



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELAMIENTO DE FORMACIÓN DE PENITENTES Y SU EFECTO EN LOS
FLUJOS TURBULENTOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

BORJA MIR CERDA

PROFESOR GUÍA:
JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
XIMENA VARGAS MESA
YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: BORJA MIR CERDA
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: JAMES MCPHEE TORRES

MODELAMIENTO DE FORMACIÓN DE PENITENTES Y SU EFECTO EN LOS FLUJOS TURBULENTOS

El presente trabajo tiene como objetivo modelar la formación y crecimiento de penitentes durante una temporada de ablación, para luego analizar algunos de los efectos que éstos generarían en los flujos de un balance energético puntual, sobre un manto nivoso. Con esto se busca mejorar la comprensión de estas estructuras y las estimaciones de derretimiento y sublimación en superficies que las contienen.

Para estudiar el desarrollo de los penitentes se utiliza un modelo bidimensional puramente radiativo, considerando dos casos: uno donde la densidad del manto es constante y otro, motivado por la literatura, donde existe variabilidad espacial de ésta. El modelo calcula la energía distribuida entre penitentes a cada hora del día y aplica posteriormente la ablación correspondiente en la superficie. Las mediciones y experimentos con los cuales calibrar el modelo son escasos, por lo que los resultados representan una estimación simplificada contra la cual se podrían evaluar futuras observaciones.

Por otra parte, el análisis de los efectos de los penitentes en los flujos de un balance energético se centra en torno a dos efectos en particular. Primero, la capacidad de retención de la radiación de onda corta producto de las múltiples reflexiones que ocurren. Y segundo, en la variación de la rugosidad aerodinámica producto del constante crecimiento de los penitentes durante la temporada de ablación, la cual tiene un efecto directo sobre los flujos turbulentos.

Se utilizan datos meteorológicos obtenidos de una estación cercana a un campo de penitentes ubicada en la cordillera de Los Andes en la zona norte de la provincia de San Juan, Argentina. Con estos datos se calculan los flujos sobre un hipotético manto nivoso liso, y se comparan con los mismos calculados sobre la superficie de penitentes modelada.

El modelo de penitentes, que considera la densidad del manto constante, no demuestra una evolución topográfica muy significativa, provocando que la radiación neta no se vea muy afectada durante el periodo de análisis. Los flujos turbulentos, por otra parte, presentan un pequeño aumento producto de la rugosidad inicial asociada al modelo. Al considerar la variabilidad espacial de la densidad, las tasas de crecimiento aumentan notablemente generando estructuras de sobre un metro de altura en un periodo de 5 meses. Esto genera una gran capacidad de retención de la radiación, disminuyendo el albedo aparente sobre la superficie cubierta de penitentes a un 20% de su valor inicial. Las grandes estructuras generadas en este caso, también aumentan de forma considerable la rugosidad del terreno, provocando aumentos en los parámetros de rugosidad en hasta un orden de magnitud, lo que lleva a los flujos turbulentos a tomar un rol principal dentro del balance.

Agradecimientos

En primera instancia me gustaría agradecer a mi padre Pablo y a mi madre Angélica por darme la posibilidad de estudiar esta carrera y apoyarme en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, permitiendo que me desarrolle de forma integral y libremente. Con ellos también agradecer al resto de mis seres queridos: Laura, Pedro, Agu, Lucía, Mili, Quecala y Lela, quienes con pequeños detalles, paciencia y alegría me acompañaron durante este proceso y lo han hecho por varios años.

A los amigos de la arrampicata, compañeros de aventuras, a quienes he confiado literalmente mi vida en más de una ocasión. Les agradezco por el compañerismo, la sabiduría y la constancia, me han demostrado que el camino del guerrero se recorre lento y con humildad. Espero que las cumbres alcanzadas no sean más que el preámbulo de lo que está por venir.

A mis compañeros de la vida, con quienes seguimos compartiendo cuando ya han pasado 8 años desde que se separaron nuestros caminos, veo en ustedes personas en las que sin importar el tiempo y espacio, siempre podré confiar.

A las excelentes personas que habitan esta facultad, donde el menjunje de ramos cursados, más allá de brindarme conocimientos, me llenó de grandes amistades las cuales espero perduren en el tiempo. No tengo espacio para nombrarlos a cada uno de ustedes, pero sé que si leyeran esto se sentirían aludidos.

Finalmente me gustaría agradecer a mis profesores por darme la posibilidad de desarrollar este trabajo, mostrándome un camino donde puedo unir mi amor por la montaña con los conocimientos técnicos adquiridos estos últimos años.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	vi
Índice de Ilustraciones	vii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis de trabajo	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivos generales	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Organización de la memoria	2
2. Antecedentes	3
2.1. Penitentes	3
2.1.1. Mecanismo de Formación	4
2.1.2. Ambiente de Formación	5
2.2. Balance Energético	7
2.2.1. Flujos Radiativos	8
2.2.2. Flujos Turbulentos	8
2.2.3. Efecto de los penitentes en el balance energético	11
3. Metodología	12
3.1. Modelo de penitentes	12
3.1.1. Radiación solar	13
3.1.2. Penitentes	14
3.2. Balance energético	18
3.2.1. Flujos radiativos	19
3.2.2. Flujos turbulentos	19
3.2.3. Longitud de rugosidad aerodinámica	20
4. Resultados y discusión	21
4.1. Análisis de datos meteorológicos	21
4.1.1. Radiación	21
4.1.2. Flujos turbulentos	22
4.2. Desarrollo de penitentes	24
4.2.1. Caso 1: Densidad interpenitente constante	24
4.2.2. Caso 2: Densidad interpenitente variable	26

4.3. Balance energético	28
4.3.1. Flujos radiativos	29
4.3.2. Flujos turbulentos	31
4.3.3. Balance total	33
5. Conclusiones y comentarios	38
Bibliografía	40

Índice de Tablas

4.1. Radiación de onda corta incidente registrada por estación Vicuña 2.	22
4.2. Radiación de onda larga neta registrada por estación Vicuña 2.	22
4.3. Variables meteorológicas registradas por estación Vicuña 2 y punto de rocío calculado para cada mes.	24

Índice de Ilustraciones

2.1.	Campo de penitentes cercano a los 5.000 m.s.n.m durante el mes de Enero en la Región de Atacama, Chile.	4
2.2.	Esquema de la reflexión solar en una superficie irregular de nieve. Se observa una concentración de los rayos en el fondo de la irregularidad.	5
2.3.	Esquema del efecto de la latitud sobre el desarrollo de penitentes. Tomado de Cathles et al. (2014).	6
2.4.	(a) Penitentes de hielo ubicados sobre el glaciar del Nevado Juncal, Región de Valparaíso, Chile.(b) Penitentes de nieve a la orilla de un río en la Región de Atacama, Chile.	7
2.5.	Efecto del plano-cero de desplazamiento en la estimación de la longitud de rugosidad aerodinámica.	11
3.1.	Componente Z para estimación de radiación potencial.	14
3.2.	Topografía inicial.	15
3.3.	Componente Z para estimación de radiación potencial para un segmento s en tiempo t.	16
3.4.	Fracción de energía reflejada en segmento s' que llega a segmento s.	17
3.5.	Desplazamiento de segmentos por ablación.	18
3.6.	Mapa de ubicación geográfica de la estación meteorológica.	19
3.7.	Representación de la altura de rugosidad con la desviación estandar. Tomado de Munro (1989).	20
4.1.	Radiación de onda corta incidente registrada por estación Vicuña 2.	21
4.2.	Radiación de onda larga neta registrada por estación Vicuña 2 para el periodo de estudio.	22
4.3.	VARIABLES meteorológicas medidas para el periodo de estudio.	23
4.4.	Altura de los penitentes modelados y su tasa de cambio a lo largo de la temporada de ablación.	25
4.5.	Desarrollo morfológico de los penitentes modelados, considerando la misma densidad para toda la superficie (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).	25
4.6.	Altura de los penitentes modelados y su tasa de cambio a lo largo de la temporada de ablación.	26
4.7.	Desarrollo morfológico de los penitentes modelados, considerando una densidad que disminuye con la profundidad (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).	26

4.8. Esquema del promedio de las observaciones de 11 penitentes en el Glaciar Piloto. Tomado de Naruse and Leiva (1997).	27
4.9. Crecimiento de penitentes formados experimentalmente. Se observa una diferenciación entre una fase inicial de formación y una posterior de desarrollo. Adaptado de Bergeron et al. (2006)	27
4.10. Modelo de desarrollo de penitentes para condiciones experimentales de Bergeron et al. (2006), considerando sublimación (izq.) y derretimiento (der.) de forma aislada como mecanismo de ablación.	28
4.11. Radiación de onda corta neta sobre superficie con y sin penitentes considerando densidad interpenitente constante (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).	29
4.12. Radiación de onda corta neta sobre superficie con y sin penitentes considerando densidad interpenitente variable (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).	30
4.13. Albedo estimado con la absorción de la energía incidente entre los penitentes, considerando densidad interpenitente constante y variable.	30
4.14. Evolución de la rugosidad aerodinámica para los casos de densidad interpenitente constante y variable, considerando y no considerando el plano de desplazamiento (z_d).	31
4.15. Flujo de calor sensible para los cinco casos en análisis.	32
4.16. Flujo de calor latente para los cinco casos en análisis.	33
4.17. Balance energético sobre superficie sin penitentes.	34
4.18. Balance energético para campo de penitentes con densidad constante, sin considerar plano de desplazamiento (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).	34
4.19. Balance energético para campo de penitentes con densidad constante considerando plano de desplazamiento (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).	35
4.20. Balance energético para campo de penitentes con densidad variable (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).	36
4.21. Balance energético para campo de penitentes con densidad variable considerando plano de desplazamiento (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).	36

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los glaciares actualmente preservan alrededor del 69% del agua fresca del mundo (Shiklomanov and Rodda, 2004), por lo que es de suma importancia estudiar su morfología y comprender como éstos participan en el ciclo hidrológico. Bajo esta premisa se desarrolla este estudio, el cual busca modelar una forzante del derretimiento glaciar, para ciertas estructuras glaciares en específico: los penitentes.

Estas estructuras, de forma cónica (similares a una estalagmita), alineados Este-Oeste y con alturas de hasta cinco metros, se pueden encontrar en prácticamente cualquier zona glaciar o cubierta de nieve sobre los 4000 m en la zona extra-tropical de la cordillera de Los Andes (Lliboutry, 1954). Si bien suelen ser asociados a esta zona en particular, se han observado penitentes también en los Himalayas y en algunas otras regiones montañosas alrededor del mundo (Naruse and Leiva, 1997). Estudios recientes reportan la existencia de penitentes incluso en otros lugares del sistema solar, como en Europa, luna de Júpiter (Hobley et al., 2013) y en campos de hielo situados en Plutón (Moores et al., 2017).

La presencia de estructuras de tal envergadura en la superficie, tanto de glaciares como de mantos nivosos, genera un impacto en el balance energético de superficie (Corripio and Purves, 2005), acelerando su tasa de ablación (Cathles et al., 2014; Nicholson et al., 2016) y por lo tanto, su interacción con el ciclo hidrológico.

Dentro de los componentes del balance energético, tanto los flujos de calor latente como los flujos de calor sensible (denominados flujos turbulentos), se ven directamente afectados por la rugosidad de la superficie representada por un coeficiente de rugosidad aerodinámica (z_0) (Brutsaert, 1982). Este coeficiente, a la hora de modelar ablación, suele considerarse como constante, simplificación que no tiene cabida en campos de penitentes, pues la rugosidad puede variar hasta en dos órdenes de magnitud a lo largo de la temporada (Paterson, 2016).

Si bien se han realizado modelos de desarrollo de penitentes anteriormente, se han utilizado principalmente para entender su morfología (Betterton, 2001; Cathles et al., 2014;

Guilleminot and Olea, 2018) y para estudiar su interacción en los flujos radiativos del balance energético (Arias Vargas et al., 2018; Corripio and Purves, 2005), no así para estudiar su efecto en los flujos turbulentos, objetivo principal de esta investigación.

1.2. Hipótesis de trabajo

- Es posible modelar la tasa de crecimiento de los penitentes considerando sólo flujos radiativos.
- Los penitentes pueden ser representados bidimensionalmente dado su alineamiento Este-Oeste.
- La rugosidad producida por el desarrollo de penitentes tiene un efecto significativo sobre los flujos turbulentos en el balance energético de un glaciar o manto nival.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Desarrollar un modelo de crecimiento de penitentes y estudiar su efecto en los flujos turbulentos sobre una superficie de hielo durante la temporada de ablación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar el fenómeno de crecimiento de penitentes durante una temporada de ablación.
- Analizar el efecto de los penitentes en el parámetro de rugosidad aerodinámica (z_0), considerando la variabilidad temporal asociada al crecimiento de éstos.

1.4. Organización de la memoria

- En el Capítulo 2, se desarrolla una revisión de antecedentes bibliográficos a modo de introducir los conceptos básicos relacionados al desarrollo de penitentes y el balance energético.
- En el Capítulo 3, se describen las metodologías utilizadas para la modelación numérica del desarrollo de penitentes y para analizar cómo éstos afectan los distintos flujos presentes en un balance energético.
- En el Capítulo 4, se presentan los resultados y discusión generada a partir del estudio, y se compara con estudios vigentes sobre el tema.
- Finalmente en el Capítulo 5, se presentan comentarios y conclusiones obtenidos a partir de los resultados de la presente investigación.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Penitentes

Los penitentes son estructuras de hielo o nieve con forma de cuchillas que se presentan principalmente en la zona central de la cordillera de Los Andes durante la época de ablación (Figura 2.1). Reciben su nombre por la similitud que estos tienen a los penitentes de las procesiones católicas, quienes solían utilizar altos y puntiagudos capuchones blancos en España.

Si bien estas estructuras eran conocidas desde hace mucho tiempo por arrieros que frecuentaban Los Andes, fueron registradas por primera vez por Charles Darwin en 1835, en el Paso de Piuquenes en la zona central de Chile: “Cerros cónicos de granito rosa en cada mano; en los valles se encontraban amplios campos de nieve eterna. Estas masas congeladas, durante el proceso de descongelamiento, se habían convertido en algunas partes en columnas o pináculos, los cuales, al ser altos y cercanos unos con otros, dificultaban el paso de las mulas de carga. En una de estas columnas de hielo, un caballo congelado se encontraba ensartado como en un pedestal, pero con sus piernas traseras flotando en el aire. El animal, supongo, debió haber caído de cabeza dentro de un hoyo, cuando la nieve era aún continua, y posteriormente el entorno debe haber sido removido por el descongelamiento”, (Darwin, 1840).

Desde entonces se postularon diversas ideas respecto a su formación. El mismo Darwin se lo atribuyó al efecto del viento, otros al derretimiento sobre zonas de depósitos de avalanchas. Incluso se llegó a considerar la orientación electromagnética de los cristales de nieve como condición de formación. No fue hasta 1942 que Carl Troll afirmó que los penitentes se podían formar simplemente por efecto del sol sobre una superficie plana. Utilizando sólo una ampolleta sobre un manto de nieve fresca en una noche fría y seca, Troll fue capaz de reproducir los penitentes en su Alemania natal¹.

Esta idea tomaría fuerza con estudios posteriores realizados por Lliboutry (1954) en los

¹Este experimento sería replicado varios años después para comprender de mejor manera la morfología y distribución de los penitentes (Bergeron et al., 2006).

años 50. A través de observaciones, Lliboutry fue capaz de identificar un alineamiento Este-Oeste y una inclinación hacia el Norte (plano por el cual se desplaza el sol en el hemisferio Sur) que se repetía en los campos de penitentes y que no estaban siendo considerados en las teorías anteriores. Hasta el día de hoy se considera la radiación solar como principal forzante en el desarrollo de penitentes.



Figura 2.1: Campo de penitentes cercano a los 5.000 m.s.n.m durante el mes de Enero en la Región de Atacama, Chile.

