realizar modelaciones básicas al final del periodo estipulado. Estas dieron las primeras estimaciones dentro del glaciar San Francisco y Pirámide para el año 2012 y en conjunto con la mayor recolección de datos permitirán estimar con una menor incertidumbre los balances de masa.

8. Bibliografía

- Campbell Scientific, Inc. (2012). *Manuales: Wind monitor Model 05103; Power supplies overview; BP12, BP24, PS24; CR1000; HMP60 Temperature and Relative Humidity Probe; Weather Station Siting and Intallation Tools; SR50A Sonic Ranging Sensor*. Retrieved 2012 from <http://www.campbellsci.com/>
- Cartes, M. (2009). *Pronóstico de volúmenes de deshielo mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS*. Santiago: Universidad de Chile.
- Cornwell, E. (2012). *Análisis de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos*. Santiago: Dirección General de Agua - Universidad de Chile (En revisión).
- Cornwell, E. (2012). *Tesis: Reconstrucción del equivalente de agua en nieve mediante imágenes MODIS incorporada a un balance de masa-energía*. Santiago: Universidad de Chile.
- Cortés, G. (2010). *Tesis: Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el Río Juncal*. Santiago: Universidad de Chile.
- Dewalle, D., & Rango, A. (2008). *Principles of Snow Hydrology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Egli, L. E. (2011). *Spatial variability of seasonal snow cover at different scales in the Swiss Alps*. PhD Thesis, Zürich: ETH.
- Escobar, F., Casassa, G., & Pozo, V. (1995). *Variaciones de un glaciar de montaña en Los Andes de Chile Central en la últimas dos décadas*. Bull, Inst. fr. études andines. 24(3): 683-695.
- Finger, D., Heinrich, G., Gobiet, A., & Bauder, A. (2012). *Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century*. Water Resources Research, Vol. 48, W02521, doi:10.1029/2011WR010733.
- Finger, D., Pellicciotti, F., Konz, M., Rimkus, S., & Burlando Paolo. (2011). *The value of glacier mass balance, satellite snow cover images, and hourly discharge for*

- improving the performance of a physically based distributed hydrological model.* Water Resources Research, VOL. 47, W07519, doi:10.1029/2010WR009824.
- Hock, R. (2005). *Glacier melt: a review of processes and their modeling.* Progress in Physical Geography 29,3 pp. 362-391.
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J., Rivera, A., & Barichivich, J. (2009). *Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation.* Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281, 334-344.
- LI-COR, Inc. (2012). *Manual: LI-200SA Pyranometer Sensor.* Retrieved 2012 from <http://www.licor.com/>
- Molotch, N., & Bales, R. (2006). *Comparison of ground-based and airborne snow surface albedo parameterizations in an alpine watershed: Impact on snowpack mass balance.* Water Resources Research, Vol. 42, W05410, doi: 10.1029/2005WR004522.
- OTT. (2012). *Catálogo: OTT Pluvio2, Medidor universal de precipitaciones por sistema de pesaje.* Retrieved 2012 from http://www.ott.com/web/ott_samerica.nsf/id/pa_home_sp.html
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., et al. (2008). *A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-ariid Andes of central Chile, using melt models of different complexity.* Hydrological Process 22, 3980-3997. DOI: 10.1002/hyp.7085.
- Peña, H., & Narbona, J. (1978). *Proyecto glaciar Echaurren-Norte: informe preliminar.* Santiago: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología.
- Ragetti, S., & Pellicciotti, F. (2012). *Calibration of a physically based, spatially distributed hydrological model in a glacierized basin: On the use of knowledge from glaciometeorological processes to constrain model parameters.* Zurich: Water resources research, Vol. 48, W03509.
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., & Lange, H. (2000). *Variaciones recientes de glaciares en Chile.* Santiago: Invest. geogr., Chile, 34. 29 a 60.

Rodriguez, M. (2012). *Tesis: Separación del hidrograma en dos cuencas de los Andes de Chile Central mediante el usos de trazadores*. Santiago: Universidad de Chile.

