



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ANALISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO EN LA CUENCA DE PANGAL EN PANGAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

PABLO ANDRÉS DEL RÍO LA MURA

PROFESOR GUÍA

JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISION

XIMENA VARGAS MESA

MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN

El presente trabajo de tesis consiste en el estudio del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal, ubicada en la VI Región. Por medio del modelo semidistribuido WEAP se modeló hidrológicamente, además por medio de un módulo acoplado se modeló glaciológicamente la cuenca a escala diaria, para luego realizar proyecciones de caudales para los años 2045-2075, se utilizarán los dos escenarios extremos de los cuatro creados y presentados en el quinto y último reporte del IPCC el año 2011, denominados RCP8.5 y RCP2.6 que corresponden al más desfavorable y al más conservador respectivamente.

El objetivo principal de la tesis es estimar la variación del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal. Para esto se usará un módulo de glaciares que se acopló al WEAP y se manipularán variables meteorológicas que se han tomado en terreno en la cuenca ubicada al norte próxima a la cuenca en estudio que ha sido monitoreada con varias estaciones a partir del 2004. Para llevar a cabo el objetivo se analizarán los antecedentes que existen sobre cambio climático, modelación hidrológica, glaciológica y de nieve. Luego, se dará paso a calibrar el modelo sin glaciares y a continuación se calibrarán los parámetros del módulo de glaciares, que dicho sea de paso, son el motor principal de la tesis. Se escogerán los nuevos escenarios de cambio climático llamados RCP o vías de concentración representativas, propuestos por Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) el año 2011. Se seleccionarán las dos forzantes radiativas extremos para así poder analizar todo el espectro generado por el modelo a seleccionar. Finalmente se analizarán los datos logrados por la modelación y se concluirá sobre la disponibilidad hídrica de la cuenca.

La modelación dará como resultado las curvas de variación estacional con probabilidades de excedencia y la disponibilidad del recurso hídrico en general. Los resultados permitirán realizar decisiones sobre el futuro hídrico de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Es difícil cerrar un ciclo en un par de palabras, el término de la memoria cierra la etapa universitaria la cual agradezco y mucho a todos los partícipes de esta, padre, hermanos, polola, amigos, compañeros, profesores, futbolistas y skaters amateurs, temucanos etc. nombraré algunos: Margarita Amelia, Daniel, Agustina, Allan, Cote, Keler, Chuika, Toto, Maxi, Cuevas, Roxy, Amanda, Gato, Lalo, Pepa, Rulo, Gina, Cata, Andre, Queso, Nachos, Trapito, Funji, JLo, Pablo C, Chafic, Molina, German, la Flaca, Jannik, las Feñas, Carla, Tomas, Lapi, Panky, Pelao, Guggi, Fepo, Tario, Rorro, Waton Lagas, Simio, Julian, Tomas, Mauro, Chapa, Panke, Turko, chancho Oltra, Rebolledo, Team Benetton; TT, Chalo y Cetro... la lista es para no terminar.

Agradecer también a ATC Williams por darme la oportunidad de realizar de manera conjunta el trabajo y el desenlace de la memoria, en especial a Carlos Pavissich.

Finalmente agradecer en especial a mi profesor guía James McPhee, por todo el apoyo brindado en el desarrollo de la tesis con ideas, sugerencias, comentarios, etc. en especial también a la profesora Ximena Vargas por lo que aprendí de ella en mis años como universitario y su ayuda en la memoria, y una mención honrosa al gran grupo del AMTC, Fernando, Edward, Max, el no tan chico AMTC Yuri y el más importante de todos por la ayuda y consejos Miguel Lagos.

Tabla de contenido

Resumen.....	ii
Agradecimientos	iii
Lista de figuras.....	vi
Lista de tablas.....	ix
1 Introducción	10
1.1 Motivación	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo general	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
2 Revisión Bibliográfica	12
2.1 Antecedentes Cambio Climático.....	12
2.2 Modelación hidrológica	13
2.3 Modelación Glaciológica	14
2.3.1 Balance de energía	14
2.3.2 Grado-día.....	15
2.3.3 Trabajos que incluyen el modelo grado-día para la modelación de cuencas ...	16
2.4 Modelación en WEAP.....	18
2.4.1 Módulo de glaciares para el modelo WEAP.....	19
2.5 Índices de Modelación Hidrológica	20
2.5.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe	20
2.5.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico.....	20
2.5.3 Error cuadrático medio.....	21
2.5.4 BIAS.....	21
2.6 Modelación Climática	21
2.6.1 Modelo CSIRO MK3.6	22
2.6.2 Modelo CanESM2.....	22
2.7 Métodos de Procesamiento de Información	22
3 Descripción de la Zona de Estudio.....	24
3.1 Ubicación y antecedentes de la región en estudio.....	24
3.2 Cuenca en estudio	24
3.3 Glaciares.....	26
4 Análisis y procesamiento de Datos	28
4.1 Precipitación.....	28
4.1.1 Estaciones DGA	28
4.1.2 Estaciones División El Teniente	29
4.1.3 Gradiente de precipitación	31