2.1.1. Mecanismo de Formación

Dentro de los penitentes coexisten varios procesos físicos que permiten de forma retroalimentativa el crecimiento de estos (Claudin et al., 2015; Lliboutry, 1954). Aunque no se tiene muy claro cuales son los agentes que producen la primera diferenciación en la ablación del terreno, esta se puede atribuir a diferencias de densidad en el manto que nunca es perfectamente homogéneo o a una distribución de material particulado sobre la superficie, que generaría una variación espacial del albedo. Mientras que la periodicidad de estas alteraciones podría asociarse a la naturaleza de onda del viento fluyendo sobre las superficies de nieve (Amstutz, 1958). Una vez que ocurre esta diferenciación inicial, comienzan los procesos que potencian el crecimiento.

Para entender cómo el sol puede formar penitentes, basta con observar un manto de nieve durante un día despejado y notar que casi siempre habrá mayor reflexión en las depresiones formadas por la irregularidad del terreno, como se observa en la Figura 2.2 . Mayor reflexión implica en este caso mayor absorción de energía y por lo tanto posiblemente mayor derretimiento o sublimación.

La inclinación de los penitentes en dirección Norte demuestra la importancia de la radiación en este proceso. Esta inclinación le da un eje de simetría a las reflexiones de la luz

incidente, considerando que en las zonas donde los penitentes se desarrollan, la posición del sol siempre presenta un ángulo respecto a la vertical.

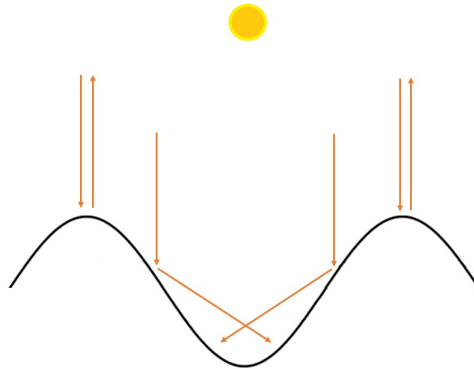


Figura 2.2: Esquema de la reflexión solar en una superficie irregular de nieve. Se observa una concentración de los rayos en el fondo de la irregularidad.

El otro proceso involucrado en el crecimiento de los penitentes, que pareciera ser importante, está relacionado con el mecanismo de ablación. Usualmente las zonas donde se desarrollan penitentes, suelen ser muy frías y secas, permitiendo que exista sublimación sobre derretimiento. Observaciones de Lliboutry (1954) describen que mientras las puntas de los penitentes se mantienen duras y secas, entre ellos la nieve se encuentra suave y húmeda. Esto, sumado a mediciones de temperatura donde registró diferencias de hasta 10°C entre las puntas y los valles, sugiere que podría estar ocurriendo sublimación en las zonas altas y derretimiento en las zonas bajas de los campos de penitentes. Dado que es necesario alrededor de siete veces más energía para sublimar cierta masa de nieve que para derretirla, la ablación en las zonas interpenitentes sería más rápida que sobre ellos. (Claudin et al., 2015; Lliboutry, 1954; Nicholson et al., 2016).

2.1.2. Ambiente de Formación

Como se intuye en base a la sección anterior, el desarrollo de penitentes está sujeto a condiciones ambientales bastante particulares. En primera instancia una alta radiación solar es necesaria, por lo que los penitentes a pesar de encontrarse prácticamente alrededor de todo el mundo (Naruse and Leiva, 1997), se concentran en zonas de gran altitud y cercanas a los trópicos. La segunda condición que se considera importante son bajas temperaturas y humedad, específicamente que el punto de rocío se encuentre por debajo de los 0°C . Esto permite que exista sublimación a temperaturas bajo el punto de fusión y por lo tanto ablación diferencial.

También es importante que las temperaturas no sean muy altas, para que el calor transportado por el viento no pueda afectar los procesos, ni muy bajas, porque es necesario que exista un mecanismo de ablación para que se desarrollen los penitentes. Lo último explica que en las zonas de mayor altura, el comienzo del desarrollo de penitentes se vea retardado o incluso no se manifieste (Lliboutry, 1954).

Se podría pensar que altas velocidades del viento también deberían considerarse como factor en el crecimiento de los penitentes, ya que estas favorecen la evaporación. Sin embargo, mayor velocidad del viento implica uniformidad de los parámetros anteriormente mencionados, dificultando la ablación diferencial que se espera entre picos y valles.

Por último, existe una limitante geográfica que afecta en la presencia de penitentes. Zonas con latitudes mayores a los 55° presentarían dificultades para el desarrollo de penitentes, ya que durante el periodo estival el movimiento del sol presenta un mayor movimiento azimutal y no así cenital, provocando que no exista concentración de la radiación en los denominados valles entre penitentes como se observa en la Figura 2.3. El estudio realizado por Cathles et al. (2014) arrojó altos valores de tasa de crecimiento de penitentes para zonas bajo los 40° de latitud, resultado respaldado por las observaciones de penitentes las cuales los concentran entre los 37°S y los 46°N . Dicho lo anterior, ¿cómo es posible entonces encontrar penitentes en zonas de latitudes tan altas como la Antártica? Para responder esta interrogante es necesario imaginar que pueden existir ciertas configuraciones geomorfológicas o geográficas (e.g., una montaña que produce sombra al campo de penitentes durante una parte del día.) que provoque en los penitentes las condiciones de radiación favorables, para que estos puedan desarrollarse.

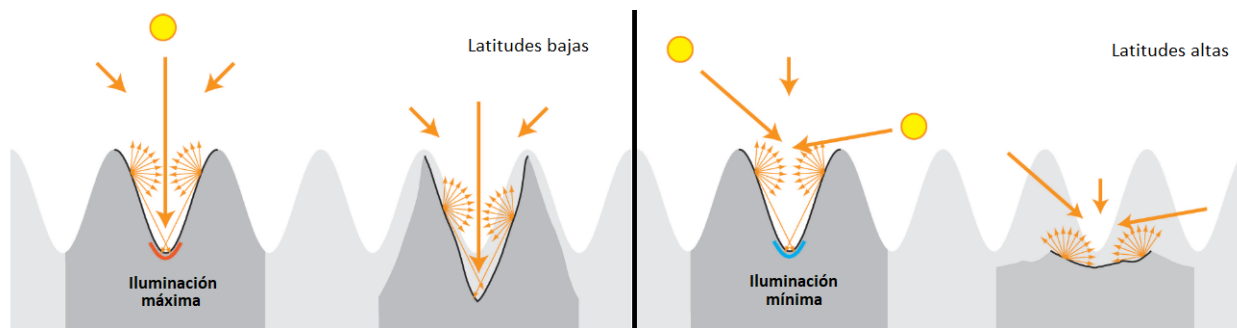


Figura 2.3: Esquema del efecto de la latitud sobre el desarrollo de penitentes. Tomado de Cathles et al. (2014).

Suele existir una confusión con respecto a si los penitentes están compuestos de nieve o hielo glaciar. Si nos dirigimos al monte Xixia Bangma en China, rondando los 5.600 m.s.n.m es posible que encontremos penitentes de hasta 15 metros de altura. La formación de una estructura de este calibre, necesitaría de varias temporadas de ablación para ser esculpida, llegando a tardar alrededor de 150 años (Shi, 1982).

Mientras los penitentes de nieve ven su crecimiento limitado por la profundidad del manto (Figura 2.4b), los de hielo constan de prácticamente toda la profundidad del glaciar para su desarrollo (Figura 2.4a). Por otra parte, los penitentes de nieve se forman a partir de micropenitentes o irregularidades en la superficie, no así los de hielo, los cuales suelen crecer a partir de desprendimientos de seracs² o de depósitos de avalanchas sobre los glaciares (Roch, 1954; Shi, 1982). Por lo último, si bien se trata de diferentes ambientes de formación de penitentes, las condiciones climáticas favorables para su desarrollo y los mecanismos de formación, podrían ser idénticos (Naruse and Leiva, 1997).

²Un serac es una columna o bloque de hielo glaciar, usualmente formado por la intersección de las grietas que se desarrollan sobre un glaciar.



(a) Penitentes de hielo.



(b) Penitentes de nieve.

Figura 2.4: (a) Penitentes de hielo ubicados sobre el glaciar del Nevado Juncal, Región de Valparaíso, Chile.(b) Penitentes de nieve a la orilla de un río en la Región de Atacama, Chile.

2.2. Balance Energético

Realizar un balance energético sobre una superficie consiste en analizar los flujos energéticos que existen entre la superficie y su entorno. En el caso de un glaciar o manto de nieve, este balance nos permite determinar en última instancia la pérdida de agua del cuerpo producto del derretimiento, evaporación o sublimación.

El flujo aproximado de energía en una superficie ψ puede escribirse como se observa en la ecuación (2.1) (Oerlemans and Klok, 2002), donde se consideran como positivos los flujos que entran a la superficie y negativos los que salen de esta:

$$\psi = S_{in} + S_{out} + I_{in} + I_{out} + H_{se} + H_{la} \quad (2.1)$$

donde S_{in} y S_{out} corresponden a la radiación de onda corta absorbida y reflejada respectivamente, I_{in} y I_{out} corresponden a la radiación de onda larga tanto incidente como la que sale de la superficie, y H_{se} y H_{la} los flujos turbulentos tanto de calor sensible como de calor latente. En zonas donde se considere determinante, suele agregarse un parámetro Q_g , correspondiente a la energía aportada por conducción desde el suelo bajo el manto y un parámetro Q_r asociado a precipitaciones cálidas (DeWalle and Rango, 2008). Cuando la superficie se encuentra en condición de derretimiento, la tasa de éste (M) se puede calcular como se observa en la ecuación (2.2), donde L_m corresponde al calor latente de derretimiento:

$$M = \psi / L_m \quad (2.2)$$

2.2.1. Flujos Radiativos

Radiación de onda corta

La radiación de onda corta se entiende como el espectro de la radiación solar cuya longitud de onda (λ) se encuentra entre los 0,4 y 2 [μm]. Por lo general, este flujo representa gran parte del flujo neto sobre nieve o glaciares (DeWalle and Rango, 2008). La radiación de onda corta que sale del manto está directamente asociada tanto a la capacidad reflectora de la superficie como a la radiación entrante, por lo que queda representada como se observa en la ecuación (2.3), donde α corresponde al albedo o reflexión fraccional de la superficie.

$$S_{net} = (1 - \alpha)S_{in} \quad (2.3)$$

Radiación de onda larga

Suponiendo que la superficie se encuentra a 0°C y que ésta irradia como cuerpo negro (emisividad igual a 1), utilizando la relación de Stefan-Boltzmann (ecuación 2.4) donde T_a corresponde a la temperatura (K), σ a la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^2 \text{K}^{-4}$) y ε a la emisividad del cuerpo, la radiación de onda larga de salida es constante e igual a -316Wm^{-2} (Oke, 2002). Por otra parte, la de entrada, sigue la misma lógica pero considerando la temperatura del aire y la emisividad del cielo (Pellicciotti et al., 2008).

$$L = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.4)$$

2.2.2. Flujos Turbulentos

Los flujos turbulentos están controlados por el gradiente tanto de temperatura como de humedad entre la superficie y el aire que la rodea, utilizando las turbulencias presentes en la atmósfera baja como mecanismo de intercambio vertical (Hock, 2005). A pesar de que muchas veces son muy inferiores a los flujos radiativos netos, considerando promedios semanales o mensuales, estos pueden superarlos en intervalos mas pequeños. Por lo tanto, la inclusión de los flujos turbulentos mejora notablemente la predicción de derretimiento en una amplia gama de ambientes y condiciones (Anderson, 1976).

No existen muchos estudios que hayan medido directamente flujos turbulentos sobre glaciares o mantos nivosos, y los que se han realizado suelen ser por periodos de tiempo muy limitados (Radić et al., 2017). Para estimar los flujos turbulentos, por lo tanto, se suele usar el denominado método aerodinámico 'bulk'. Este método intenta parametrizar los flujos utilizando observaciones meteorológicas como temperatura, velocidad del viento y humedad relativa cerca de la superficie. Flujos verticales constantes (de momentum, calor y humedad) y condiciones horizontales homogéneas, son los supuestos en los que se basa este método.

Flujos de calor sensible

Siempre que exista una diferencia de temperatura entre la atmósfera y el manto de nieve, existe un potencial convectivo de transferencia de calor sensible. Dependiendo de la magnitud, signo de la diferencia de temperaturas, velocidad del viento, rugosidad de la superficie y estabilidad del aire, este puede ocurrir desde la atmósfera hacia el manto o viceversa (DeWalle and Rango, 2008).

Considerando el enfoque 'bulk', este flujo puede representarse como se muestra en la ecuación (2.5) (Hock, 2005), donde ρ_a corresponde a la densidad del aire, c_p al calor específico del mismo, \bar{u} la velocidad promedio del viento y $\bar{\theta}_z$ y $\bar{\theta}_s$ a las temperaturas potenciales promedios sobre la superficie y a la altura z (altura de mediciones meteorológicas) respectivamente.

$$Q_H = \rho_a c_p C_H \bar{u} (\bar{\theta}_z - \bar{\theta}_s) \quad (2.5)$$

C_H es el coeficiente de intercambio de calor y está dado por:

$$C_H = \frac{k^2}{[\ln(z/z_0)][\ln(z/z_{0t})]} \quad (2.6)$$

con k representando la constante de von Kármán, z_0 y z_{0t} los coeficientes de rugosidad aerodinámica y de temperatura respectivamente, y z la altura de los sensores a la cual se tomaron las mediciones (Hock, 2005; Munro, 1989).

Flujos de calor latente

El intercambio de vapor de agua entre la superficie y la atmósfera también ocurre producto de mezcla turbulenta en la capa límite. Si existe agua en la superficie, la transferencia de vapor desde la superficie hacia la atmósfera se verá reflejada en una pérdida de calor latente de vaporización, en cambio, si se encuentra a temperaturas bajo el nivel de congelamiento, la transferencia provocará pérdidas de calor latente de sublimación (DeWalle and Rango, 2008), muy común en zonas de desarrollo de penitentes.

Al igual que los flujos de calor sensible, los flujos de calor latente suelen estimarse mediante el enfoque 'bulk', con la diferencia de que el gradiente de humedad se evalúa entre la superficie y el entorno. Con esto, el flujo queda definido según la ecuación (2.7) (Hock, 2005):

$$Q_e = \rho_a L_v C_e \bar{u} (\bar{q}_z - \bar{q}_s) \quad (2.7)$$

donde L_v es el calor latente de vaporización (o sublimación), \bar{q}_z y \bar{q}_s la humedad específica promedio a la altura de medición (z) y en la superficie, respectivamente. Esta diferencia puede ser reemplazada por la expresión $(0,622/p)(\bar{e}_z - \bar{e}_s)$, donde p es la presión atmosférica

y \bar{e} la presión de vapor promedio. Finalmente se tiene C_E que corresponde al coeficiente de intercambio de presión de vapor.

$$C_E = \frac{k^2}{[\ln(z/z_0)][\ln(z/z_{0h})]} \quad (2.8)$$

Longitud de rugosidad aerodinámica (z_0)

En la capa atmosférica superficial, bajo condiciones de estabilidad neutral, la velocidad, temperatura y densidad de vapor de agua tienen forma semi-logarítmica (Andreas, 1987). La longitud de rugosidad aerodinámica (z_0) es la distancia sobre la superficie a la cual una extrapolación del perfil logarítmico de viento bajo condiciones neutrales es igual a cero (Nicholson et al., 2016). Las longitudes para temperatura (z_{0t}) y presión de vapor (z_{0h}) siguen la misma lógica, pero carecen de un significado físico bien definido (Hock, 2005).