Semmens, B., & Moore, J. (2008). *MixSIR: A bayesian stable isotope mixing model, Version 1.0.* . Recuperado el 2011, de <http://www.ecologybox.org>

SOMMER. (2012). *Catálogo: SSG Snow scale*. Retrieved 2012 from <http://www.sommer.at/en/home.html>

World Meteorological Organization. (n.d.). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Septima edición (2008).

ANEXOS

Anexo A

A. Almacenamiento de datos

Un data Logger mínimo que se debería tener en cualquier estación que está en alta montaña es el CR1000 de Campbell. Este ya ha sido utilizado en algunas estaciones de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente de la Universidad de Chile con resultados satisfactorios. El CR1000 es un instrumento robusto que es operado mediante una batería. Su rango de operación es entre los -25°C y los 50°C , sin embargo es posible aumentar el rango entre los -55°C y los 85°C , lo que es recomendable dado que en la cordillera, dependiendo de la ubicación de la estación, es posible encontrar temperaturas del aire cercanas a los -25°C cuando las condiciones son extremas.

La capacidad de almacenamiento alcanza los 4 MB para el uso de una CPU, almacenamiento de datos y programas. Los datos se almacenan en un formato de tabla. La capacidad de almacenamiento puede incrementarse usando una tarjeta CompactFlash. Además, posee una batería de respaldo de memoria SRAM y un reloj que garantiza que los datos, programas y el tiempo de recolección se mantengan mientras el CR1000 está desconectado de su principal fuente de energía. Cualquier fuente de 12Vdc puede dar energía al CR1000. Se usa típicamente un modelo PS100 o BPALK.

El CR1000 puede colocarse dentro de una carcasa sellada dándole la capacidad de recolectar datos bajo condiciones extremas. El soporte de apilamiento es pequeño y puede adosarse a el soporte de montaje, conservando el espacio (Figura A-1).

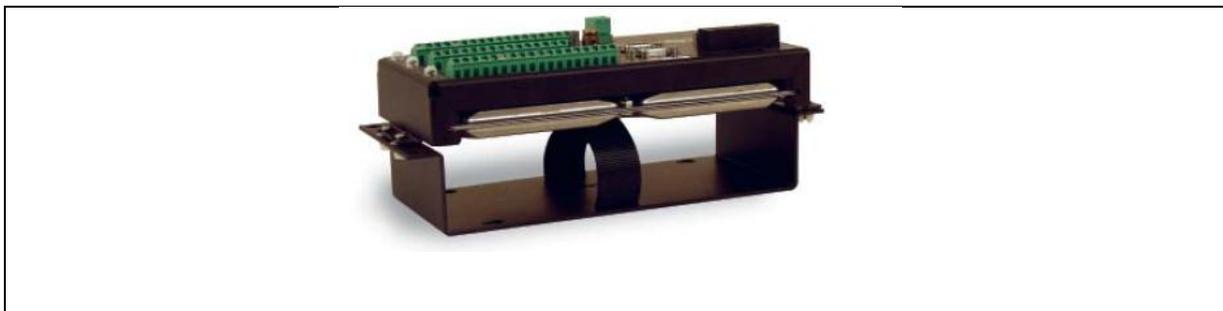


Figura A-1: Soporte de apilamiento para incrementar su rango de operación

B. Sistema de energía

La energía que necesita la estación meteorológica para funcionar puede ser suministrada por baterías en combinación con paneles solares. Los paquetes de baterías BP12 y BP24 de la marca Campbell son una opción (Figura A-2). Estas requieren ser cargadas regularmente, lo cual se puede hacer mediante un regulador CH100 o CH200 que se conecta a un panel solar. El regulador controla el flujo de corriente de la batería y previene que la corriente de esta vaya a la fuente de carga. Dependiendo del regulador de corriente que se disponga se deberá comprar un panel solar específico. A parte de estos paquetes de baterías puede seleccionarse un sistema de poder integrado como el PS24 (Figura A-3), el cual está hecho para sistemas donde el recinto de la estación meteorológica no es lo suficientemente grande para albergar un batería del tipo BP24.