4.2	Estaciones para la temperatura y la humedad.	34
4.2.1	Temperatura	34
4.2.2	Humedad	35
4.3	Nubosidad	35
4.4	Viento.....	35
4.5	Análisis del proceso de escalamiento.....	35
4.5.1	Escalamiento espacial	35
4.5.2	Escalamiento temporal	36
4.6	Comparación de los modelos de cambio climático Mk3.6 y CanESM2	37
4.7	Glaciares.....	38
5	Modelación.....	41
5.1	Modelo WEAP	41
5.2	Modelación Glaciológica	41
5.3	Estimación del escurrimiento a nivel de subcuenca.....	43
5.4	Evolución anual del glaciar	46
5.5	Modelación a escala diaria	46
5.5.1	Calibración del modelo WEAP con módulo de glaciar sin modificar.	47
5.5.2	Calibración del modelo WEAP con el módulo de glaciares.	48
5.5.3	Calibración en conjunto con modelo WEAP y módulo de Glaciares	49
5.5.4	Resultado calibración y validación.	50
5.6	Verificación de la acumulación de nieve.	52
6	Analisis y Resultados	54
6.1	Comparación escenarios climáticos	54
6.2	Temperatura	55
6.3	Precipitación.....	60
6.4	Acumulación de nieve.....	66
6.5	Área glaciar	69
6.6	Caudal	71
7	Conclusiones	77
7.1	Conclusión	77
7.2	Recomendación y comentarios.	78
8	Bibliografía	79
	Anexo A: Información de la Cuenca de PangaL.....	81
	Anexo B: Modelacion WEAP.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: serie de tiempo de la concentración de CO ₂ y la temperatura medidos desde hielos extraídos en la Antártica, [Petit, J.R. et al, 1999].	12
Figura 2-2: Resumen de los procesos que afectan la fusión de la nieve en base a la energía, [Herrero, 2007].	14
Figura 2-3: Ubicación de la Cordillera Blanca, [Vergara et al. 2011]	17
Figura 2-4: Esquema del módulo de glaciares, [Vergara et al. 2011].	19
Figura 3-1: Mapa de la zona de estudio con zoom en la cuenca Pangal en Pangal, modificada de Google Earth. Las cuencas se presentan separadas por colores el global corresponde a la cuenca de estudio y las sub divisiones a las subcuencas modeladas.	24
Figura 3-2: Cuenca de Pangal en Pangal, modificada de Google earth.	25
Figura 3-3: Curva hipsométrica de las tres subcuencas de Pangal.	25
Figura 3-4: De izquierda a derecha se muestran los glaciares de las subcuencas del estero Puquios, río Blanco y río Paredones orientados de norte a sur (no a escala).	26
Figura 4-1: Estaciones de precipitación de la DGA.	28
Figura 4-2: Ubicación de las estaciones DET.	30
Figura 4-3: Gráfico de los gradientes utilizados para el mes de junio.	32
Figura 4-4: Contraste en la acumulación de nieve para los gradientes logarítmicos (azul) y parabólicos (rojo), las bandas mostradas corresponden a las tres más altas de la cuenca de Paredones, Pa13, Pa12 y Pa11, y una banda a media altura Pa5.	34
Figura 4-5: Cuadrantes de los modelos Mk3.6 y CanESM2, de amarillo y blanco respectivamente, para el proceso de escalamiento espacial, modificada de Google Earth.	36
Figura 4-6: Ejemplo del escalamiento temporal	37
Figura 4-7: Comparación de las precipitaciones y temperaturas de ambos modelos en su periodo histórico (1980-2005) con respecto a los valores observados utilizados en la calibración y validación (2004-2012).	38
Figura 4-8: Relación área glaciar/no glaciar por banda de la cuenca de Paredones.	39
Figura 4-9: Relación área glaciar/no glaciar por banda de la cuenca del río Blanco.	39
Figura 4-10: Relación área glaciar/no glaciar por banda de la cuenca del estero Puquios.	40
Figura 5-1: Relación Volumen y área glaciar para 144 glaciares (Bahr et al., 1997).	42
Figura 5-2: Serie de caudales completa 2004-2012.	50
Figura 5-3: Fracción nival de la cuenca de Paredones.	52
Figura 6-1: Variación del promedio de las máximas y mínimas anuales y el promedio anual de temperaturas para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	56
Figura 6-2: Variación promedio anual de temperaturas.	56