Estimaciones de z_0 a partir de microtopografías muestran buenos resultados comparados con los valores derivados a partir de perfiles de velocidad. Lamentablemente, estas estimaciones se han realizado en túneles de viento para topografías arenosas donde la rugosidad está determinada por el tamaño de grano, por lo que no son representativas para grandes estructuras como los penitentes (Smith et al., 2016). La aproximación más utilizada a la hora de estimar longitudes de rugosidad aerodinámicas sobre estructuras glaciares es la propuesta por Lettau (1969) (ecuación 2.9), donde h^* corresponde a la altura efectiva del obstáculo, s al área de la silueta vertical en el plano perpendicular al viento y S el área basal del obstáculo. Esta estimación se realizó en base a un experimento donde se ubicaron cientos de canastos de paja viento arriba de un anemómetro. Con una rugosidad bien definida geoméricamente, la estimación se ajustó bastante bien a las observaciones.

$$z_0 = 0,5h^*\left(\frac{s}{S}\right) \quad (2.9)$$

Estudios realizados por Grimmond (1999) sobre parámetros aerodinámicos en espacios urbanos, demostraron que las estimaciones de parámetros de rugosidad realizadas en base a la geometría de los obstáculos no necesariamente entregan peores resultados que las realizadas en base a métodos aerodinámicos, sugiriendo que métodos como el propuesto por Lettau (1969) pueden representar bastante bien la rugosidad aerodinámica.

Sobre elementos rugosos muy cercanos unos con otros, existe una interferencia en el flujo de aire que ocurre alrededor de cada uno en particular. Esto provoca que el nivel donde ocurre la transferencia de momentum entre el flujo de aire y los elementos que dan rugosidad a la superficie se desplace hacia arriba, en una distancia denominada desplazamiento de plano-cero (z_d) (Nicholson et al., 2016; Smeets et al., 1999). Esto significa que la rugosidad efectiva será un resultado de los elementos rugosos por sobre este plano como se observa en la Figura 2.5.

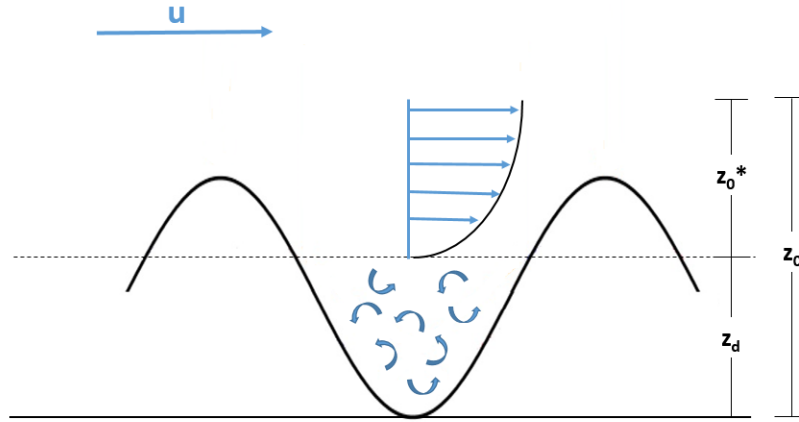


Figura 2.5: Efecto del plano-cero de desplazamiento en la estimación de la longitud de rugosidad aerodinámica.

2.2.3. Efecto de los penitentes en el balance energético

Estudios previos han demostrado que la presencia de penitentes afecta de manera importante el balance energético sobre un glaciar o manto nivoso. Si bien algunos respaldan que estos retardan el derretimiento (Corripio and Purves, 2005), la mayoría (y más actuales) dicen que estos lo aceleran, siendo la disminución del albedo uno de los factores más importantes (Cathles et al., 2014; Nicholson et al., 2016; Lhermitte et al., 2014). Sumado a esto, se debe considerar la variación en la ablación intrapenitentes (Claudin et al., 2015; Lliboutry, 1954), que también tiene un efecto en la ablación general, y por último, el aumento en la rugosidad que afectará directamente los flujos turbulentos (Nicholson et al., 2016; Smeets et al., 1999).

A pesar de que son estructuras que se encuentran distribuidas en varios lugares del planeta y que se han desarrollado algunos modelos respecto a su formación, no existen muchas mediciones que respalden la teoría. El difícil acceso que existe generalmente a estas estructuras (alta montaña), además de la instrumentación necesaria para caracterizarlos (probablemente varios sensores a diferentes alturas entre los penitentes para comprender los flujos) son algunos de los impedimentos existentes. Esto motiva a seguir estudiándolos y así mejorar las estimaciones del aporte glaciar y nival al ciclo hidrológico.

Capítulo 3

Metodología

Como se menciona en el capítulo 1, se busca desarrollar un modelo de crecimiento de penitentes con el fin de parametrizar su tasa de crecimiento durante una temporada estival en el hemisferio sur. Esta información se utiliza para determinar la variación de la longitud de rugosidad aerodinámica durante la misma temporada, para finalmente estimar las variaciones que esta consideración generaría en los flujos turbulentos de un balance energético.

3.1. Modelo de penitentes

Para el modelo de los penitentes, se utiliza como guía en gran parte el modelo propuesto por Cathles et al. (2014). Este, a grandes rasgos, analiza la radiación incidente a lo largo del valle generado entre dos penitentes para posteriormente aplicar un mecanismo de ablación de la misma forma. Los argumentos principales del modelo realizado se presentan a continuación y se explican a lo largo del capítulo.

- Penitentes de nieve
- Manto de nieve infinito
- Modelo 2-D
- Considera solo radiación solar
- No existe dependencia angular de las reflexiones
- Toda la energía es absorbida o reflejada en la superficie
- Se modela solo un valle entre penitentes
- Resolución temporal horaria
- Resolución espacial ≈ 5 cm

3.1.1. Radiación solar

Posición solar

Para determinar el ángulo cenital del sol, se utiliza el método propuesto por Milankovitch (1930), donde se calcula a partir de la latitud (θ), la declinación solar (δ) y el ángulo horario (ωt) como se muestra a continuación.

$$\cos Z = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega t \quad (3.1)$$

La declinación solar (δ) se calcula simplificando la ecuación (3.2) propuesta por Walraven (1978), donde ε corresponde al ángulo entre el plano de la eclíptica y el del ecuador celeste y L la longitud eclíptica. Considerando que la excentricidad de la órbita terrestre es muy pequeña, se puede aproximar a una órbita circular (error $\approx 1^\circ$). Esto permite hacer una serie de simplificaciones que llevan a la expresión (3.3) utilizada frecuentemente para determinar la declinación solar.

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin L \quad (3.2)$$

$$\delta = -23,44^\circ \cos \left[\frac{360^\circ}{365} (N + 10) \right] \quad (3.3)$$

Para el cálculo del ángulo azimutal, también se utiliza el método propuesto por Walraven (1978) (ecuación 3.4).

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin \omega t}{\sin Z} \quad (3.4)$$

Intensidad de radiación

Ya que se trata de un modelo global, no se consideran variables atmosféricas sobre la radiación, por lo tanto se utiliza la ecuación propuesta por Milankovitch (1930) (ecuación 3.1) para determinar la intensidad potencial de la radiación solar.

$$I_s = \left(\frac{I_0}{e^2} \right) \cos Z \quad (3.5)$$

donde I_0 corresponde a la constante solar, e al vector radial el cual depende de la distancia entre la Tierra y el Sol y Z el ángulo cenital. En este caso en vez de Z se utiliza Z' correspondiente al ángulo entre el rayo solar y la perpendicular a la superficie como se observa en la Figura 3.1.

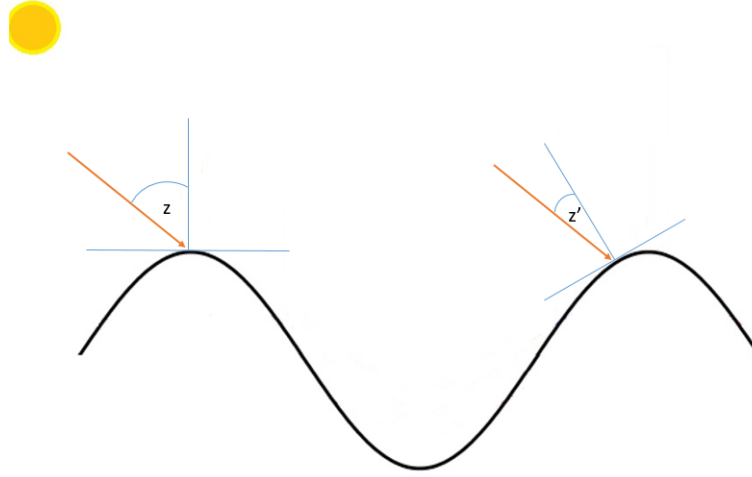


Figura 3.1: Componente Z para estimación de radiación potencial.

Plano Norte-Sur

Al trabajar en un plano bidimensional, tanto el ángulo cenital (ecuación 3.6) como la intensidad (ecuación 3.7) deben ser trasladados a este plano, para esto se utiliza la ecuación propuesta por Cathles IV (2011):

$$\theta_{2D} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta \cos A_p}{\cos \theta} \right) \quad (3.6)$$

$$I_p = \sqrt{(\cos \theta)^2 + (\sin \theta \cos A_p)^2} \quad (3.7)$$

donde el subíndice p hace referencia al plano en el cual se proyecta (N-S en este caso) e I_p corresponde a un factor de reducción para la intensidad.

3.1.2. Penitentes

Condición inicial

Como se menciona en el capítulo dos, no existe certeza de como se generan las primeras diferencias en las superficies que evolucionan en penitentes. Bajo esta premisa, como condición inicial se consideran pequeñas estructuras de diez y veinte centímetros de alto espaciadas cada un metro, representadas por una función coseno para un caso y como rectas para otro, como se muestra en la Figura 3.2. Estas son discretizadas en 100 segmentos sobre los cuales se analizará la energía absorbida y posterior ablación para cada hora del periodo de estudio.

Con respecto a la densidad, se estudian dos escenarios, uno de densidad constante e igual a la de un manto de nieve maduro ($350 \text{ Kg}/\text{m}^3$) y otro con densidad variable basado en las

observaciones de Lliboutry (1954), donde para replicar alta densidad en los picos y baja en los valles de los penitentes, se utiliza una variación lineal en función de la altura entre 900 Kg/cm^3 (similar a la del hielo) para el punto mas alto y 350 Kg/m^3 para el mas bajo. El albedo se considera constante espacial y temporalmente, e igual a 0,5.

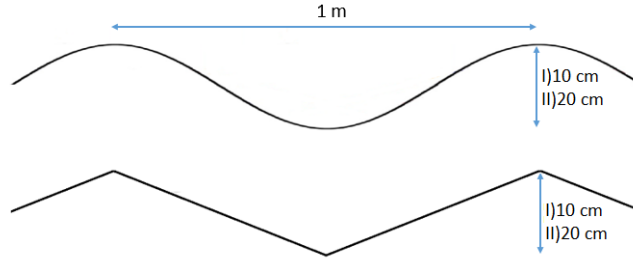


Figura 3.2: Topografía inicial.

Transferencia radiativa

La absorción de la energía solar en cada punto de la superficie, $E_a(s)$, involucra múltiples reflexiones en el resto del espacio. Para esto se utiliza el método propuesto por Pfeffer and Bretherton (1987), que se observa en las ecuaciones (3.8) y (3.9). En estas ecuaciones se expresa la reflexión y absorción respectivamente de la energía en el segmento s donde $R_d(s)$ y $E_d(s)$ representan la reflexión y absorción de la radiación directa que recibe el segmento, α corresponde al albedo, $F(s,s')$ la fracción de energía reflejada en el segmento s' que llega a s y $R(s')$ la reflexión en el segmento s' . Integrando las reflexiones a lo largo de todo el contorno Γ :

$$R(s) = R_d(s) + \int_{\Gamma} \alpha F(s, s') R(s') ds' \quad (3.8)$$

$$E_a(s) = E_d(s) + \int_{\Gamma} (1 - \alpha) F(s, s') R(s') ds' \quad (3.9)$$

Ablación

Luego de calcular la energía absorbida en cada sección del penitente para un momento determinado $E_a(s, t)$, se aplica un componente de ablación, que es el que finalmente generará el desarrollo y crecimiento de los penitentes. A modo de simplificación del modelo, hay dos consideraciones importantes. La primera se mencionó al comienzo del capítulo y consiste en que toda la energía absorbida en la superficie es utilizada para derretimiento. Esto pasa por alto la capacidad calórica del hielo muy frío que pueda estar en la superficie, pero dado que nos centramos en la temporada de ablación, es posible suponer que el hielo en superficie se encontrará a temperaturas cercanas a los 0°C . Y la segunda, tiene que ver con que toda el agua generada producto del derretimiento o sublimación, es inmediatamente drenada por

lo que no se considera la interacción entre esta fase y la de hielo/nieve. Tomando estas consideraciones, la velocidad de movimiento para cada segmento a lo largo del penitente producto de la ablación estará representada por la ecuación (3.10), donde $-n$ es un vector perpendicular al segmento que apunta hacia el interior del manto de nieve y $\dot{H}(t, s)$ es la tasa de ablación en función del segmento y el tiempo. Esta tasa depende de la energía absorbida en el segmento ($E_a(t, s)$), la densidad de la nieve (ρ), el calor latente de derretimiento o sublimación (L) y la longitud del segmento (ds) como se observa en la ecuación (3.11).

$$U = \dot{H}(t, s)(-n) \quad (3.10)$$

$$\dot{H}(t, s) = \frac{E_a(t, s)}{\rho L ds} \quad (3.11)$$

Modelo numérico

El contorno Γ es discretizado en N segmentos limitados por $N+1$ nodos (con $N=100$ en este estudio), sobre los cuales se analiza la energía absorbida cada hora, para posteriormente desplazarlos en función de la ablación.

Dado que la mayor parte de la energía absorbida proviene de la radiación directa, el primer paso es determinar si los segmentos están expuestos a ésta o no. Para esto, se define un ángulo de visión del cielo para cada segmento, el cual se obtiene midiendo el ángulo entre el segmento y todos los nodos del contorno a la izquierda y a la derecha del segmento eligiendo el menor ángulo para el cual el cielo es visible como se observa en la Figura 3.3. Luego, para determinar si el segmento se encuentra iluminado o no, se compara el ángulo de visión con el ángulo cenital para ese momento, si este último cae dentro del anterior, se considera que el segmento se encuentra iluminado. Que un segmento se encuentre parcialmente iluminado es bastante significativo para la absorción, por lo tanto se analizan las zonas de transición de iluminado a no iluminado y se calcula el porcentaje de iluminación en función del ángulo de visión de los nodos adyacentes. Con esto, se genera un arreglo con la fracción iluminada de cada segmento I_f .

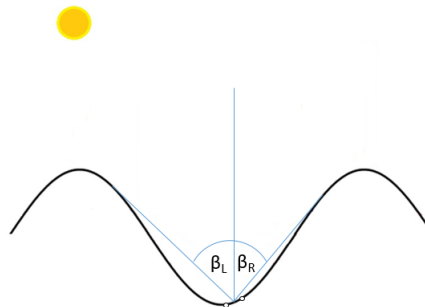


Figura 3.3: Componente Z para estimación de radiación potencial para un segmento s en tiempo t .

Una vez definidos los parámetros anteriores, es posible expresar la reflexión y absorción producto de la radiación directa para todos los segmentos del contorno utilizando las ecuaciones (3.12) y (3.13).

$$R_d(s) = \alpha I_f(s)(\Theta_{2D} \cdot n(s))I_{N-S} \quad (3.12)$$

$$E_d(s) = (1 - \alpha)I_f(s)(\Theta_{2D} \cdot n(s))I_{N-S} \quad (3.13)$$

En las ecuaciones (3.8) y (3.9), se observa que debe existir una matriz de interacción que define el porcentaje de energía reflejada en cada segmento que llega a cada otro segmento a lo largo del contorno ($F(s, s')$). Para determinar esta fracción, se debe tener en consideración uno de los supuestos presentados anteriormente, al considerar que no existe una dependencia angular en las reflexiones, se asume que la reflexión se comporta como difusa, es decir, la energía reflejada es igual en todas las direcciones. Dicho esto, se calcula un ángulo (γ) entre el centro del segmento emisor de la reflexión (s') y los nodos adyacentes del segmento que la recibe (s), como se observa en la Figura 3.4, el cual se divide por π (dominio de las reflexiones para una superficie horizontal) para obtener la fracción mencionada.