Figura A-3: Caja del PS24, junto al regulador CH100, cables de poder y el soporte de batería. Esta última debe ser instalada por el usuario.

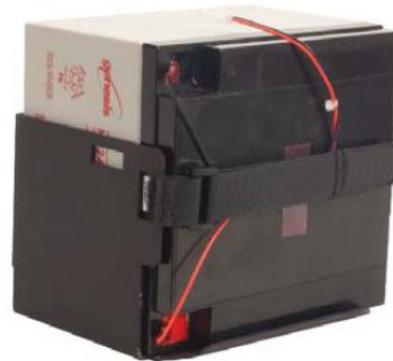


Figura A-2: El BP24 puede suministrar de energía un sistema que tiene requerimientos sobre el promedio

Para operar por largos periodos no son recomendables las baterías no recargables, sino aquellas que pueden ser alimentadas por un panel solar. En este sentido es útil utilizar una del tipo PS100 o PS200 (Figura A-4), posible de ocupar por el datalogger CR1000. Estas consisten en un regulador y una batería recargable que tiene una potencia nominal de 7.0 Ahr.

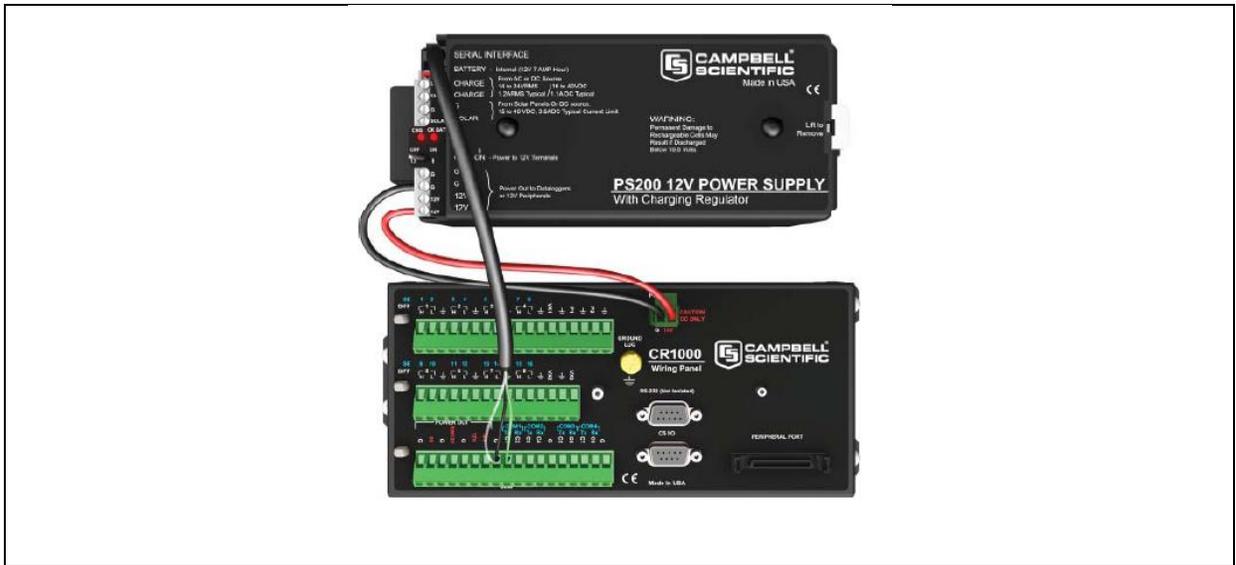


Figura A-4: El PS200 y CH200 tienen dos terminales de entrada que permiten simultáneamente la conexión de 2 fuentes de carga.

El último equipo necesario es el panel solar (Figura A-5) que como ya se dijo depende del regulador y las baterías que se dispongan. Las empresas que comercializan estos productos pueden guiar de buena forma el sistema completo de poder según las necesidades del usuario.