Figura 6-3: Temperatura para los periodos Histórico y escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente.....	58
Figura 6-4: Serie de tiempo de precipitaciones promedios anuales para la estación de Pangal en Pangal.	60
Figura 6-5: Serie anual del promedio de las precipitaciones mensuales, y el número de eventos por mes en el periodo Histórico (1980-2005) y el periodo de proyección para ambos escenarios (2045-2075). Se normalizo la precipitación con respecto al valor más alto alcanzado en la serie el cual corresponde al mes de Junio.	61
Figura 6-6: Promedio del porcentaje de precipitaciones para los meses desde abril hasta septiembre, para el periodo Histórico (1980-2005) y las dos proyecciones en el periodo (2045-2075).....	62
Figura 6-7: Promedio del porcentaje de precipitaciones para los meses desde octubre hasta marzo, para el período histórico (1980-2005) y las dos proyecciones en el periodo (2045-2075).....	63
Figura 6-8: Porcentaje de variación de precipitaciones de las proyecciones RCP2.6 y RCP8.5 entre los años 2045 y 2075 con respecto al escenario histórico 1980-2005...64	64
Figura 6-9: porcentaje de precipitaciones históricas y proyecciones RCP2.6 y RCP8.5 para los períodos comprendidos entre 2045 y 2075.....	65
Figura 6-10: Esquema de una tormenta representada en la cuenca de Paredones, se muestra el nombre de la banda y su correspondiente elevación en color rojo. En color azul se muestra la precipitación ponderada por el área de la banda. Además, se seleccionan tres bandas Pa3, Pa7 y Pa11, en celeste para ser analizadas.	66
Figura 6-11: Columna de nieve para las bandas Pa3, Pa7 y Pa11.	67
Figura 6-12: Cobertura nival para el período histórico y las proyecciones (eje izquierdo) y la variación de los escenarios climáticos en comparación con el período histórico (eje derecho).....	68
Figura 6-13: Tasa de abrasión glaciar, para las tres cuencas ordenadas por altura del centro de masa siendo la más alta la cuenca del rio Paredones y la más baja el estero Puquios.....	69
Figura 6-14: Evolución glaciar, el valor 100% corresponde al valor del glaciar en el año de inicio, 1980. El valor de las proyecciones es el valor que obtuvo 95 años después al término del período proyectado, 2075.	70
Figura 6-15: Variación de la serie de caudal total de la cuenca Pangal proyectada.	71
Figura 6-16: Variación de la serie de caudal medio glaciar de la cuenca Pangal proyectado.	72
Figura 6-17: Caudal promedio mensual total y glaciar de la cuenca para el periodo histórico y las proyecciones.	73
Figura 6-18: Caudal glaciar y total promedio diario de la cuenca de Pangal para el periodo histórico y las proyecciones.	74

Figura 6-19: Variación del caudal diario total de las proyecciones con respecto el periodo histórico.....	75
Figura 6-20: Variación del caudal diario glaciario de las proyecciones con respecto el periodo histórico.....	75
Figura 6-21: Probabilidad de excedencia caudal total	76
Figura 6-22: Variación anual del caudal total y glaciario.....	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1: Tipos de vías de Concentración representativa (IPCC, 2011).....	13
Tabla 2-2: Diferencias entre modelos glaciares, [Calispa, M. 2010].....	16
Tabla 3-1: Propiedades geomorfológicas de la cuenca.	26
Tabla 3-2: Área Glaciar y total de la cuenca Pangal.	27
Tabla 4-1: Datos disponibles de las estaciones de la DGA.....	29
Tabla 4-2: Datos disponibles de las estaciones DET.	30
Tabla 4-3: Tabla resumen de las estaciones seleccionadas.	31
Tabla 4-4: Meses con el respectivo coeficiente de correlación r^2	32
Tabla 4-5: Tabla resumen del catastro de glaciares de Pangal.....	38
Tabla 5-1: Parámetros de WEAP.	46
Tabla 5-2: Parámetros seleccionados para la primera calibración.	47
Tabla 5-3: Catastro de glaciares próximos a la zona de estudio, [Rivera et al, 2000]	48
Tabla 5-4: Valores máximos y mínimos para los parámetros del módulo de glaciares, [Schaepli, 2005].	49
Tabla 5-5: Parámetros calibrados en primera instancia en el paso tres.....	49
Tabla 5-6: Parámetros menos sensibles.	50
Tabla 5-7: Indicadores para los períodos de calibración y validación.	51
Tabla 5-8: Valores finales de los parámetros utilizados.	51
Tabla 5-9: r^2 de la fracción nival para las subcuencas de Pangal.....	53
Tabla 5-10: Porcentaje de días sin información.....	53
Tabla 6-1: Temperaturas y precipitaciones para los modelos de cambio climático generados por CISRO, el escenario B1 es equivalente al RCP2.6 los cuales representan el escenario menos desfavorable, por otro lado, el escenario A1 es equivalente al RCP8.5 en cuanto a que son los más desfavorable, comparándose en los dos periodos seleccionados a mediano y largo plazo 2045 y 2075, correspondientes a los años 2045 y 2075 respectivamente, en una ventana de tiempo de +5 y -5 años por cada periodo seleccionado.	54
Tabla 6-2: Resultados históricos (1980-2005) y futuros (2045-2075) del modelo MK3.6.	59

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Se estima que, debido al cambio climático, aumentará la temperatura planetaria en 2°C hacia mediados del XXI [Garreaud, 2011]. Los efectos de esta alza en la temperatura traen desórdenes hidrológicos importantes, intensificando las precipitaciones y aumentando la tasa de deshielo de los glaciares. A la fecha, se sabe que la oscilación térmica en la atmosfera terrestre es un proceso natural directamente proporcional a la concentración de dióxido de carbono (CO₂). El 2013, el IPCC declaró que es extremadamente probable (95 -100%) que la influencia humana sea la causa dominante del calentamiento observado desde la mitad del siglo XX¹. El hecho concreto es que los niveles de CO₂, entre otros gases efecto invernadero, han ido aumentando en la atmosfera lo que vaticina un porvenir muy desfavorable para la sociedad y el planeta como un todo.

En el año 1988 se crea el panel internacional sobre el cambio climático IPCC por sus siglas en inglés (Intergovernmental Panel on Climate Change), cuyo objetivo es analizar las emisiones de los gases efecto invernadero (GEI) y su relación directa con la temperatura. Según el penúltimo reporte que data del 2011, IPCC reportó que en ambos hemisferios los glaciares y capas de nieve en montañas estarían disminuyendo con el paso de los años. En el mismo reporte señala nuevos escenarios, en orden ascendente de menos a más nocivo están: RCP2.6-PD RCP4.5 RCP6 y RCP8.5. Éstos responden al problema observado con respecto a la razón de crecimiento de las emisiones globales de los GEI, que después del 2000 hasta el 2008 ha sido alrededor del 3%, mientras que las razones de crecimiento de estos escenarios de emisión son del 1.4% al 3.4%.