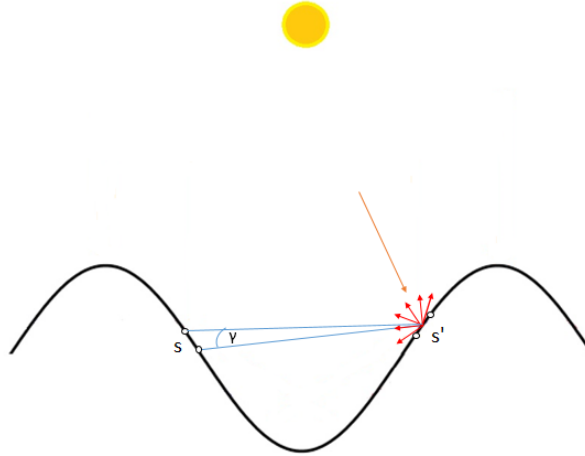


Figura 3.4: Fracción de energía reflejada en segmento s' que llega a segmento s .

Además de lo anterior es necesario saber si los dos segmentos se encuentran conectados entre sí, es decir, saber si es posible que la energía reflejada en uno puede llegar al otro. Para esto se genera una matriz de conexión booleana, donde se le da el valor 1 si están conectados y 0 si es que no. Primero, se confirma que los segmentos estén angulados uno hacia el otro. Esto se hace con un producto punto entre la recta perpendicular al centro de uno de los segmentos y una recta que una ambos; si este producto es positivo, entonces se confirma que están angulados entre sí. Luego, se traza una recta entre los segmentos y se confirma que no existan nodos intermedios que se ubiquen por sobre esta recta, lo que implica una interferencia entre los segmentos analizados. Si se cumplen ambas condiciones, entonces existe una línea de visión entre ambos segmentos y se le otorga el valor 1 en la matriz, a esta matriz se le llama C y permite junto a los parámetros definidos anteriormente discretizar las ecuaciones (3.8) y (3.9) tal como se indica en las ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$R(ds_i) = R_d(ds_i) + \sum_{i=1}^N \alpha C_{ij} F_{ij} \Delta s_j R_d(ds_j) \quad (3.14)$$

$$E(ds_i) = E_d(ds_i) + \sum_{j=1}^N (1 - \alpha) C_{ij} F_{ji} \Delta s_j R_d(ds_j) \quad (3.15)$$

Una vez que se tiene la energía absorbida en todos los segmentos, se procede a aplicar ablación sobre estos siguiendo las ecuaciones (3.10) y (3.11). Al final de cada paso de tiempo, se desplazan los segmentos siguiendo el vector perpendicular a éstos, en la dirección del manto de nieve, con la tasa dada por la ecuación (3.11). Se separan los segmentos agregando un nodo en cada intersección, para luego ser desplazados como se observa en la Figura 3.5. Luego, se hace un análisis de curvatura, donde si la curva generada entre dos segmentos contiguos se considera convexa, se mantiene la nueva posición de los nodos, pero si ésta es cóncava, se define un nuevo nodo en la intersección de los segmentos desplazados. Finalmente se aplica una interpolación lineal entre los nodos para todo el contorno y se vuelven a definir los N segmentos para la topografía en el siguiente paso horario.

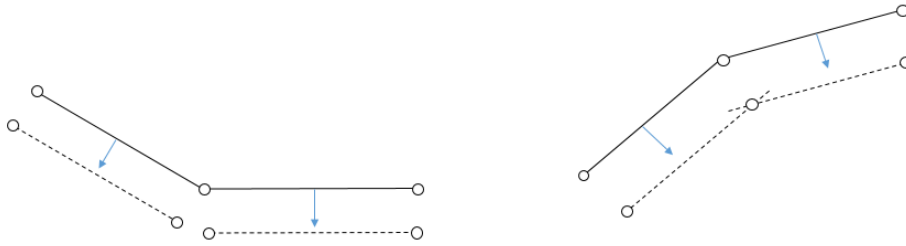


Figura 3.5: Desplazamiento de segmentos por ablación.

3.2. Balance energético

Para analizar los efectos de este modelo en un balance energético, se utilizan datos meteorológicos de una estación cercana a un campo de penitentes, para comparar los distintos flujos sobre la topografía cambiante con parámetros meteorológicos acordes al ambiente de formación de penitentes. La estación Vicuña 2 se encuentra al norte de la provincia de San Juan, Argentina, a un kilómetro aproximadamente de la frontera con Chile, a 4.994 m.s.n.m. como se observa en la Figura 3.6. Esta zona se caracteriza por un clima seco, cálido y semi-árido, con pequeñas variaciones de temperatura y humedad (Veit, 1993). De la estación se obtienen datos horarios de radiación de onda corta incidente, radiación de onda larga neta, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento para el periodo entre el 1 de Octubre del 2018 y el 28 de Febrero del 2019.

Dado que la estación no se encuentra exactamente sobre el campo de penitentes y que el objetivo no es generar un balance energético exacto sino que ver el efecto de los penitentes

sobre éste, se fijan algunos parámetros de la superficie a estudiar. Se trabaja con un albedo igual a 0,5 considerando que los penitentes se generan durante el verano cuando en esta zona no suelen ocurrir grandes eventos de precipitación. La densidad se trabaja igual a 350 Kg/m^3 en el caso de densidad constante y como una interpolación lineal entre 350 Kg/m^3 en el punto mas bajo y 900 Kg/m^3 en el punto mas alto para el caso de densidad variable. Como no se tienen datos de temperatura en la superficie, esta se considera igual a la temperatura del aire cuando se encuentra bajo 0°C e igual a 0°C para temperaturas del aire positivas.

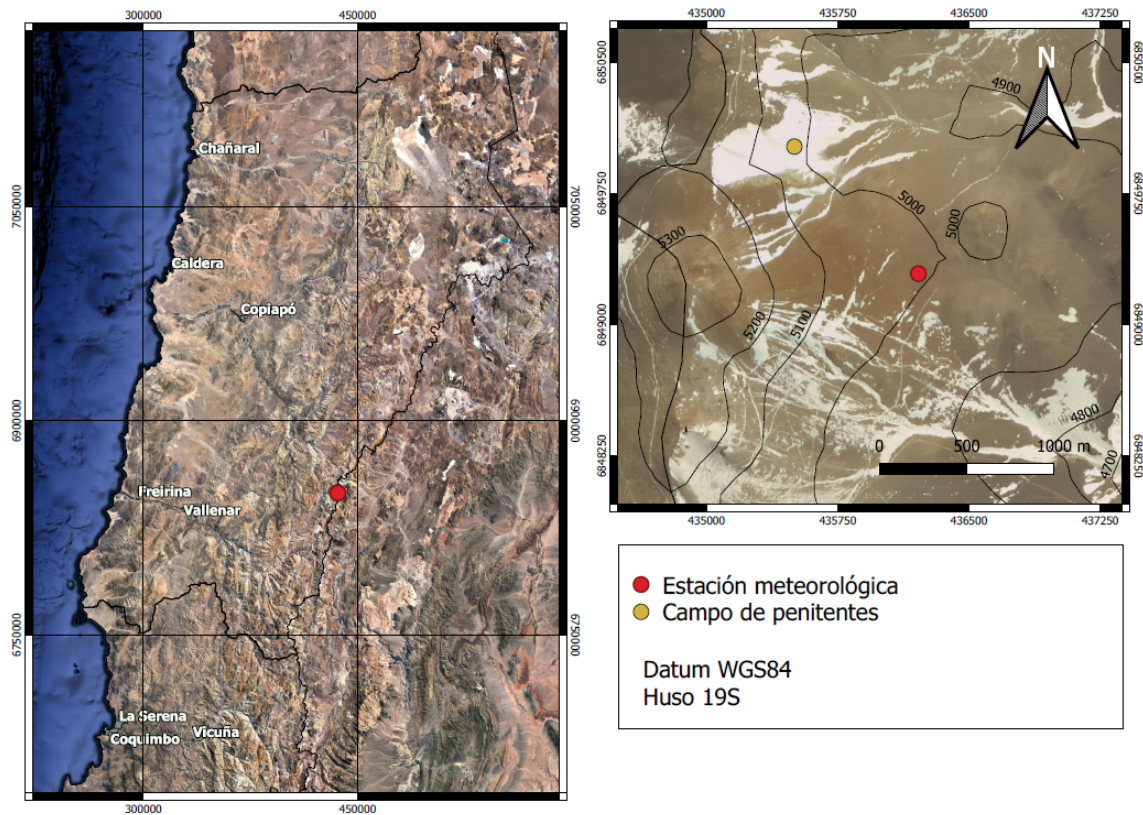


Figura 3.6: Mapa de ubicación geográfica de la estación meteorológica.

3.2.1. Flujos radiativos

La radiación de onda corta incidente se utiliza como la energía de entrada en el modelo de penitentes. Sobre la superficie sin penitentes a modelar se calcula la radiación de onda corta neta utilizando la ecuación (2.3). Para la radiación de onda larga se utiliza en ambos escenarios la radiación neta registrada por la estación. El no contar con mediciones de temperatura de la superficie no nos permite analizar el efecto de los penitentes en este flujo.

3.2.2. Flujos turbulentos

Para el cálculo de los flujos turbulentos se utilizan los datos meteorológicos en las ecuaciones (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8), considerando longitudes de rugosidad variables proporcionadas por el modelo de penitentes.

3.2.3. Longitud de rugosidad aerodinámica

Para parametrizar la longitud de rugosidad aerodinámica (z_0), se utiliza el método propuesto por Munro (1989), quien modificó la fórmula de la ecuación (2.9) (Lettau, 1969) para aplicarla a una única sección transversal de longitud X perpendicular a la velocidad del viento (único caso a analizar en este estudio dada la bidimensionalidad del modelo). En esta aproximación en vez de definir una altura de obstáculo sobre el plano, h se reemplaza por una altura efectiva expresada como el doble de la desviación estándar sobre el promedio del perfil de elevación; s es reemplazada por $hX/2f$, donde f es el número de obstáculos por sobre la media de la elevación; y S es reemplazada por $(X/f)^2$ como se observa en la ecuación (3.16).

$$z_0 = 0,5h \frac{\frac{hX}{2f}}{\left(\frac{X}{f}\right)^2} \quad (3.16)$$

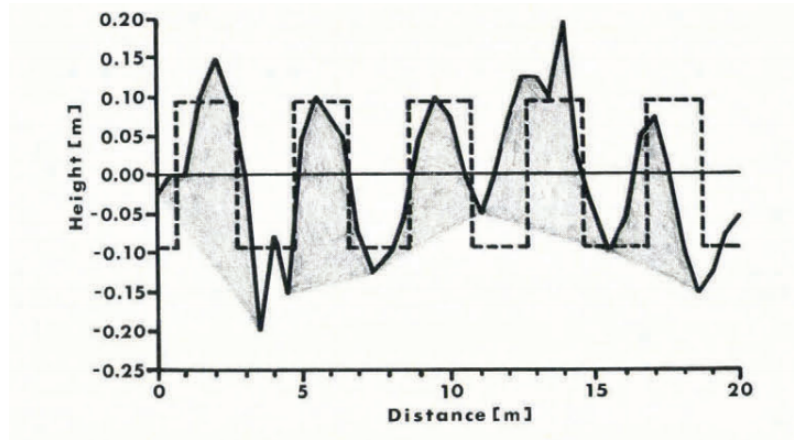


Figura 3.7: Representación de la altura de rugosidad con la desviación estándar. Tomado de Munro (1989).

Dado que los penitentes son estructuras altas y muy cercanas unas con otras, se considera la posibilidad de que exista un plano de desplazamiento a la hora de calcular la longitud de rugosidad. Estudios de Nicholson et al. (2016) sobre penitentes, sugieren que al utilizar planos de desplazamientos ubicados a alturas alrededor de $\frac{2}{3}h$ se obtienen resultados consecuentes con la teoría. Con respecto a la estimación de las longitudes de rugosidad de temperatura y humedad (z_{0t} y z_{0h}), no existe una concordancia científica. Para este estudio se consideran ambos dos ordenes de magnitud bajo z_0 , tomando en cuenta los estudios realizados por Andreas (1987) y Greuell and Smeets (2001). Por último, si bien, como se mencionó en la sección 3.2.3, para todos los escenarios se considera la dirección del viento perpendicular a los penitentes durante todo el periodo, no hay evidencia respecto a si esto tiene un efecto positivo o negativo en la parametrización de la rugosidad (Nicholson et al., 2016).

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Análisis de datos meteorológicos

En la presente sección se analiza la información meteorológica registrada por la estación Vicuña 2 para el periodo entre el 1 de octubre del 2018 y y 28 de febrero del 2019. Esto con el fin de estudiar el ambiente de formación de penitentes y comprender los flujos a los cuales se encuentran expuestos, además de familiarizarse con la información meteorológica a utilizar en el balance energético.

4.1.1. Radiación

En las Tablas 4.1 y 4.2 se resumen los flujos radiativos registrados por la estación Vicuña 2. En la Figura 4.1 se presentan el promedio y máxima radiación de onda corta incidente diaria. Se registran valores bastante altos, sobrepasando incluso los 1300 W/m^2 . Esto es de esperarse en un ambiente de formación de penitentes, donde la radiación tiene un rol principal.

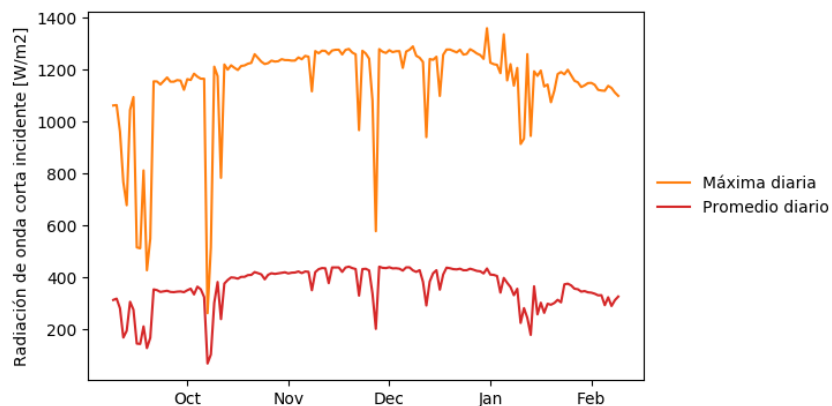


Figura 4.1: Radiación de onda corta incidente registrada por estación Vicuña 2.

Tabla 4.1: Radiación de onda corta incidente registrada por estación Vicuña 2.

SW_{in} [W/m^2]	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Mínima	-	-	-	-	-
Promedio	277,3	395,0	417,7	406,7	315,1
Máxima	1184,1	1258,8	1288,9	1358,9	1259,3

La radiación de onda larga neta presenta valores negativos mayores a $100 W/m^2$ para casi todo el periodo, a excepción de algunos intervalos que se pueden observar en la figura 4.2 donde el flujo neto llega a valores cercanos a cero. Si se observan las figuras 4.1 y 4.3, se puede notar que en estos mismos intervalos existe una disminución de la radiación de onda corta incidente y un aumento en la humedad relativa del aire, lo que se podría interpretar como presencia de nubosidad o incluso pequeñas tormentas, las cuales son características de la zona en el periodo estival. La presencia de nubosidad genera un aumento en la emisividad atmosférica (Moelg et al., 2009), y por lo tanto, un aumento en el flujo incidente de radiación de onda larga, lo que podría explicar la disminución en el flujo neto medido.

Tabla 4.2: Radiación de onda larga neta registrada por estación Vicuña 2.