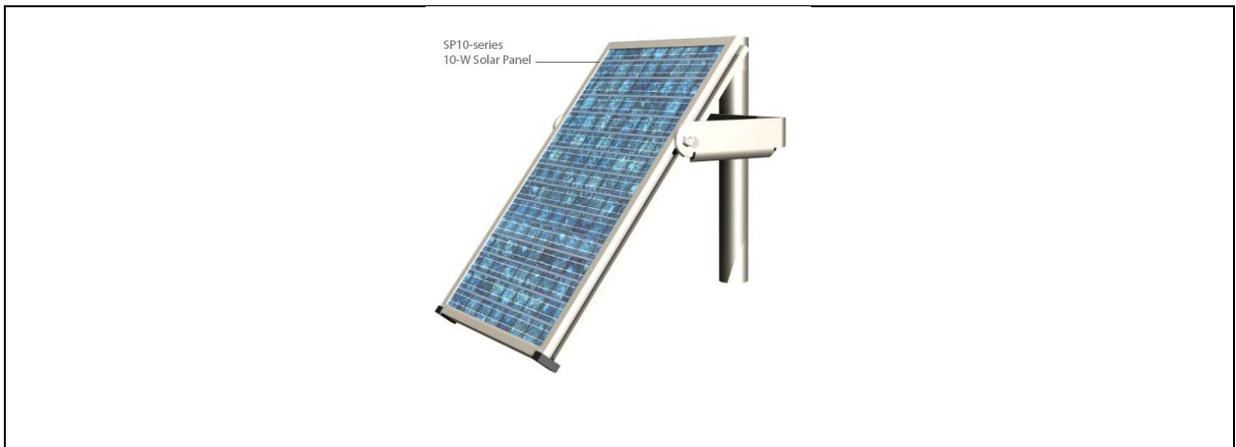


Figura A-5: Panel solar de alimentación a la estación meteorológica

Anexo B

Dos experiencias con estaciones meteorológicas se resumen a continuación, en términos de instrumentos y variables que se registraron.

A. Glaciar Juncal Norte

Pellicciotti et al., (2007) realizaron mediciones meteorológicas en el glaciar Juncal Norte mediante estaciones climáticas automáticas. Una fue colocada cercana a la lengua del glaciar, en el valle sobre el suelo y otra sobre el glaciar y la cobertura nival de invierno. Las variables recolectadas fueron temperatura del aire °C, humedad relativa %, velocidad y dirección del viento m/s, radiación solar incidente y reflejada de onda corta W/m². Los datos son recopilados cada 5 seg y cada 5 min los valores son promediados y guardados en un datalogger Campbell CR10X.

La principal diferencia entre la AWS colocada sobre el glaciar y aquella ubicada sobre el valle es que la primera descansa sobre un trípode que esta libremente apoyado sobre la masa de hielo y se hunde con este a medida que ocurre el derretimiento, permitiendo mantener una distancia constante entre el sensor y la superficie del terreno. Por el contrario, la estación apoyada sobre suelo fue fijada al terreno. Con lo anterior se garantiza que en ambos casos todas las mediciones sean realizadas a una altura de 2 m.

La descripción de los instrumentos utilizados puede verse en la Tabla B-1.

Tabla B-1: Instrumentos utilizados en Pellicciotti et al., (2007)

Variable medida	Fabricante	Sensor	Precisión	Rango
Radiación de onda corta (Q_{\downarrow} y Q_{\uparrow})	Kipp y Zonen	CM7B	±5%	305-2800 nm
Humedad relativa	Rotronic	MP-103 ^a	±1%	0-100%
Temperatura	Rotronic	MP-103 ^a	±0.3 °C	(-40)-(+60) °C
Velocidad del viento	Young	S-WMON	±0.3 ms ⁻¹	1-60 ms ⁻¹
Dirección del viento	Young	S-WMON	±3°	-