Por otro lado, el estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI realizado por la CONAMA el año 2007, estima que para zonas andinas el aumento en época estival sería de 5°C. Por otra parte, existen diversas actividades que se realizan en la zona central del país con una influencia directa en nuestra sociedad y que dependen del agua, como son la minería, la generación hidroeléctrica y la agricultura. Dichas actividades no funcionarían en ausencia de este recurso.

En el marco de esta problemática, es de suma importancia analizar el comportamiento del recurso frente a estos escenarios climáticos para cuantificar el grado del impacto que se generará, sobre todo en cuencas cordilleranas de la zona central, donde el recurso es de gran utilidad para los distintos sectores ya mencionados. Así, tomar conciencia sobre la envergadura del problema y de la misma forma prepararse ante los posibles cambios que ocurrirían en ríos, glaciares y su entorno.

¹ IPCC AR5 WG1 Resumen para responsables de políticas

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es analizar el potencial impacto del cambio climático frente a escenarios futuros posibles, utilizando el programa WEAP con el módulo de glaciares en la cuenca del río Pangal en Pangal en la VI Región.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar las series meteorológicas de la cuenca de Pangal en Pangal y su comportamiento frente a cambios climáticos para los escenarios RCP8.5 y RCP2.6 entre los años 2045 y 2075, analizando las series de caudales futuros.
2. Crear una metodología para agregar los glaciares (cubiertos y descubiertos) al módulo de glaciares, el cual esta acoplado al programa WEAP.
3. Modificar el gradiente de precipitaciones logarítmico para simular el transporte de nieve en forma de alud, desde las zonas más altas para así evitar la acumulación.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedentes Cambio Climático

El cambio climático es un proceso natural dentro del ciclo climatológico del planeta. Sucede a escalas de miles de años, cursando períodos de calentamiento y de enfriamiento como se puede ver en la Figura 2-2. En ella, la serie en color azul representa la variación de temperatura y el rojo la concentración de CO₂ en un periodo de 400 mil años. En el gráfico se observa que existe una relación directa entre estas dos variables, sin embargo, se ha demostrado que la acción antrópica post revolución industrial ha producido un aumento considerable en la cantidad de gases efecto invernaderos (GEI) a una escala de decenios de años que no tiene precedentes en la historia. Este hecho se refleja en la serie de temperaturas que a lo largo del tiempo no ha superado más de 3°C la temperatura actual, pero si ha estado 8°C por debajo, por lo tanto, la condición actual está por encima del promedio histórico.

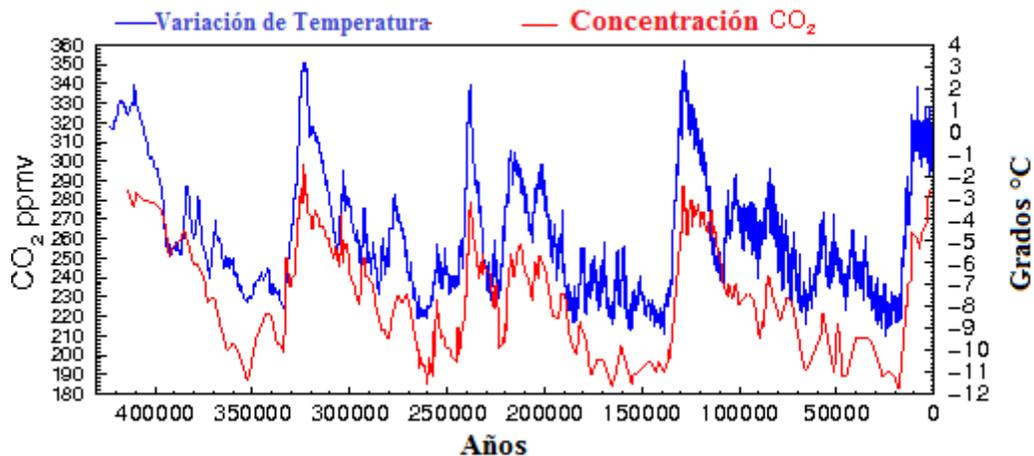


Figura 2-1: serie de tiempo de la concentración de CO₂ y la temperatura medidos desde hielos extraídos en la Antártica, [Petit, J.R. et al, 1999].

La estrecha relación que existe entre la temperatura media del planeta y la concentración de dióxido de carbono (CO₂) se debe a que el CO₂ junto a otros GEI producen un filtro que permite que entre luz a la atmosfera pero impide que ciertas ondas sean liberadas, causando un aumento en la temperatura.