LW_{net} [W/m^2]	Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
Mínimo	-234,0	-119,7	-278,1	-127,2	-294,7	-131,9	-295,1	-137,9	-267,1	-125,3
Promedio	-114,7	-77,6	-168,6	-95,0	-171,5	-103,6	-176,5	-97,0	-147,6	-92,4
Máximo	-1,8	-1,4	-24,8	-14,2	-17,3	-9,0	-56,4	-31,5	-3,1	-8,5

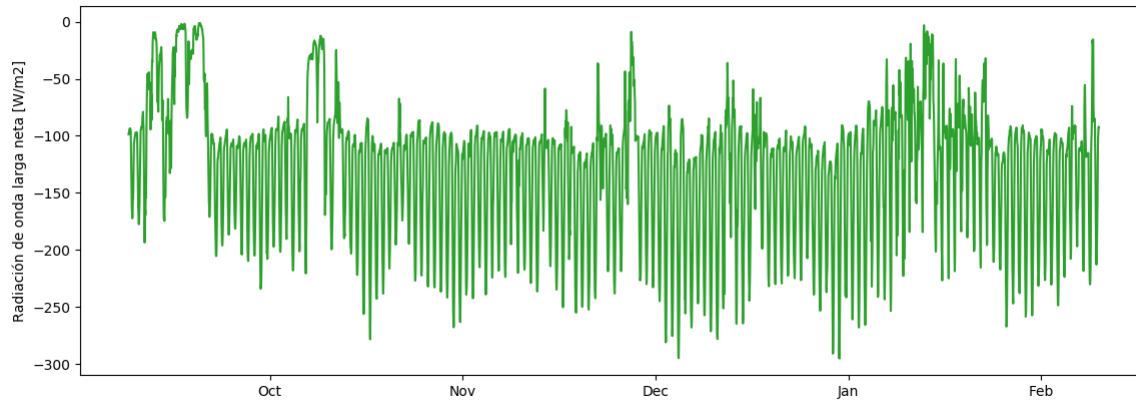


Figura 4.2: Radiación de onda larga neta registrada por estación Vicuña 2 para el periodo de estudio.

4.1.2. Flujos turbulentos

En la Tabla 4.3 se tiene un resumen de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento registradas durante el periodo de estudio (Figura 4.3), además del punto de rocío calculado para cada serie de datos.

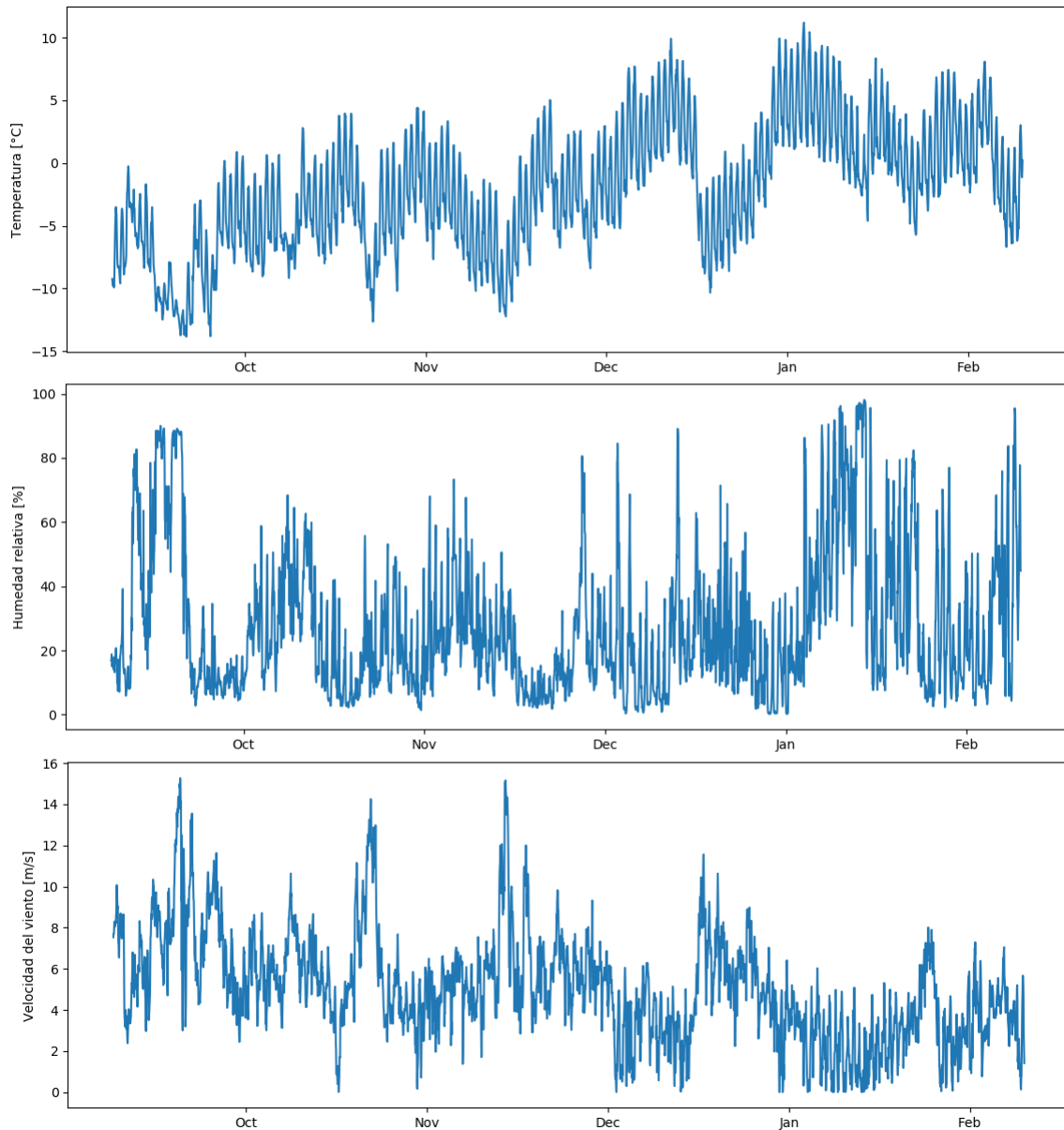


Figura 4.3: Variables meteorológicas medidas para el periodo de estudio.

Las temperaturas son bastante bajas y gran parte del tiempo bajo $0^{\circ}C$, presentándose las mínimas durante la noche. Se observa que estas aumentan a medida que avanza el periodo de ablación, encontrándose las máximas durante el mes de Enero sin exceder nunca los $12^{\circ}C$. La humedad, al igual que la temperatura, se mantiene muy baja durante todo el periodo de ablación, alcanzando su mínimo durante el mes de diciembre. Los vientos son en promedio moderados y relativamente constantes. De todas formas se observa una disminución de estos a medida que avanza la temporada de ablación. La temperatura del punto de rocío se encuentra muy por debajo los $0^{\circ}C$ durante todo el periodo de ablación, a excepción de algunos eventos durante los meses de enero y febrero. Todas las características mencionadas calzan muy bien con el ambiente de formación de penitentes como se discutió en el capítulo 2. En la figura 4.3 se observan los registros horarios medidos por la estación para el periodo de estudio.

Tabla 4.3: Variables meteorológicas registradas por estación Vicuña 2 y punto de rocío calculado para cada mes.

T [°C]	Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
Mínima	-13,8	-13,8	-12,4	-12,6	-12,2	-12,2	-8,9	-10,3	-6,5	-6,7
Promedio	-5,3	-8,5	-1,7	-5,4	-0,6	-5,0	3,1	-1,5	2,5	-1,2
Máxima	2,8	-3,1	4,4	-0,7	7,7	2,8	11,2	6,7	8,4	4,3

Rh [%]	Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
Mínima	4,8	2,8	1,4	2,2	0,3	0,8	0,2	0,2	2,3	4,2
Promedio	33,3	32,5	22,2	24,8	16,6	20,8	24,3	29,0	36,3	39,5
Máxima	89,2	90,0	63,6	73,3	75,3	84,5	75,8	96,2	96,7	98,1

u [m/s]	Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
Mínima	2,4	2,4	0,0	0,4	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Promedio	7,2	6,8	5,7	5,3	5,6	5,3	4,5	3,8	3,5	2,6
Máxima	14,4	15,3	14,3	12,9	15,1	15,2	11,6	10,6	7,9	8,0

T_{dp} [°C]	Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
Mínima	-40,9	-44,8	-46,2	-44,6	-58,1	-52,4	-62,8	-61,9	-40,9	-36,9
Promedio	-22,2	-25,4	-22,5	-25,5	-26,0	-27,7	-18,1	-22,5	-14,4	-16,7
Máxima	-8,4	-8,5	-8,1	-8,7	-7,7	-5,8	1,9	1,4	3,5	-0,2

4.2. Desarrollo de penitentes

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas a partir del modelo de desarrollo de penitentes.

4.2.1. Caso 1: Densidad interpenitente constante

En la Figura 4.4 se encuentra la altura de los penitentes y su tasa de crecimiento durante todo el periodo analizado, para las cuatro condiciones iniciales mencionadas en la metodología. Bajo una mirada rápida en la Figura 4.4 de la izquierda se observa que en los cuatro casos, los penitentes crecen de manera similar. Al observar las tasas de crecimiento (a la derecha), se puede notar que mientras las superficies sinusoidales mantienen su crecimiento constante en un comienzo, el crecimiento de las superficies rectas aumenta rápidamente. Esto se debe a que la curvatura inicial de la superficie sinusoidal tiene una mejor capacidad de retener las reflexiones que su análoga recta. Estas se van asimilando a medida que son moldeadas por la ablación. Cabe destacar que al final del periodo las tasas en las superficies de la misma naturaleza se asemejan bastante, sugiriendo que se llega a una morfología similar.

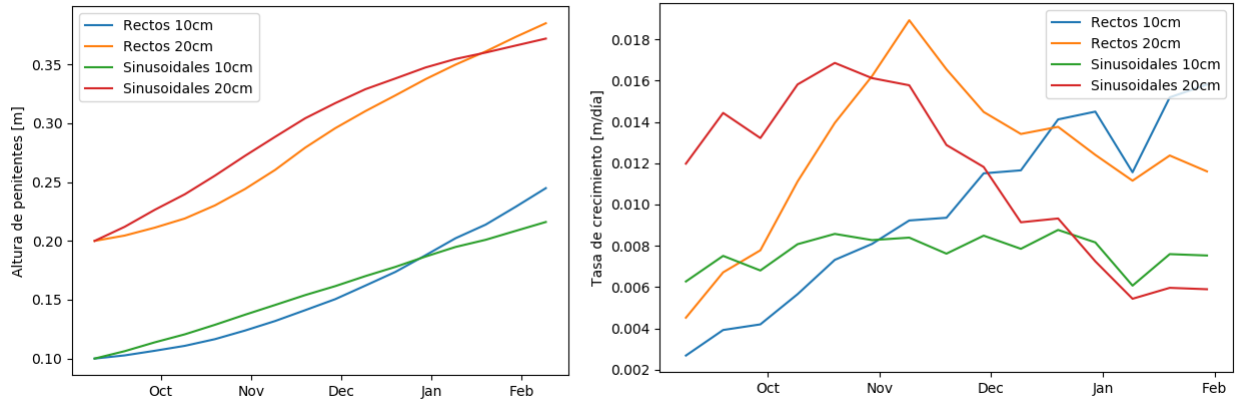


Figura 4.4: Altura de los penitentes modelados y su tasa de cambio a lo largo de la temporada de ablación.

En la Figura 4.5 se grafica la evolución de la superficie a lo largo del verano para el caso de penitentes sinusoidales de 20 cm de altura (dada la morfología similar que se logra para las cuatro condiciones iniciales, se analiza una única configuración inicial durante el resto del estudio). Si bien ocurre una inclinación en la dirección del sol (el norte se encontraría a la izquierda del gráfico) y estos toman una forma puntiaguda a pesar de su naturaleza inicial, estos distan mucho morfológicamente de los penitentes descritos en la bibliografía. Esto podría deberse a la consideración de tener únicamente la radiación solar como flujo energético dada la ausencia de información de otros flujos entre penitentes. Esta misma falta de información imposibilita hacer un estudio de ablación diferencial, considerando que es necesario determinar las zonas entre penitentes bajo el efecto del derretimiento y las zonas donde ocurre sublimación.

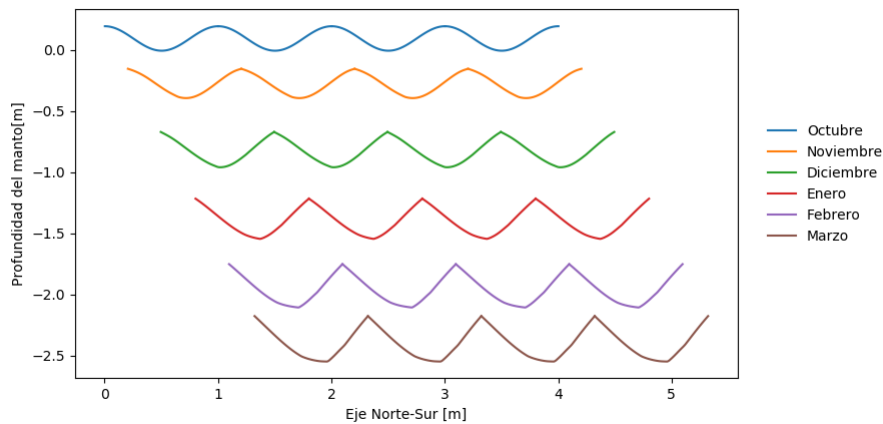


Figura 4.5: Desarrollo morfológico de los penitentes modelados, considerando la misma densidad para toda la superficie (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).

4.2.2. Caso 2: Densidad interpenitente variable

Para el caso de densidad variable se observa que las cuatro configuraciones crecen mucho más rápido, producto del mayor derretimiento en los valles, dada la disminución de la densidad como describe la ecuación (3.11) y se observa en la Figura 4.6. El aumento de la altura sin variar su separación disminuye las horas de exposición al sol de algunos sectores entre los penitentes y aumenta la exposición de las puntas durante el amanecer y atardecer, lo que provoca una disminución de la tasa de crecimiento a medida que estos se hacen más altos. Esto, sumado a un aumento en el ángulo cenital medio del sol posterior al solsticio de verano, genera incluso que a partir de febrero estos empiecen a hacerse mas pequeños.

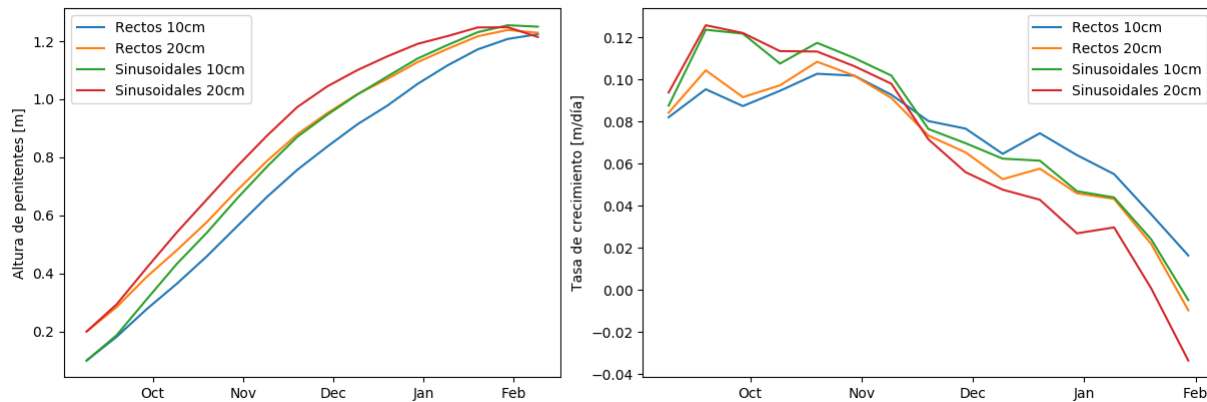


Figura 4.6: Altura de los penitentes modelados y su tasa de cambio a lo largo de la temporada de ablación.

Como se observa en la Figura 4.7, para este caso la morfología se asemeja mucho mas a las descripciones de penitentes, como los que se observan en la Figura 4.8: estructuras delgadas, de altura considerable, con forma de cuchillas e inclinadas ligeramente hacia el norte.