B. Estación Hornitos-Universidad de Chile

Una estación meteorológica instalada sin supervisión humana por parte del equipo de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente es la que se encuentra en el sector del Embalse Hornitos (propiedad de Colbún), en la Región de Valparaíso en ruta 60 (Figura B-1). Esta es capaz de registrar datos de radiación incidente de onda corta (SW), mediante un piranómetro (Campbell Scientific, modelo CS300-L), así como la radiación neta de onda corta y onda larga mediante un radiómetro (Kipp & Zonen, modelo CNR2-L). Existe un sensor de presión barométrica (Vaisala, modelo CS106) el cual mide presión atmosférica absoluta sobre el nivel del mar. También se cuenta con la instalación de un sensor de temperatura (Campbell Scientific, modelo 107-L) el cual registra la temperatura del aire y un sensor de temperatura-HR (Vaisala, modelo HMP60-L) el cual registra temperatura del aire y humedad relativa. Un pluviómetro de báscula (Campbell Scientific-Texas Electronics, modelo TE414WS) y un anemómetro (R.M. Young, modelo 05103) completan el conjunto de instrumentos, los cuales miden precipitación y viento respectivamente. El control de la estación se hace mediante un datalogger (Campbell Scientific, modelo CR1000) y una batería externa recargable (Campbell Scientific, modelo PS100) la cual administra la energía para alimentar el datalogger y los sensores. Un panel solar transforma la radiación incidente en energía eléctrica que también puede utilizar la estación meteorológica.



Figura B-1: Esquema conceptual Estación Meteorológica del Embalse Hornitos

En la estación meteorológica de Hornitos el barómetro se encuentra dentro del gabinete, el cual se encuentra a 2 m de altura. Por otra parte, el pluviómetro, radiómetro, piranómetro, anemómetro y termómetro se encuentran a una altura de 5 m aproximadamente.

Anexo C

La Tabla C-1 muestra el modelo y marca de los sistemas de almacenamiento y poder de las estaciones meteorológicas portátiles, mientras que la Tabla C-2 presenta la marca, modelo y precisión de los sensores.

Tabla C-1: Instrumentación de estación AWS

Instrumentación	Modelo	Marca	Cantidad
Interface Ethernet	NL115	Campbell	1
Tarjeta compact flash grado industrial 2 GB	CFMC2G	Campbell	1
Datalogger	CR1000	Campbell	1
Caja protectora 14X16"	NEMA 4X	Campbell	1
Fuente	PS100	Campbell	1
Panel Solar	SP20	Campbell	1

Tabla C-2: Modelos, marcas y precisión de los instrumentos de la AWS

Sensor	Marca	Modelo	Precisión
Anemómetro	Young	05103-5	Velocidad: +/- 0,3 m/s o 1% de la lectura Dirección: +/-3°
Termómetro	Campbell	HMP60	+/- 0,6°C
Humedad relativa	Campbell	HMP60	0°C a 40°C +/- 3%, rango: 0 a 90% +/- 5%, rango: 90 a 100% -40°C a 0°C +/- 5%, rango: 0 a 90% +/- 7%, rango: 90 a 100% 40°C a 60°C +/- 5%, rango: 0 a 90% +/- 7%, rango: 90 a 100%
Piranómetro	Apogee	CS300	%5
Barómetro	Campbell	CS106	+/- 0,3 mb @20°C +/- 0,6 mb @0° a 40°C +/- 1,0 mb @-20 a 45°C +/- 1,5 mb @-40 a 60°C