En base a esta acumulación radiativa, el IPCC en su quinto reporte, en el año 2011, crea los actuales escenarios de cambio climático, las llamadas Trayectorias

Representativas de Concentración (RCP²). Estos escenarios se enfocan en el efecto práctico que es la concentración atmosférica de CO₂ con su equivalente en radiación forzante de donde se obtienen los nombres de estos nuevos escenarios (ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1: Tipos de vías de Concentración representativa (IPCC, 2011)

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración	Forma de itinerario
RCP 8.5	>8,5 W/m ² en 2100	>1370 CO ₂ –eq en 2100	En aumento
RCP 6	Estabilización en ~6 W/m ² a partir de 2100	~850 CO ₂ – eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin traslimitaciones
RCP 4.5	Estabilización en ~4,5 W/m ² a partir de 2100	~650 CO ₂ – eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin traslimitaciones
RCP 2.6	Máximo a 3 W/m ² antes de 2100; disminución posterior.	Máximo a ~490 CO ₂ –eq antes de 2100; disminución posterior.	Culminación seguida de disminución.

El aumento en la temperatura conlleva a un cambio hidrológico importante. Ejemplo de ello es la intensificación de las precipitaciones, las cuales van ligadas al aumento de inundaciones, afectando de forma inmediata a la población (Ahumada, 2012). Otro ejemplo es el deshielo de glaciares, que son las reservas más grandes de agua dulce del planeta, produciendo un aumento en el nivel del mar, aumentando la intrusión salina afectando la disponibilidad de agua potable en las zonas costeras. Son muchos los ejemplos de problemas que se derivan del calentamiento global, que repercuten en el ambiente y los seres vivos.

2.2 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica se define como el uso de modelos matemáticos para la simulación de los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca. Estos modelos pueden estar basados en las ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de las variables dentro de una cuenca o pueden ser de naturaleza conceptual, donde se representan los procesos que ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados.

²Por su nombre en inglés, Representative Concentration Pathways

2.3 Modelación Glaciológica

Son variados los procesos que influyen la fusión del hielo y la nieve. Algunos son el intercambio de energía, el albedo, la temperatura, la pendiente, la orientación entre otros. Para explicar y modelar este proceso de fusión glaciaria de la nieve y hielo, se han desarrollado diferentes modelos que varían en la complejidad y las variables incorporadas. Actualmente se reconocen y se utilizan con frecuencia dos formas de modelar este fenómeno: el modelo de balance de energía y el modelo grado-día.

2.3.1 Balance de energía

El modelo de balance de energía, como su nombre lo indica, se basa en los flujos de energía conocidos y cuantificables entre la atmósfera, la nieve y el suelo subyacente. Además de los flujos externos a la columna de nieve, existen flujos de calor que se transmiten de forma interna, que completan la definición de fusión en base a la energía.

En la Figura 2-2, se pueden ver los procesos que afectan a una columna de nieve. Las letras de color negro representan fenómenos de difusión térmica entre moléculas, sin transporte de las mismas, como son: radiación de onda corta K; radiación de onda larga L; intercambio de calor sensible nieve-atmósfera H; e intercambio de calor sensible suelo-nieve G. Por otro lado, los términos con letras de color rojo corresponden al calor advectivo U emitido por: precipitación R; agua de fusión M; evaporación E; y por último, W representa el flujo energético producto del viento.

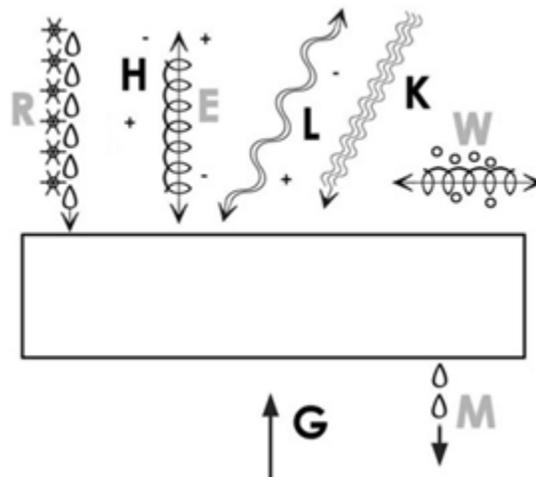


Figura 2-2: Resumen de los procesos que afectan la fusión de la nieve en base a la energía, [Herrero, 2007].

La ecuación de balance de energía sobre el volumen de control, sujeto a los distintos flujos se representa en la ecuación 2-1.

$$\frac{dU_n}{dt} = K + L + H + G + U_R - U_E + U_W - U_F \quad (2-1)$$

Siendo U_n la energía interna total de la columna de nieve. U_R , corresponde al calor asociado a la precipitación.

La importancia relativa de cada uno de los términos es altamente variable en el espacio y en el tiempo en función de las condiciones locales del clima [Herrero, 2007].

2.3.2 Grado-día

Este modelo se basa en la alta correlación que existe entre la temperatura del aire y la ablación anual de un glaciar en las latitudes altas, por lo que la temperatura es tomada como un índice para calcular la fusión del hielo. Su nombre se debe al sistema de unidades en que se entregan los resultados [$mm/^\circ C * \text{día}$].

La correlación que existe entre la temperatura y la ablación disminuye mientras más se acercan las cuencas estudiadas al trópico, debido a que la fusión en estas zonas no depende principalmente de la temperatura, sino de la radiación solar y el estado de la superficie glaciar. Es decir, si el glaciar se encuentra cubierto de nieve fresca la mayor parte de la energía será reflejada, mientras que, por efecto de degradación de la nieve, la capacidad para absorber la energía solar aumenta y, por lo tanto, aumenta también la fusión [Fernández, A. 2010].