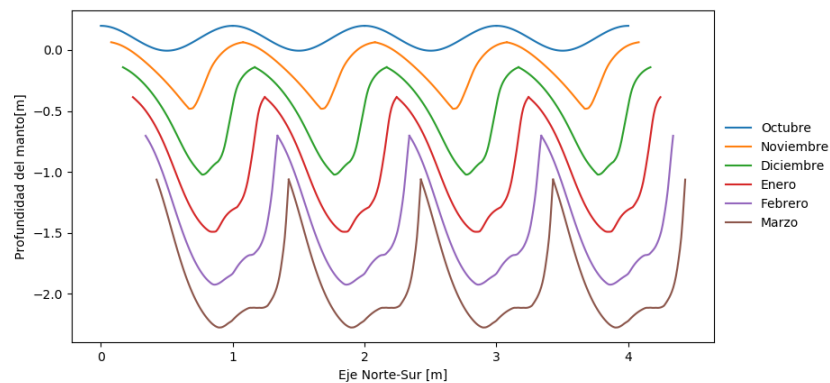


Figura 4.7: Desarrollo morfológico de los penitentes modelados, considerando una densidad que disminuye con la profundidad (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).

En ambos casos, tanto en la Figura 4.5 como en la Figura 4.7, es posible apreciar un desplazamiento de los penitentes en dirección sur (derecha de las figuras). La alta concentración de radiación directa recibida por la cara norte de estos, en comparación a la cara sur, la cual a excepción de algunas horas del medio día recibe únicamente radiación reflejada, provoca esta especie de desplazamiento explicado como una diferencia de ablación.

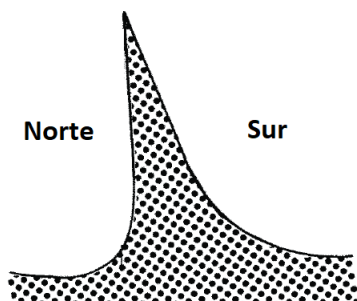


Figura 4.8: Esquema del promedio de las observaciones de 11 penitentes en el Glaciar Piloto. Tomado de Naruse and Leiva (1997).

Con el fin de revisar la efectividad del modelo desarrollado, éste se compara con los resultados obtenidos por Bergeron et al. (2006). Dentro de un laboratorio y bajo condiciones meteorológicas controladas, Bergeron et al. (2006) replicaron el desarrollo de penitentes para estudiar su morfología y distribución. En la Figura 4.9 se observa parte de los resultados que obtuvieron. Es posible apreciar que separan el desarrollo de penitentes en una fase inicial, correspondiente a la formación de estas estructuras, y una posterior fase de desarrollo donde éstas crecen a una tasa relativamente constante sin variar su separación.

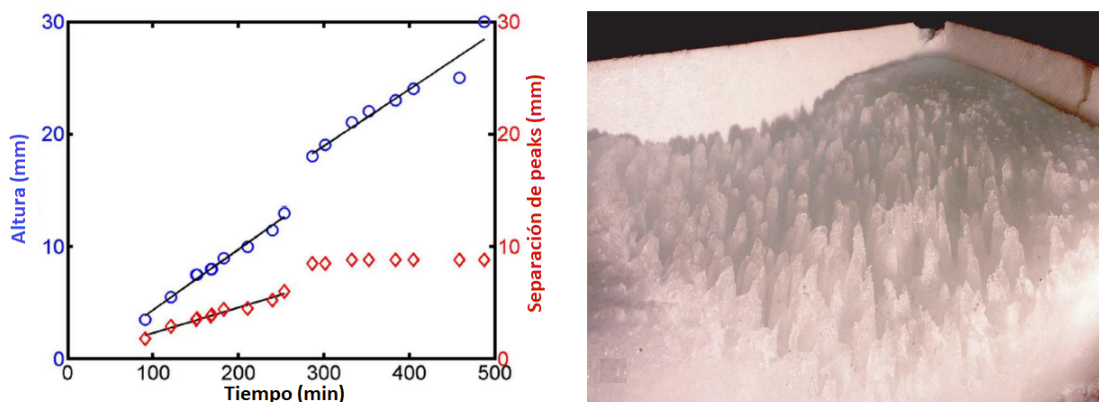


Figura 4.9: Crecimiento de penitentes formados experimentalmente. Se observa una diferenciación entre una fase inicial de formación y una posterior de desarrollo. Adaptado de Bergeron et al. (2006)

Dado que este estudio no abarca la fase inicial de formación de penitentes, se realizaron simulaciones a partir de las condiciones iniciales de la segunda fase observada en la Figura 4.9, replicando la condición de radiación constante y perpendicular a la superficie utilizadas en el experimento. Se consideró los casos de densidad interpenitente constante y variable, además de ablación por sublimación y derretimiento de forma separada. Esto último con el fin de definir qué tan necesario es que existan ambos procesos en el desarrollo de penitentes.

En los resultados obtenidos (Figura 4.10), se puede observar que en los cuatro casos modelados el crecimiento de los penitentes se comporta de forma lineal, mientras que la separación entre ellos se mantiene constante, resultado similar al obtenido experimentalmente. Esto indica que el modelo desarrollado replica de buena forma la distribución de la radiación en la superficie.

Es de esperar que las tasas de crecimiento modeladas no sean idénticas a las experimentales considerando la diversidad de variables presentes. A pesar de esto, los resultados se sitúan en torno a los valores experimentales (una diferencia del 23.3% con la mayor y 16.7% con la menor de las alturas modeladas), sugiriendo que los valores de los parámetros utilizados se condicen con la realidad. Por último, el hecho de que las tasas de crecimiento asociadas a la sublimación sean las mas bajas, sugiere que exista derretimiento en el desarrollo de los penitentes al menos en esta etapa.

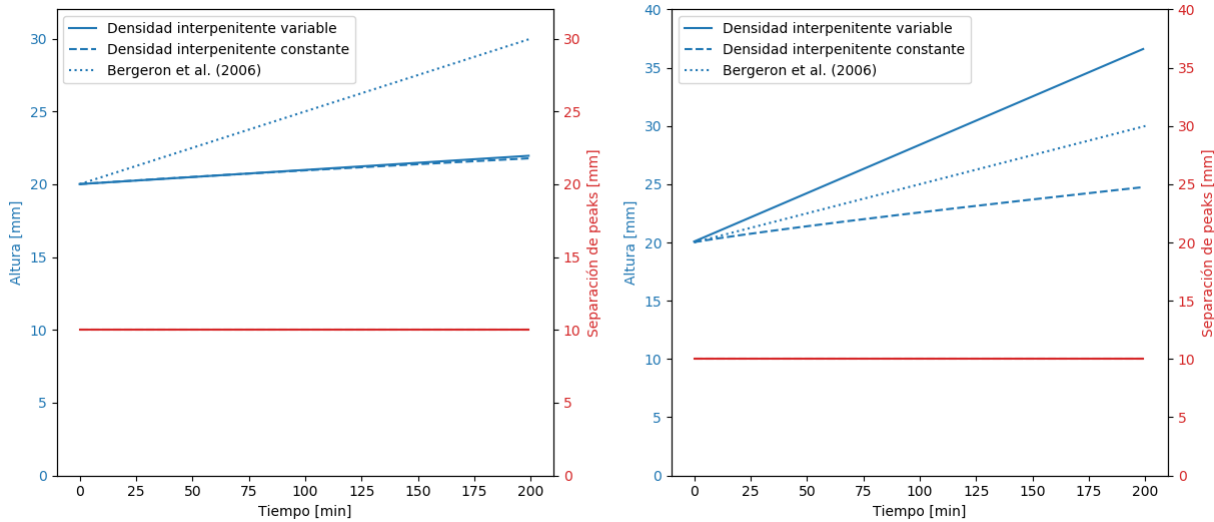


Figura 4.10: Modelo de desarrollo de penitentes para condiciones experimentales de Bergeron et al. (2006), considerando sublimación (izq.) y derretimiento (der.) de forma aislada como mecanismo de ablación.

4.3. Balance energético

En esta sección se analiza el efecto de la presencia de penitentes en algunos flujos de un balance energético. Esto se realiza considerando el modelo de desarrollo de penitentes para el mismo período de los datos meteorológicos analizados. Como se mencionó anteriormente, dada la similitud morfológica de las simulaciones, para esta sección solo se considera la simulación con penitentes sinusoidales de 20 cm de alto como condición inicial.

4.3.1. Flujos radiativos

Caso 1: Densidad interpenitente constante

En la Figura 4.11 se observa la radiación de onda corta neta sobre la superficie lisa y cubierta con penitentes, considerando una densidad interpenitente constante. Aunque en el promedio diario no se ve una gran variación, si la hay en las radiaciones máximas diarias. Dado que las mayores intensidades de radiación se dan cuando el sol se encuentra cercano a su máxima elevación, y es en esta misma condición donde el mecanismo de retención de radiación entre los penitentes se ve mas favorecido, producto de la iluminación total de la superficie interpenitente, es posible observar una mayor diferencia de energía entre una superficie con y una sin penitentes cuando se analiza la radiación máxima diaria.

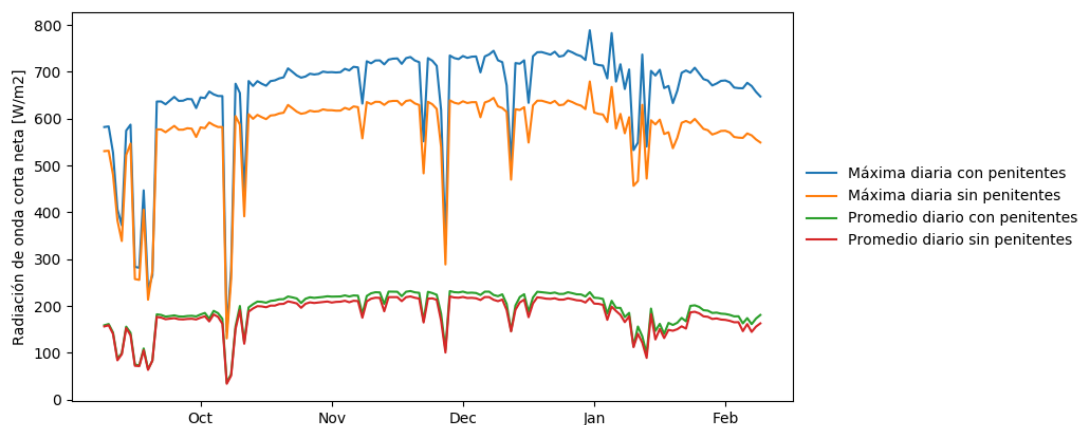


Figura 4.11: Radiación de onda corta neta sobre superficie con y sin penitentes considerando densidad interpenitente constante (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).

Caso 2: Densidad interpenitente variable

Dado que este caso presenta una mayor tasa de crecimiento para los penitentes, la radiación retenida entre penitentes aumenta, producto de la mayor cantidad de reflexiones que se darán antes de que la radiación vuelva a la atmósfera. Si bien la radiación máxima diaria aumenta hasta casi el doble que en el caso sin penitentes por lo descrito en la sección anterior, a medida que los penitentes crecen, también lo hace la sombra que estos generan durante las primeras y últimas horas del día, provocando que el promedio diario de radiación no vea un gran aumento a diferencia de los máximos diarios como se observa en la Figura 4.12.

Estos resultados son consecuente con parte de la bibliografía revisada (Cathles et al., 2014; Nicholson et al., 2016), donde se indica que la presencia de penitentes en un glaciar o manto nivoso acelera su derretimiento producto de la capacidad de retención de radiación solar que estos poseen.

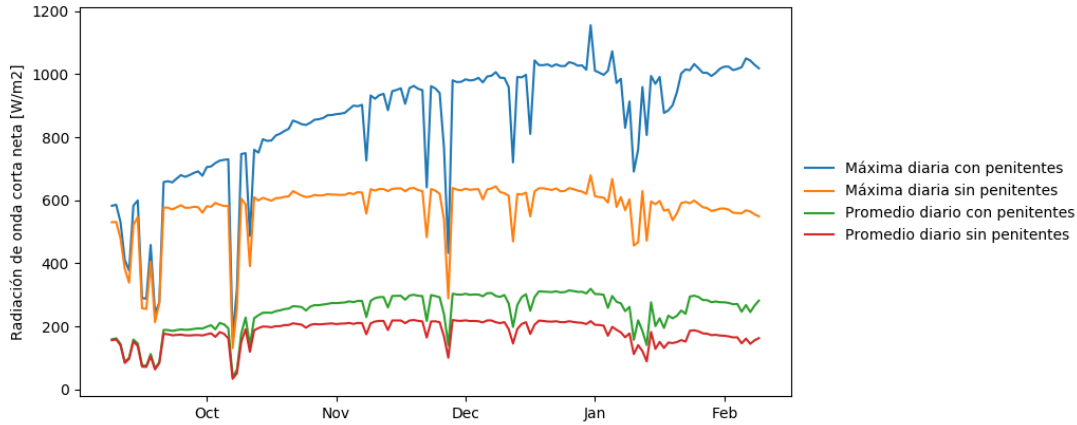


Figura 4.12: Radiación de onda corta neta sobre superficie con y sin penitentes considerando densidad interpenitente variable (condición inicial: penitentes sinusoidales de 20 cm de alto).

Albedo

Considerando la capacidad de retención de radiación entre los penitentes, es posible calcular un albedo a escala regional provocado por la presencia de estos, distinto al albedo del hielo en sí. Esta retención de radiación es producto de las múltiples reflexiones generadas entre los penitentes. Una fracción de la energía va siendo absorbida por la superficie tras cada reflexión en ella, provocando que el cociente entre la radiación reflejada a la atmósfera y la radiación incidente, sea menor que en el caso de una única reflexión.

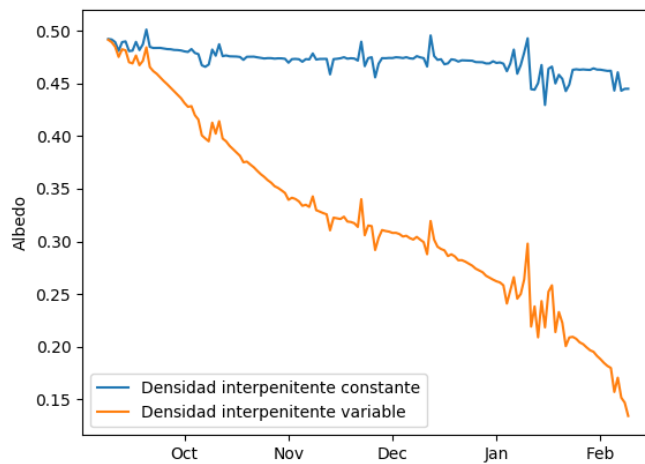


Figura 4.13: Albedo estimado con la absorción de la energía incidente entre los penitentes, considerando densidad interpenitente constante y variable.

Para calcular este albedo regional, se resta la energía total absorbida en el modelo de desarrollo de penitentes a la radiación incidente para la misma superficie, obteniendo así, la radiación reflejada a la atmósfera. Los resultados se presentan en la Figura 4.13, y se observa

que el albedo disminuye significativamente a medida que los penitentes crecen. Para el caso de los penitentes con densidad variable, este comienza muy cercano a 0,5 (valor otorgado al manto nivoso) y llega a valores cercanos a 0,15 al final del proceso de ablación. Estos resultados se relacionan bien con los valores obtenidos por Lhermitte et al. (2014), quien realizó un estudio del albedo sobre un glaciar cubierto de penitente utilizando mediciones in situ e imágenes satelitales. El estudio mencionado registró valores de albedo entre 0,6 y 0,1, los cuales disminuían a medida avanzaba la temporada de ablación.