Anexo D

Tabla D-1: Datos de temperatura diaria en estaciones meteorológicas

	Aguas Panimávida	Estación 3 niveles San Francisco	AWS San Francisco	Estación 3 niveles Pirámide	AWS Pirámide
25-10-2012	5.8			-1.9	3.6
26-10-2012	10.1			-1.6	3.8
27-10-2012	9.4			-1.5	4.0
28-10-2012	12.1			-0.9	4.6
29-10-2012	10.8			-0.4	5.1
30-10-2012	10.2			-1.5	4.0
31-10-2012	9.1			-2.8	2.7
01-11-2012	8.0	2.2	1.4	-1.9	3.5
02-11-2012	11.1	2.7	1.8	-0.3	5.1
03-11-2012	12.2	4.0	3.7	0.2	5.6
04-11-2012	12.7	3.9	3.5	0.8	6.3
05-11-2012	13.4	3.7	2.7	1.2	6.7
06-11-2012	14.1	5.0	2.9	1.6	7.0
07-11-2012	15.2	4.7	4.8	1.6	7.1
08-11-2012	14.5	1.5	1.4	0.6	6.0
09-11-2012	10.9	-3.5	-6.3	-2.7	2.7
10-11-2012	5.3	-2.9	-6.5	-3.8	1.6
11-11-2012	6.3	1.1	-2.2	-2.3	3.1
12-11-2012	10.1	4.3	2.7	0.7	6.1
13-11-2012	13.4	4.2	1.1	1.1	6.5
14-11-2012	13.6	3.7	1.9		5.1
15-11-2012	13.8	4.8	3.3		5.3
16-11-2012	14.0	2.8	1.6		4.4
17-11-2012	12.1	1.7	-0.2		3.0
18-11-2012	11.2	4.9	3.1		5.9
19-11-2012	13.3	4.8	3.2		6.5
20-11-2012	15.0	4.6	3.8		7.1
21-11-2012	15.2	2.5	1.4		4.9
22-11-2012	12.4	-0.1	-2.0		1.8
23-11-2012	9.3	-0.9	-3.1		0.8
24-11-2012	8.5	2.4	0.4		2.3
25-11-2012	10.9	4.3	1.7		4.0
26-11-2012	12.7	3.7	1.8		4.5

Tabla D-2: Continuación de Tabla D-1

27-11-2012	13.2	4.3	2.6		5.1
28-11-2012	13.7	1.9	0.1		3.5
29-11-2012	11.4	-2.1	-4.4		0.6
30-11-2012	6.4	-1.6	-3.9		0.7
01-12-2012	8.1	2.5	0.8		3.7
02-12-2012	11.8	5.1	3.7		6.3
03-12-2012	11.3	4.2	2.6		5.6
04-12-2012	12.8	3.2	1.5		5.8
05-12-2012	11.7	2.3	0.5		5.8
06-12-2012	12.6	-2.2	-4.6		1.8
07-12-2012	11.8	4.3	2.8		4.1
08-12-2012	5.8	7.1	5.9		8.1
09-12-2012	10.8	7.8	6.7		10.1
10-12-2012	15.2	3.7	2.1		7.3

Tabla D-3: Datos de radiación diaria en estaciones meteorológicas en W/m²

	Estación de 3 niveles en San Francisco	AWS en San Francisco	AWS en Pirámide
25-10-2012			
26-10-2012			
27-10-2012			
28-10-2012			
29-10-2012			
30-10-2012			
31-10-2012			
01-11-2012	320	431	
02-11-2012	320	434	
03-11-2012	289	400	
04-11-2012	316	446	
05-11-2012	325	428	
06-11-2012	336	435	
07-11-2012	330	440	
08-11-2012	236	371	
09-11-2012	79	131	
10-11-2012	219	308	
11-11-2012	354	466	
12-11-2012	351	468	
13-11-2012	355	454	
14-11-2012	354	478	
15-11-2012	323	429	343
16-11-2012	316	430	293
17-11-2012	325	407	318
18-11-2012	363	473	324
19-11-2012	360	467	316
20-11-2012	364	482	303
21-11-2012	151	209	266
22-11-2012	225	348	224
23-11-2012	342	550	255
24-11-2012	370	494	286
25-11-2012	364	482	273
26-11-2012	311	437	252
27-11-2012	356	488	258
28-11-2012	331	450	240
29-11-2012	42	74	150
30-11-2012	70	111	143

Tabla D-4: Continuación de Tabla D-3

	Estación de 3 niveles en San Francisco	AWS en San Francisco	AWS en Pirámide
01-12-2012	27	56	54
02-12-2012	109	161	208
03-12-2012	68	108	83
04-12-2012	103	153	210
05-12-2012	166	236	258
06-12-2012	51	86	207
07-12-2012	388	524	250
08-12-2012	385	520	246
09-12-2012	381	515	234
10-12-2012	324	441	246