

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Generales.....	2
1.2.2	Específicos.....	2
1.3	Organización de la Memoria	3
2	MARCO TEÓRICO.....	4
2.1	Hidrología de Nieve en Cuencas de Montaña.....	4
2.1.1	Conceptos Generales de la Hidrología de Nieve	4
2.1.2	Teoría Básica de Intercambio de Energía	5
2.1.3	Efecto del Viento en el Manto.....	6
2.2	Energía Interna del Manto Nival.....	8
2.3	Extinción de la Radiación Solar en el Manto Nival	10
2.4	Covarianza Turbulenta para Flujos de Calor	13
2.4.1	Generalidades del Método	13
2.4.2	Teoría del Método de Covarianza Turbulenta	14
2.4.3	Temperatura del Aire en la Capa Límite Superficial	16
2.5	Métodos Predictivos de Derretimiento	19
2.5.1	Método del Índice de Temperatura Mejorado.....	20
2.5.2	Método Grado-Día Restringido.....	20
3	MÉTODOS Y DATOS DISPONIBLES.....	22
3.1	Zona de Estudio	22
3.2	Instalación Experimental	23
3.2.1	Covarianza Turbulenta	23
3.2.2	Sensores de Luz y Temperatura	25
3.2.3	Otros Equipos de Mediciones.....	28
3.2.4	Calicatas	30
3.3	Densidad de la Nieve	31

3.4	Estimación de la Profundidad de la Nieve	32
3.5	Determinacion del Albedo	39
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
4.1	Mediciones de Terreno	41
4.2	Flujos Radiativos.....	45
4.3	Flujos Turbulentos de Calor	45
4.3.1	Calor Sensible.....	46
4.3.2	Calor Latente	48
4.3.3	Correlación entre los Flujos Turbulentos de Calor y la Temperatura.....	53
4.4	Extinción de Luz en el Manto	54
4.5	Energía Interna del Manto y Balance de Energía.....	57
4.6	Calibración Modelo de Derretimiento de la Nieve	63
4.6.1	Método del Índice de Temperatura Mejorado	63
4.6.2	Método Grado-Día Restringido.....	66
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1	Recomendaciones	71
6	BIBLIOGRAFÍA	74
	ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Detalle de instrumentos de la estación meteorológica y anemómetro sónico, Valle Nevado (2016).....	25
Tabla 3.2: Detalle de sensores de luz y temperatura, Valle Nevado (2016).	26
Tabla 3.3: Detalle de sensor de precipitaciones, Valle Nevado (2016).....	28
Tabla 3.4: Detalle de los piranómetros instalados en Valle Nevado.	29
Tabla 4.1: Valores de los parámetros calibrados del modelo ETI.....	64
Tabla 4.2: Valores de los parámetros calibrados del modelo RDD.	67
Tabla A.1: Relación entre la viscosidad cinemática y difusividad térmica con la temperatura del aire.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Interacción de los flujos energéticos con el manto nival. $Q_s \downarrow$ y $Q_s \uparrow$ hacen referencia a la radiación de onda corta incidente y reflejada respectivamente. Análogamente, $Q_l \downarrow$ y $Q_l \uparrow$ hacen referencia a la radiación de onda larga incidente y reflejada respectivamente. Fuente: Elaboración propia.	6
Figura 2.2: Métodos de transporte de nieve por viento. Fuente: Adaptado de (DeWalle & Rango, 2008).	7
Figura 2.3: Decaimiento exponencial de la radiación en profundidad. El término I_z hace referencia a la intensidad del flujo a una profundidad z e I_0 corresponde a la intensidad del flujo transmitido en profundidad. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 2.4: Representación esquemática de la corrección de las series de datos a realizar. Fuente: Adaptado de Reba et al., (2009)	13
Figura 3.1: Ubicación de la estación meteorológica de Valle Nevado, Región Metropolitana, zona centro de Chile ($33^{\circ}21' S$, $70^{\circ}14' O$). Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 3.2: Instalación experimental del anemómetro sónico y de la estación meteorológica. Agosto de 2016. Fuente: Elaboración Propia.	24
Figura 3.3: Soporte de sensores de luz y temperatura. En (A) se muestra el soporte con uno de los sensores; en (B) se muestra el soporte instalado en terreno, en donde la orientación de los sensores es hacia la zona que no se encuentra intervenida. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 3.4: Acercamiento del contacto entre la nieve y el soporte de los sensores de luz en profundidad. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 3.5: Distribución inicial de sensores de luz y temperatura (VN i) en profundidad. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 3.6: Pluviómetro instalado en estación Valle Nevado. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 3.7: Piranómetros instalados en estación Valle Nevado. Fuente: Tienda Li-Cor online.	30
Figura 3.8: Perfil vertical de densidad en Valle Nevado (alt. 3038 msnm). Región Metropolitana, Chile, 2016.	30
Figura 3.9: Perfil vertical de temperatura en Valle Nevado (alt. 3038 msnm). Región Metropolitana, Chile, 2016.	31
Figura 3.10: Densidad promedio de la nieve medida en calicatas y ajuste.	31