4.3.2. Flujos turbulentos

Longitud de rugosidad aerodinámica

En la Figura 4.14 se observa la longitud de rugosidad aerodinámica (z_0) calculada para cada caso de estudio siguiendo la metodología descrita. Se analiza además la posibilidad de existencia de un plano cero de desplazamiento. Se observa en primera instancia que la rugosidad está directamente relacionada a la altura de los penitentes, dada la similitud entre las curvas de crecimiento (Figura 4.4 y 4.6) y de longitud de rugosidad aerodinámica. La presencia del plano de desplazamiento disminuye notablemente la rugosidad, lo que indica que es estrictamente necesario trabajar con mediciones de flujos entre los penitentes para parametrizar de forma fiable la rugosidad. De todas formas, los altos valores de longitud de rugosidad aerodinámica alcanzados sin considerar el plano de desplazamiento, aún se encuentran cercanos a los valores que la literatura le da a este tipo de estructuras (e.g. 0,2 m; Corripio and Purves (2005)).

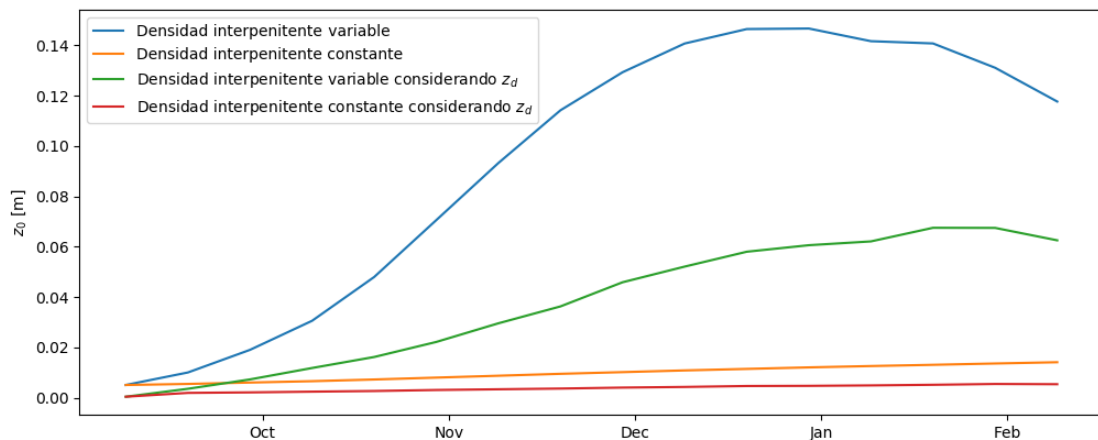


Figura 4.14: Evolución de la rugosidad aerodinámica para los casos de densidad interpenitente constante y variable, considerando y no considerando el plano de desplazamiento (z_d).

Flujo de calor sensible

Los flujos de calor sensible se presentan estrictamente positivos, dada la suposición que se tomó respecto a la temperatura superficial. Donde, si la temperatura del aire se encuentra bajo 0°C , la temperatura superficial es igual a esta, provocando que los flujos de calor sensible sean igual a 0. Se observa también en la Figura 4.15, que los flujos de calor sensible dependen de gran manera de la rugosidad aerodinámica, generando un flujo hasta diez veces más grandes, si se comparan los extremos de rugosidad máxima (0,2 m para el caso de densidad variable sin plano de desplazamiento) y mínima (sin penitentes donde $z_0 = 0,2\text{mm}$, valor dentro de los órdenes de magnitud usualmente utilizados sobre mantos nivosos lisos; Hock (2005)).

Es difícil generar conclusiones dado el sesgo que se produce al no tener información sobre la temperatura superficial, pero cabe mencionar que incluso considerando las condiciones de rugosidad más altas (morado), el flujo no sobrepasa los 180 W/m^2 , manteniéndose por debajo del 20% de los flujos radiativos en las mismas condiciones.

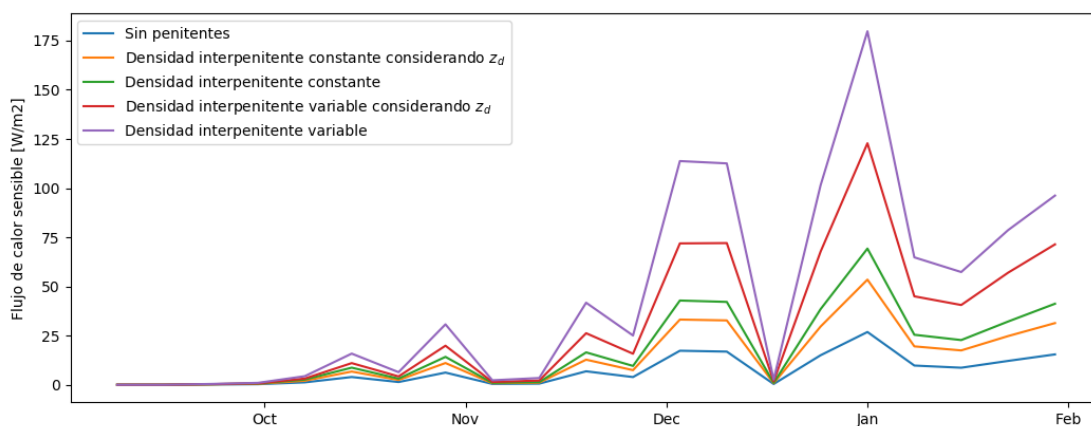


Figura 4.15: Flujo de calor sensible para los cinco casos en análisis.

Flujo de calor latente

Al igual que en los flujos de calor sensible, en la Figura 4.16 se observa una estricta dependencia del flujo de calor latente con z_0 , con un énfasis en los períodos donde se manifiestan altas velocidades de viento. Este flujo pareciera tomar un rol muy importante a medida que los penitentes crecen, lo que sugiere un aumento en las tasas de sublimación en estos ambientes. El flujo de calor latente llega a ser tan alto, que para ambas rugosidades calculadas a partir del modelo de densidad variable logra superar en algunas instancias incluso a la radiación solar, cuyo promedio mensual máximo es de 287 W/m^2 en el mes de diciembre. Esto sugiere que es de gran importancia profundizar en el análisis de los flujos turbulentos al realizar balances sobre glaciares con penitentes, donde generalmente estos cumplen un rol secundario frente a los flujos radiativos. De todas formas, es necesario mencionar que al igual

que en el flujo de calor sensible, la falta de información meteorológica entre penitentes no permite hacer una correcta estimación. Al no considerar el aumento de humedad relativa que se esperaría encontrar entre penitentes (Amstutz, 1958), es posible que se estén sobreestimando estos flujos.

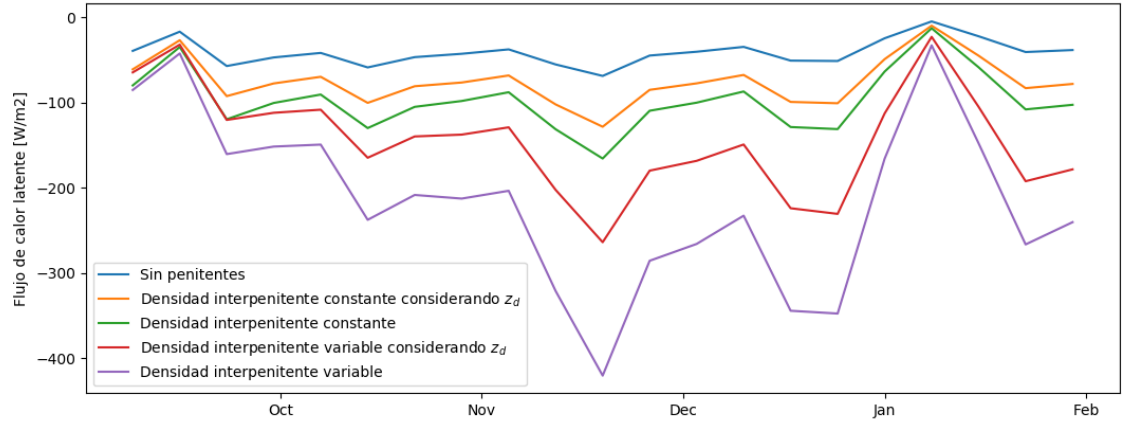


Figura 4.16: Flujo de calor latente para los cinco casos en análisis.

4.3.3. Balance total

Se utiliza la ecuación 2.1 para generar un balance energético total para cada uno de los casos de estudios y así poder estimar ψ . Se analiza el promedio de cada flujo de manera mensual, mientras que el cálculo de la curva que representa el balance total se calcula como la suma de los promedios semanales de los flujos.

Caso 0: Sin penitentes

En la Figura 4.17 se presenta el balance energético para el caso de el manto nivoso liso. Se observa una notable preponderancia de los flujos radiativos sobre los turbulentos. Al lado derecho de la figura se puede observar que estos últimos sumados, no sobrepasan el 15% de los flujos totales en el balance energético durante todo el periodo. Los flujos radiativos aumentan a medida se acercan al solsticio de verano para luego comenzar a decrecer. Los flujos de calor sensible aumentan a medida avanza el verano llegando a su máximo en el mes de Enero, mes donde se registran las temperaturas mas altas. Por otra parte los flujos de calor latente encuentran su máximo en el mes diciembre donde se registran los valores de humedad más bajos, como se observa en la Tabla 4.3. El valor de ψ se mantiene positivo para casi todo el periodo, lo que indica la disponibilidad de energía para derretimiento durante todo el periodo estival.

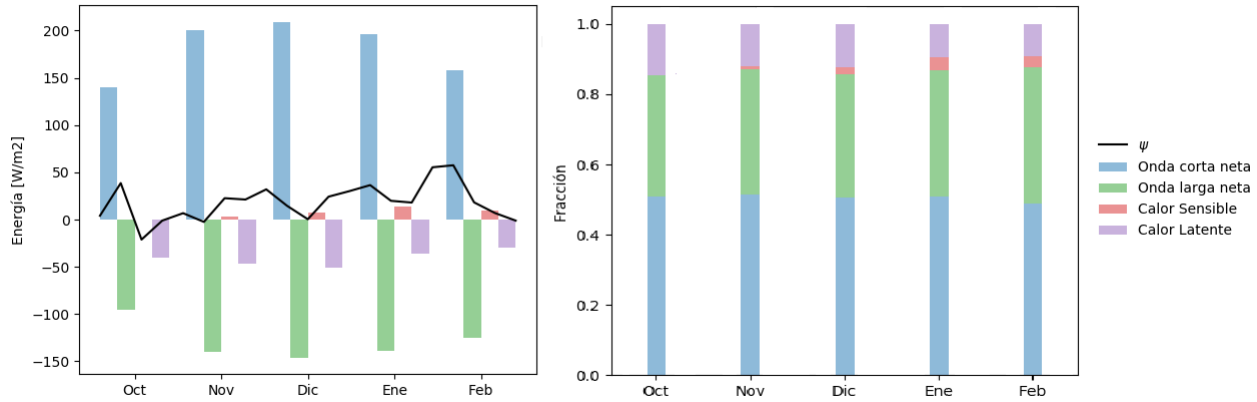


Figura 4.17: Balance energético sobre superficie sin penitentes.

Caso 1.1: Densidad interpenitente constante sin considerar plano de desplazamiento

En la Figura 4.18 se observa que la incorporación de penitentes tiene un efecto inmediato en el balance total. Dada la baja altura que alcanzan los penitentes en este caso, no se observa un gran aumento en la radiación de onda corta neta ($12 W/m^2$) al final de la temporada). No así en los flujos turbulentos, donde a pesar de seguir considerando una rugosidad bastante baja ($1 mm$), su aporte al balance total aumenta de un 11 % hasta casi el 25 %. Dado que los flujos de calor sensible están asociados a la diferencia de temperatura entre la superficie y el entorno, las bajas temperaturas en la zona durante el periodo de ablación provocan que estos no se manifiesten de gran forma hasta los últimos meses.

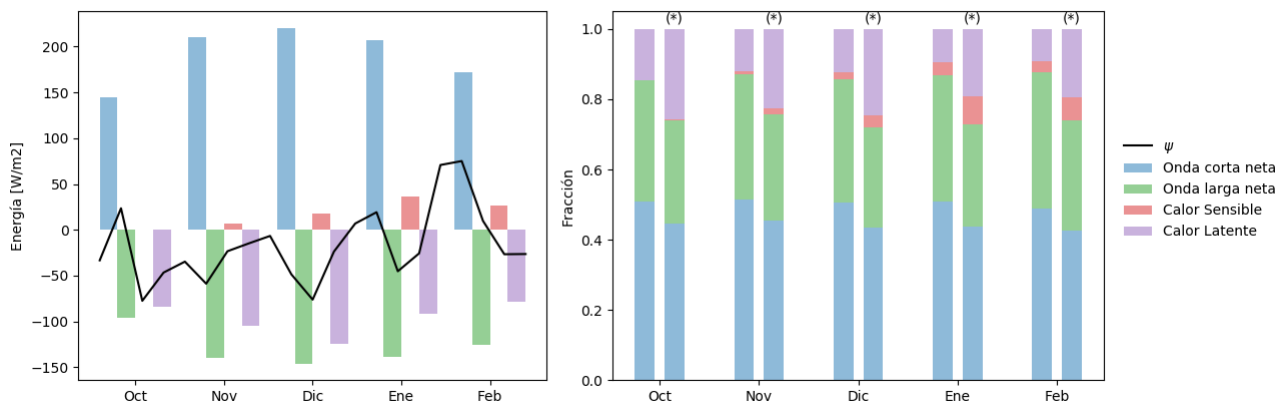


Figura 4.18: Balance energético para campo de penitentes con densidad constante, sin considerar plano de desplazamiento (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).

Caso 1.2: Densidad interpenitente constante considerando plano de desplazamiento

Este caso se asemeja bastante al anterior, que con respecto a la radiación la configuración es la misma y es la longitud de rugosidad aerodinámica lo único que cambia (Figura 4.19). Al considerar un plano de desplazamiento, la rugosidad se calcula con la altura de los obstáculos sobre este plano, provocando una disminución en ésta. Esta última consideración, sumado a que se trabaja sobre el modelo de densidad constante, indica que este caso es el más conservador con respecto al efecto de los penitentes en el balance energético. A pesar de esto, se observa una notable disminución en el balance total, provocando que este sea negativo gran parte del periodo, lo que habla de un 'enfriamiento' del manto, disminuyendo la tasa de derretimiento. Esto recalca la importancia de la estimación de la rugosidad al momento de hacer un balance.

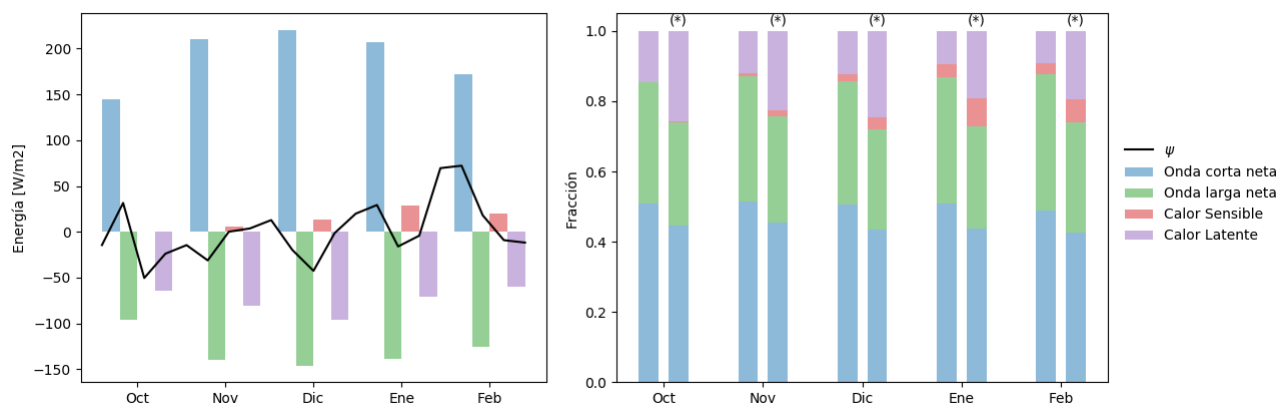


Figura 4.19: Balance energético para campo de penitentes con densidad constante considerando plano de desplazamiento (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).