El modelo basa su teoría en la estrecha relación que existe entre la cantidad de nieve derretida en milímetros de agua (M) y la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de fusión del hielo -siempre y cuando la temperatura del aire sea mayor a la temperatura de fusión- multiplicado por un factor DDF, como se ve en la ecuación (2-2).

$$\sum_{i=1}^n M = DDF * \sum_{i=1}^n T^+, \Delta t \quad (2-2)$$

El factor DDF puede ser calculado directamente usando un lisímetro de nieve, estacas de ablación o del derretimiento obtenido del cálculo de balance de energía. Cabe destacar que no posee un valor constante y puede variar bastante según sea nieve o hielo. Las diferencias entre estos modelos se muestran en la

Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Diferencias entre modelos glaciares, [Calispa, M. 2010].

Características	Tipo de modelo	
	Balance de Energía	Grado-Día
Complejidad	Alta	Simple
Representación de procesos físicos	Si	No
Eficiencia	Alta	Media-Alta
Número de parámetros	6 – 9	2 – 3
Variables de entrada al modelo	Más de 6 Radiación incidente Radiación difusa Precipitación líquida y solida Humedad Radiación de onda Larga(incidente y reflejada) Radiación de onda corta (incidente y reflejada)	3 Precipitación Temperatura
Nivel de discretización	Complejo (generalmente mallas)	Global o semidistribuido
Ventajas	Eficiencia, representación de los procesos físicos	Pocos parámetros, pocas variables de entrada.
Desventajas	Requieren de mucha información que a generalmente no está disponible. Alta demanda computacional.	No explica procesos físicos.

2.3.3 Trabajos que incluyen el modelo grado-día para la modelación de cuencas

La implementación del módulo de glaciares de WEAP, se llevó a cabo en Perú donde existen una gran cantidad de trabajos realizados investigadores locales y por agentes internacionales. El nombre específico del lugar es la Cordillera Blanca, en la cuenca del río Santa (ver Figura 2-3).

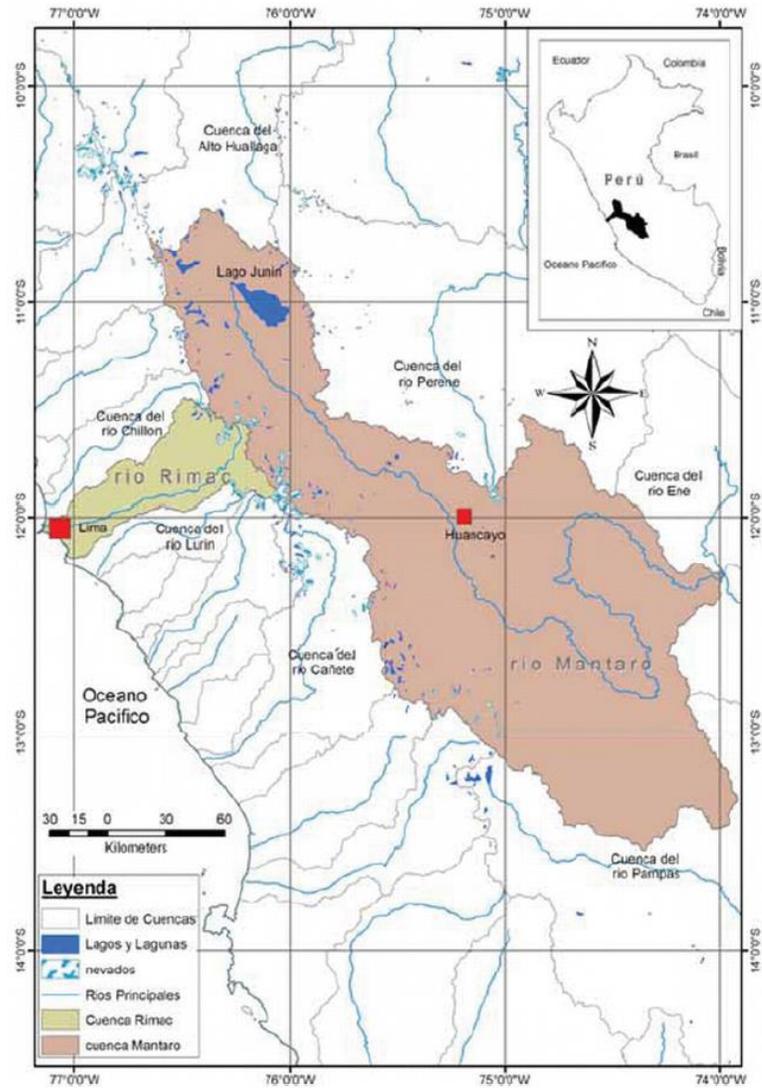


Figura 2-3: Ubicación de la Cordillera Blanca, [Vergara et al. 2011]

Esta cadena montañosa ha sido estudiada en diversos ámbitos glaciológicos: Paleo-Climatología (Universidad de Ohio y IRD); Dinámica Glaciar (IRD, INRENA-Peru y la Universidad de Innsbruck); Percepción Remota (Remote Sensing) (IRD, INRENA- Perú y la Universidad de Geneva); y Modelamiento del derretimiento glaciar (IRD y la Universidad de Innsbruck) (Vergara et al., 2011).