Figura 3.11: Algoritmo de modelamiento puntual de nieve. Fuente: Adaptado de (DeWalle & Rango, 2008).	33
Figura 3.12: Temperatura crítica para la separación de nieve/lluvia, y su relación con la humedad relativa. Fuente: Adaptado de (DeWalle & Rango, 2008).	33
Figura 3.13: Serie de tiempo del valor del SWE durante el período de muestreo (A) y serie de tiempo de la profundidad del manto durante la campaña (B). La línea azul corresponde a la estimación, y los puntos rojos son mediciones en terreno.	37
Figura 3.14: Serie de tiempo de la temperatura interna del manto nival.....	38
Figura 3.15: Serie de tiempo del contenido de frío del manto de nieve.	39
Figura 3.16: Serie de tiempo del albedo de la nieve, determinado mediante la información de los piranómetros.....	40
Figura 4.1: Series de tiempo de las variables medidas en campaña. En (A) se muestra la temperatura medida a 1.8 [m] sobre el suelo; en (B) la humedad relativa a 2.12 [m]; en (C) el viento medido por el anemómetro a 2.65 [m]......	42
Figura 4.2: Series de tiempo de las variables medidas en campaña. En (A) se muestra la presión atmosférica a 1.25 [m] sobre el suelo; en (B) la radiación solar incidente a 1.10 [m]; en (C) la radiación neta.....	43
Figura 4.3: Serie de tiempo de precipitaciones durante la campaña de muestreo.	44
Figura 4.4: Rosa de los vientos, indicando magnitud y dirección principal de los vientos medidos durante la campaña de muestreo.....	46
Figura 4.5: Flujo de calor sensible. Valores positivos indican transferencias de energía desde la atmósfera hacia la nieve, mientras que los valores negativos indican transferencias de energía desde la nieve hacia la atmósfera.	47
Figura 4.6: Series de tiempo de calor sensible (A), temperatura en la capa límite superficial (B).	48
Figura 4.7: Flujo de calor latente. Valores positivos indican ganancias de energía por parte de la nieve, mientras que los valores negativos indican pérdidas.....	48
Figura 4.8: En (A) la serie de tiempo del calor latente; en (B) la serie de tiempo de la temperatura del aire medida por el sistema del <i>Írgason</i> ; en (C) la serie de tiempo de la humedad relativa.	50
Figura 4.9: En (A) la serie de tiempo de calor latente; en (B) la serie de tiempo de la presión atmosférica (B); en (C) la serie de tiempo de la velocidad del viento medido por el sistema del <i>Írgason</i>	50

Figura 4.10: Evaporación de la nieve en el período de estudio, determinado del calor latente. En azul se muestra la tasa de evaporación en cada intervalo, mientras que la línea roja muestra la evaporación acumulada.	52
Figura 4.11: Evaporación diaria del período de estudio. Las barras rojas muestran aquellos días en que las mediciones no fueron completas dado que hubo errores de medición de los equipos.	53
Figura 4.12: Relaciones entre temperatura del aire y flujos turbulentos de calor. En (A) se muestra la relación con el calor sensible; en (B) se muestra la relación con el calor latente; en (C) se muestra la relación con la suma de ambos flujos.	53
Figura 4.13: Ejemplo de regresión para determinar el coeficiente de extinción de un caso real. La línea azul muestra el ajuste exponencial en el caso de usar los 5 sensores mientras que la curva roja muestra el ajuste usando sólo los 3 sensores superiores.	54
Figura 4.14: Coeficiente de extinción de la radiación, para cada intervalo de tiempo.	55
Figura 4.15: Profundidad de penetración de la radiación en el manto de nieve.	56
Figura 4.16: Serie de tiempo de la variación de energía interna del manto de nieve.	57
Figura 4.17: Flujos de energía acumulados en el período de estudio.	58
Figura 4.18: Se muestra la serie de tiempo de la energía de derretimiento del manto de nieve durante el período de estudio.	59
Figura 4.19: Derretimiento de la nieve en el período de estudio, determinado de la energía de derretimiento del balance de energía. En azul se muestra la tasa de derretimiento en cada intervalo, mientras que la línea roja muestra el derretimiento acumulado.	60
Figura 4.20: Derretimiento diario del período de estudio. Las barras rojas muestran aquellos días en que las mediciones no fueron completas dado que hubo errores de medición de los equipos.	61
Figura 4.21: Energía de derretimiento. En azul se consideran las variaciones de energía interna y en rojo se hace el supuesto que dichas variaciones son nulas.	62
Figura 4.22: Curva de frecuencia acumulada de los principales flujos de energía para el período de toma de datos.	62
Figura 4.23: Calibración del modelo de derretimiento mejorado ETI (eje y) vs derretimiento calculado mediante el balance de energía (eje x).	63
Figura 4.22: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo ETI, realizando variaciones del 10% en torno del valor óptimo. En (A) se observa la sensibilidad ante variaciones de TF; en (B) se observa la sensibilidad ante variaciones de SRF.	64

Figura 4.23: Tasa de derretimiento calculada usando el método del balance de energía (línea azul) y el método ETI (línea roja) calibrado para Valle Nevado, 2016.	65
Figura 4.26: Calibración del modelo de derretimiento RDD (eje y) vs derretimiento calculado por el balance de energía (eje x).	66
Figura 4.27: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo RDD, realizando variaciones del 10% en torno del valor óptimo. En (A) se observa la sensibilidad ante variaciones de ar; en (B) se observa la sensibilidad ante variaciones de mQ	67
Figura 4.28: Tasa de derretimiento calculada usando el método del balance de energía (línea azul) y método RDD (línea roja) calibrado para Valle Nevado, 2016.	68
Figura A. 1: Variación de la viscosidad cinemática (ν) y difusividad térmica (K_T) con la temperatura del aire seco, a una presión $P = 1000$ [hPa].....	76