Caso 2.1: Densidad interpenitente variable sin considerar plano de desplazamiento

En la Figura 4.20 se observan los resultados para este caso, el cual representa el mayor efecto de los penitentes sobre el balance. Con respecto a la radiación de onda corta neta, se observa un aumento de casi $100 W/m^2$ con respecto a los casos anteriores como bien se explica en la sección 4.3.1. De todas formas, este aumento se ve opacado por el rápido aumento de los flujos turbulentos producto de la alta rugosidad, los cuales llegan a representar más del 40 % del balance total. En este caso, el balance es muy negativo para todo el periodo a excepción de algunos eventos de altas temperaturas, provocando que exista derretimiento solo durante el último mes del periodo estudiado.

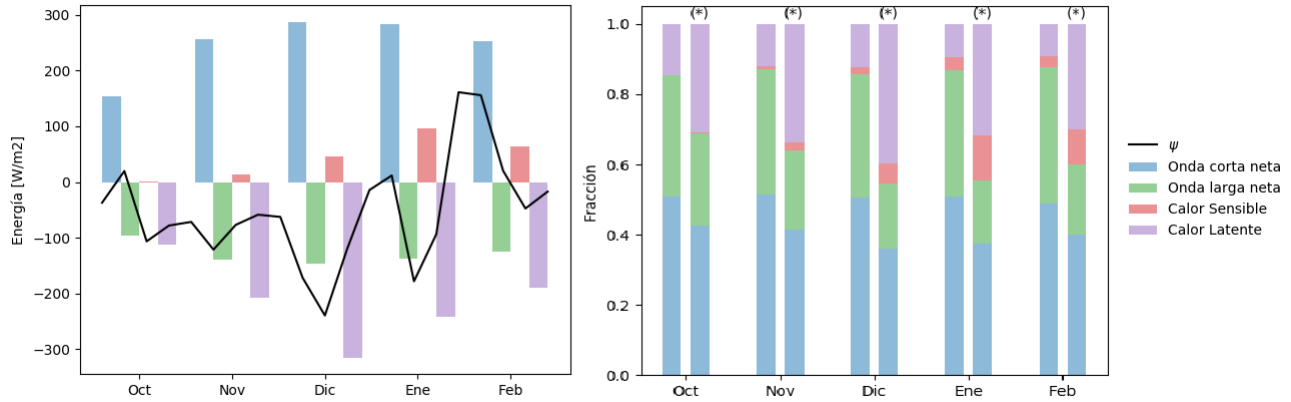


Figura 4.20: Balance energético para campo de penitentes con densidad variable (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).

Caso 2.2: Densidad interpenitente variable considerando plano de desplazamiento

Este escenario cuyos resultados se encuentran en la Figura 4.21, representa el más realista de los cuatro, considerando la morfología similar a la realidad que se alcanza y la existencia de un plano de desplazamiento acorde a la distribución de los penitentes. Se observa claramente en los flujos turbulentos, cómo la consideración del plano-cero de desplazamiento disminuye la influencia de estos a medida que la rugosidad es mayor, llegando a tener una disminución cercana al 35 % en el mes de diciembre con respecto al caso anterior, donde no se consideró el plano-cero de desplazamiento, cuando la rugosidad es máxima (ver Figura 4.14). El balance total se presenta negativo durante la primera mitad del periodo. El alza en las temperaturas, la concentración de la radiación producto de los penitentes y el aumento en la humedad relativa, provoca que al final del periodo se encuentren valores muy positivos, aumentando las tasas de derretimiento durante estos meses.

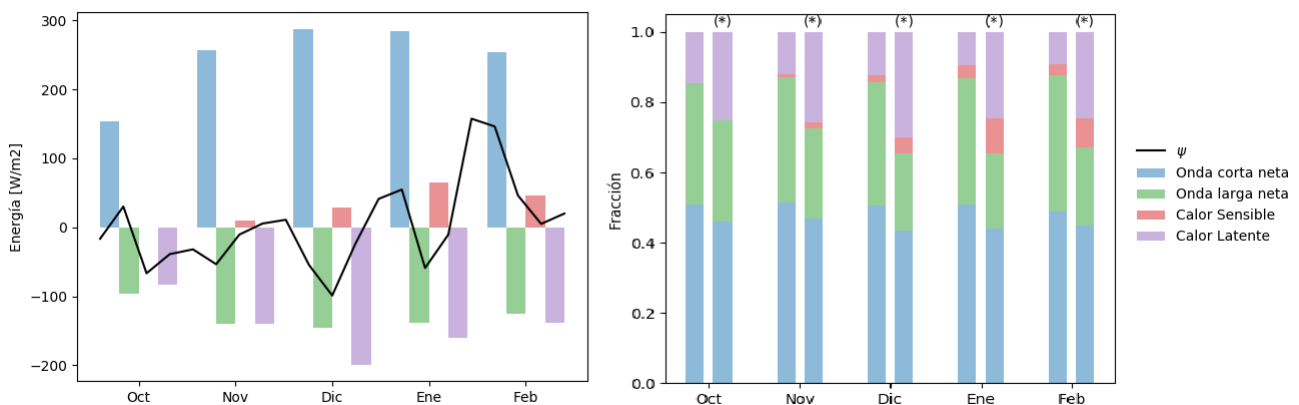


Figura 4.21: Balance energético para campo de penitentes con densidad variable considerando plano de desplazamiento (izq.). Aporte por flujo al balance energético en superficie lisa y con penitentes (*) (der.).

Analizando los casos anteriores, se puede afirmar que el desarrollo de penitentes produce un aumento en los flujos turbulentos, particularmente en los flujos de calor latente, de un balance energético. El aumento es tal, que estos flujos pueden pasar a tener un rol principal en el balance, sugiriendo que exista un aumento en las tasas de sublimación. Este resultado se ve respaldado en el estudio realizado por Cornwell et al. (2016), donde se hizo una reconstrucción espacio-temporal del SWE (snow water equivalent) en los andes extra-tropicales, lo que se podría describir como el contenido de agua en el manto nival cordillerano. Al comparar esta reconstrucción, con el volumen de agua de los ríos tras el derretimiento para la zona norte de Chile durante la temporada de verano, se encontró una gran diferencia. Diferencia que el autor asocia a las altas tasas de sublimación producto de las condiciones meteorológicas predominantes en la zona (Corripio and Purves, 2005).

Capítulo 5

Conclusiones y comentarios

Se logra modelar el desarrollo de penitentes utilizando únicamente la radiación solar, para cuatro topografías iniciales distintas, considerando una densidad constante para todo el manto y una variable según su posición respecto a la altura media. La forma de la topografía inicial no pareciera ser determinante en las estructuras finales si se observa el periodo de ablación por completo. Dada la ausencia de estudios respecto a los flujos entre penitentes, fue imposible considerar el efecto de la ablación diferencial producto del derretimiento y sublimación.

El modelo de densidad constante no entrega resultados muy alentadores respecto a la altura y morfología alcanzada. Esto indica que si bien la radiación solar cumple un rol importante en la formación de penitentes, son estrictamente necesarios otros procesos o condiciones que favorezcan el crecimiento de estos (e.g. ablación diferencial por condiciones ambientales interpenitentes, variabilidad espacial de la densidad o el albedo en el manto) sobre todo durante el periodo inicial de su formación, donde no existe mucha retención de radiación solar.

El modelo de densidad variable entrega resultados bastante acordes a la bibliografía, tanto en morfología como en la amplitud que los penitentes alcanzan. Esto sugiere que la densidad podría tener un rol importante durante el desarrollo de penitentes, cuya variación estaría asociada a los distintos ambientes que, se cree, se generan entre estos. Otro parámetro que podría conducir a resultados similares, sería una variación vertical del albedo, producto de la acumulación de material particulado en los valles entre penitentes, condición que no fue abarcada en este estudio.

La presencia de penitentes afecta notablemente al flujo neto de radiación de onda corta, efecto que se acentúa con la altura de estos. Los resultados del modelo indican que estos podrían llegar a absorber casi el 90 % de la radiación incidente al final de su desarrollo. No se analizó el efecto de los penitentes en la radiación de onda larga dada la ausencia de mediciones. Estos podrían afectarla dada la variación en el factor de visibilidad del cielo existente a lo largo del campo de penitentes.

Los valores de la longitud de rugosidad aerodinámica calculados se encuentran dentro de lo descrito por la bibliografía. Se debe recalcar que la consideración de un plano de despla-

zamiento para los flujos verticales disminuye la longitud de rugosidad en valores cercanos al 50 %, lo que genera una gran diferencia a la hora de estimar los flujos turbulentos. Dicho esto, es necesario un estudio detallado de las condiciones de flujos entre penitentes para obtener un balance energético confiable.

La ausencia de mediciones de parámetros meteorológicos entre penitentes, limitan el estudio del efecto de los penitentes sobre los flujos turbulentos únicamente a la variación de la rugosidad. En esta línea, se observa una fuerte dependencia entre ambos, donde la presencia de penitentes genera flujos turbulentos hasta diez veces mas grandes que los generados en el escenario sin estos. Esto comprueba la importancia de considerar y parametrizar de manera detallada el desarrollo de penitentes al momento de realizar un balance energético, si se desea obtener resultados precisos.

Si bien se comprueba que existe un aumento en la radiación de onda corta neta entre los penitentes, no es posible asegurar lo mismo para el balance energético total. Las bajas temperaturas y humedad en los ambientes donde se desarrollan penitentes, sumado a la alta rugosidad que estos pueden generar en el terreno, crean flujos de calor latente mucho mayores a los de calor sensible y de magnitud comparable con la radiación de onda corta neta. Esto provoca que el balance total se pueda ver reducido, disminuyendo las tasas de derretimiento.

Bibliografía

Amstutz, G. C. (1958). On the formation of snow penitentes. *Journal of Glaciology*, 3(24):304–311.

Anderson, E. A. (1976). A point energy and mass balance model of a snow cover.

Andreas, E. L. (1987). A theory for the scalar roughness and the scalar transfer coefficients over snow and sea ice. *Boundary-Layer Meteorology*, 38(1-2):159–184.

Arias Vargas, V. H., Kinnard, C., Daniele, L., and McPhee Torres, J. (2018). Simulación del balance de masa distribuido de verano (2011 – 2012) del glaciar tapado, valle del elqui, chile, y análisis e incorporación del efecto de los penitentes en el intercambio energético. Master’s thesis, Universidad de Chile.

Bergeron, V., Berger, C., and Betterton, M. (2006). Controlled irradiative formation of penitentes. *Physical review letters*, 96(9):098502.

Betterton, M. (2001). Theory of structure formation in snowfields motivated by penitentes, suncups, and dirt cones. *Physical Review E*, 63(5):056129.

Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications*, volume 1. Springer Science & Business Media.

Cathles, L. M., Abbot, D. S., and MacAyeal, D. R. (2014). Intra-surface radiative transfer limits the geographic extent of snow penitents on horizontal snowfields. *Journal of Glaciology*, 60(219):147–154.

Cathles IV, L. M. (2011). *Radiative energy transport on the surface of an ice sheet*. The University of Chicago.

Claudin, P., Jarry, H., Vignoles, G., Plapp, M., and Andreotti, B. (2015). Physical processes causing the formation of penitentes. *Physical Review E*, 92(3):033015.

Cornwell, E., Molotch, N., and McPhee, J. (2016). Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical andes cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1).

Corripio, J. G. and Purves, R. S. (2005). Surface energy balance of high altitude glaciers in the central andes: The effect of snow penitentes. *Climate and hydrology in mountain areas*, pages 15–27.

- Darwin, C. (1840). *Journal of Researches Into the Geology and Natural History of the Various Countries Visited by HMS Beagle, Under the Command of Captain Fitzroy from 1832 to 1836 by Charles Darwin*. Colburn.
- DeWalle, D. R. and Rango, A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press.
- Greuell, W. and Smeets, P. (2001). Variations with elevation in the surface energy balance on the pasterze (austria). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D23):31717–31727.
- Grimmond, CSB y Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of applied meteorology*, 38(9):1262–1292.
- Guilleminot, P. and Olea, R. (2018). Formation of spiky structures in high-altitude snow patches: penitente tilting. *arXiv preprint arXiv:1804.09700*.
- Hobley, D., Moore, J., and Howard, A. (2013). How rough is the surface of europa at lander scale? In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 44, page 2432.
- Hock, R. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in physical geography*, 29(3):362–391.
- Lettau, H. (1969). Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *Journal of applied meteorology*, 8(5):828–832.
- Lhermitte, S., Abermann, J., and Kinnard, C. (2014). Albedo over rough snow and ice surfaces. *The Cryosphere*, 8(3):1069–1086.
- Lliboutry, L. (1954). The origin of penitents. *Journal of Glaciology*, 2(15):331–338.
- Milankovitch, M. (1930). Mathematische klimalehre und astronomische theorie der klimaschwankungen. *Handbuch der Klimatologie 1*.
- Moelg, T., Cullen, N. J., and Kaser, G. (2009). Solar radiation, cloudiness and longwave radiation over low-latitude glaciers: implications for mass-balance modelling. *Journal of Glaciology*, 55(190):292–302.
- Moores, J. E., Smith, C. L., Toigo, A. D., and Guzewich, S. D. (2017). Penitentes as the origin of the bladed terrain of tartarus dorsa on pluto. *Nature*, 541(7636):188.
- Munro, D. S. (1989). Surface roughness and bulk heat transfer on a glacier: comparison with eddy correlation. *Journal of Glaciology*, 35(121):343–348.
- Naruse, R. and Leiva, J. C. (1997). Preliminary study on the shape of snow penitents at piloto glacier, the central andes. *Bulletin of glacier research*, 15:99–104.
- Nicholson, L. I., Petlicki, M., Partan, B., and MacDonell, S. (2016). 3d surface properties of glacier penitentes over an ablation season, measured using a microsoft xbox kinect. *Cryosphere*, 10(5):1897–1913.

- Oerlemans, J. and Klok, E. (2002). Energy balance of a glacier surface: analysis of automatic weather station data from the morteratschgletscher, switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34(4):477–485.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge.
- Paterson, W. S. B. (2016). *The physics of glaciers*. Elsevier.
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J.-E., and Carenzo, M. (2008). A study of the energy balance and melt regime on juncal norte glacier, semi-arid andes of central chile, using melt models of different complexity. *Hydrological Processes*, 22(19):3980–3997.
- Pfeffer, W. T. and Bretherton, C. S. (1987). The effect of crevasses on the solar heating of a glacier surface. *IAHS Publ*, 170:191–205.
- Radić, V., Menounos, B., Shea, J., Fitzpatrick, N., Tessema, M. A., and Déry, S. J. (2017). Evaluation of different methods to model near-surface turbulent fluxes for a mountain glacier in the cariboo mountains, bc, canada. *The Cryosphere*, 11(6):2897–2918.
- Roch, A. (1954). The glaciers, snow and avalanches of mount everest. *Journal of Glaciology*, 2(16):428–430.
- Shi, Y. (1982). Ice pyramids and other related ablation forms on the northern slope of mount xixia bangma. *Monograph on Mount Xixia Bangma Scientific Expedition, 1964*, pages 74–91.
- Shiklomanov, I. A. and Rodda, J. C. (2004). *World water resources at the beginning of the twenty-first century*. Cambridge University Press.
- Smeets, C., Duynkerke, P., and Vugts, H. (1999). Observed wind profiles and turbulence fluxes over an ice surface with changing surface roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 92(1):99–121.
- Smith, M. W., Quincey, D. J., Dixon, T., Bingham, R. G., Carrivick, J. L., Irvine-Fynn, T. D., and Rippin, D. M. (2016). Aerodynamic roughness of glacial ice surfaces derived from high-resolution topographic data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(4):748–766.
- Veit, H. (1993). Upper quaternary landscape and climate evolution in the norte chico (northern chile): an overview. *Mountain Research and Development*, pages 139–144.
- Walraven, R. (1978). Calculating the position of the sun. *Solar energy*, 20(5):393–397.