Uno de los estudios más relevantes lo realizó Bernard Pouyaud et al. (2005), quien propuso simular el derretimiento glaciar de 4 cuencas del río Santa, bajo escenarios de temperatura futuros. Este trabajo empleó un modelo empírico basado en ecuaciones simples de escorrentía y temperatura. El trabajo de Bernard se basó en un modelo matemático simple, sin tomar en cuenta procesos físicos, conceptos de

derretimiento de nieve, ni tampoco la ablación y zonas de acumulación. Para calcular el constante derretimiento de las cuencas el autor tomó las observaciones del glaciar Yanamarey, que poseía mediciones desde el año 1940. Esta aproximación dio a conocer el coeficiente de retroceso del glaciar, el cual fue utilizado para las cuatro cuencas estudiadas en la Cordillera Blanca.

Más tarde, en el año 2006 Irmgard Juen, para su tesis doctoral en la Universidad de Innsbruck, utilizando el modelo ITGG-2.0-R, que considera la ablación dependiendo de la temperatura y además otras variables atmosféricas, modela la variación estacional e interanual del derretimiento de glaciares para un período de 44 años en un glaciar Boliviano llamado Zongo. Este modelo, al incorporar nuevas variables y poseer un coeficiente de correlación de 0.76, fue utilizado para seis cuencas glaciares del río Santa, Perú.

Posterior a Juen, Wilson Suárez en el año 2008, como parte de su tesis doctoral para la Universidad de Montpellier II, utilizó el modelo basado en grado-día a escala mensual. Una de las ventajas de éste fue la consideración de áreas glaciares y áreas sin glaciar, pero siguió utilizando la temperatura como única variable responsable de la fusión del hielo.

En el apartado 2.4, se presenta el modelo de derretimiento glaciar basado en los estudios antes mencionados e integrando WEAP. El modelo fue propuesto por el SEI-US (*Sotckholm Enviroment Institute*) e IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) al banco mundial en su estudio titulado “*Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology*” (Evaluación del Impacto del Cambio Climático sobre la Hidrología de Montaña) realizado en los Andes peruanos.

2.4 Modelación en WEAP

El software de modelación hidrológica WEAP – Water Evaluation And Planning – es una iniciativa desarrollada por el Sotckholm Enviroment Institute, cuyo objetivo es ser una herramienta de ayuda para la modelación, planificación y evaluación de la gestión de recursos hídricos. Provee un marco de trabajo o interfaz amigable al usuario, flexible y de modelación para la gestión de recursos hídricos. En este trabajo se explota principalmente la faceta que permite la modelación hidrológica y no aquella que simula la transferencia de agua.

El Software WEAP ha sido utilizado en un varios trabajos, informes, investigaciones, tesis, etc. Se han obtenido resultados faavorables para cuencas nacionales desde Diego Mena en el año 2009 hasta Tomas Gómez el 2013.

2.4.1 Módulo de glaciares para el modelo WEAP.

El módulo de glaciares utiliza la aproximación estándar de WEAP, el modelo de precipitación y la escorrentía. Este modelo realiza simulaciones a partir de subdivisiones de la cuenca, cuyo aporte se ve reflejado en un punto aguas abajo de cada subcuenca. La diferencia que existe entre la versión estándar, es que el módulo incorporado incluye, además de los procesos hidrológicos estándar, la contribución de glaciares.

De acuerdo a lo ilustrado en la Figura 2-4, el color verde representa la subcuenca y el color azul el glaciar. Cada catchment representa un punto de elevación que contiene la información meteorológica de esa área. El módulo de glaciares usa una notación para áreas con glaciares ($j=1$) y para áreas sin glaciares ($j=2$), por lo tanto las zonas sin glaciares son tratadas con el software WEAP de forma normal y las zonas con glaciares es donde las fórmulas son implementadas (ver Capítulo de Modelación) actualizando las proporciones de áreas año a año.

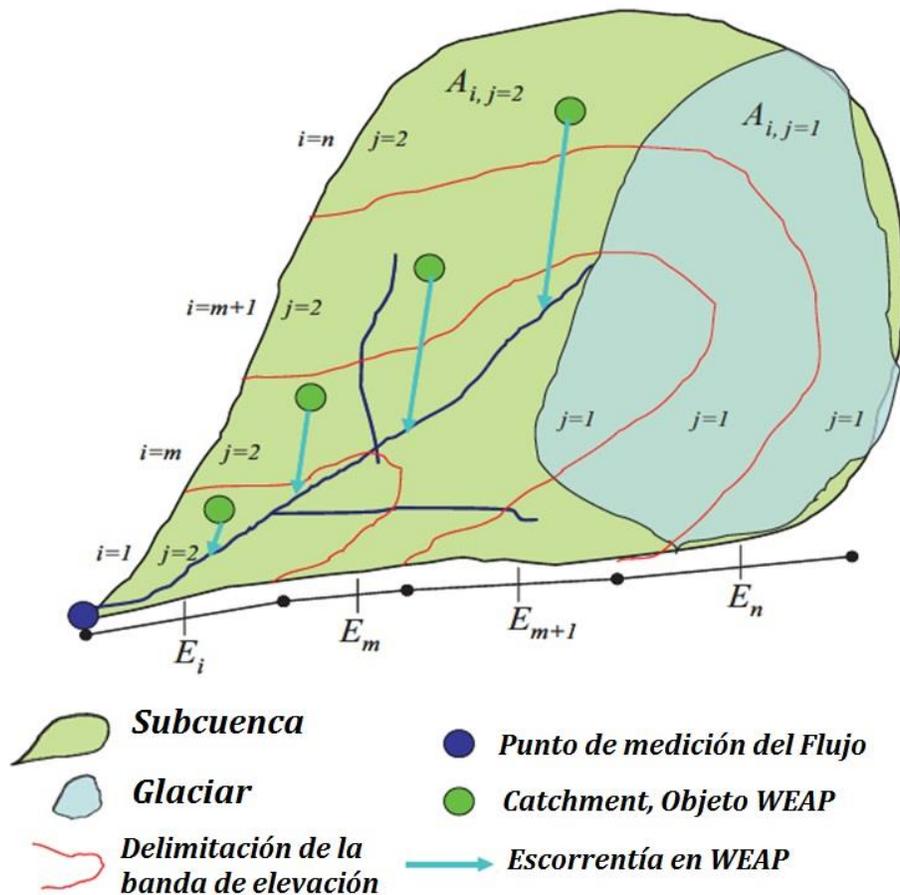


Figura 2-4: Esquema del módulo de glaciares, [Vergara et al. 2011].

2.5 Índices de Modelación Hidrológica

Los resultados del modelo de caudales via WEAP se comparan con los caudales observados y se evalúan bajo los siguientes coeficientes estadísticos:

2.5.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Esta medida propuesta por Nash y Sutcliffe [Nash y Sutcliffe, 1970] busca establecer la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable. Un coeficiente de NS = 0 implica que el modelo pronostica los caudales de igual forma a como lo haría la media de los datos observados, un NS negativo implica que la media es mejor predictor y un NS mayor a 0 implica que el modelo es mejor predictor que la media.

El coeficiente se calcula como sigue muestra en la ecuación (2-3).

$$NS = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(Qm_i - Qs_i)^2}{(Qm_i - \overline{Qm})^2} \quad (2-3)$$

Donde:

n = número de datos

Qs = caudal simulado

Qm = caudal observado

2.5.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico

El problema del Coeficiente de Nash-Sutcliffe, ver formula 2-4, es que al ser cuadrático tiende a sobrevalorar las deficiencias o aciertos del modelo para caudales altos y subvalorar las eficiencias y deficiencias del modelo para caudales bajos. Krause y otros autores señalan que para contrarrestar este problema es bueno primero aplicar una transformación logarítmica a los valores observados y simulados, por lo que se evaluará la modelación usando este criterio adicional.

$$NS = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Log}(Qm_i) - \text{Log}(Qs_i))^2}{(\text{Log}(Qm_i) - \overline{\text{Log}(Qm)})^2} \quad (2-4)$$

2.5.3 Error cuadrático medio

El ECM, ver formula 2-5, se define como el promedio del cuadrado de la diferencia entre la medida estimada y la original. Un ECM de 0 implica una modelación perfecta, y para valores mayores a cero el ECM se utiliza para comparar modelaciones distintas de la misma variable. El ECM se define de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ECM = \frac{\sum_i^n (Qm_i - Qs_i)^2}{n} \quad (2-5)$$

2.5.4 BIAS

El “BIAS” o sesgo estadístico es el promedio de la diferencia entre los valores medidos y los valores estimados. Sirve para evaluar la existencia de errores sistemáticos de sub o sobreestimación de la variable modelada. Su fórmula es similar a la del ECM pero a diferencia de ésta no incluye el término cuadrático, por lo que se ve menos influenciado por diferencias entre los caudales máximos simulados y observados, ya que el ECM amplifica estos errores.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Qm_i - Qs_i}{n} \quad (2-6)$$

2.6 Modelación Climática

Los modelos climáticos usan métodos de investigación cuantitativa para simular las interacciones de la atmósfera terrestre, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático para las proyecciones del clima futuro.

La gran mayoría de los modelos climáticos tienen en cuenta la energía entrante como las radiaciones electromagnéticas de onda corta a la tierra, así como la energía saliente de onda larga proveniente de la radiación electromagnética de la tierra.

Cada modelo presenta distintos planteamientos sobre los cuales trabaja, como por ejemplo distintas definiciones de resolución en la cual se calculará, o las mismas ecuaciones sobre las cuales se desarrollan. Son más de veinte los modelos globales de cambio climático, que si bien siguen distintos caminos, llegan a resultados razonablemente similares bajo los mismos escenarios de emisión [Gómez, 2013].

Se compararan los resultados climáticos de dos modelos, para luego seleccionar el que se implementará para el presente trabajo. Uno de los modelos analizados será el

utilizado por [Gómez, 2013] quien obtuvo resultados satisfactorios. Además sus resultados se compararon con las proyecciones de cambio climáticos propuestos por el IPCC en su reporte posterior al AR5, el mismo que se utilizó para el desarrollo del presente trabajo, lo cual da validez y confianza para ahondar y desarrollar esta configuración.

2.6.1 Modelo CSIRO MK3.6

El modelo acoplado oceánico-atmosférico MK3.6 es desarrollado en conjunto por dos instituciones australianas: el Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) y el instituto Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE), en el marco del proyecto de intercomparación de modelos acoplados, fase 5 – CMIP5.

Este modelo presenta una resolución horizontal de aproximadamente $1,9^\circ \times 1,9^\circ$ y cada punto atmosférico está relacionado con dos puntos oceánicos, con el fin de mejorar las interacciones interanuales entre ambas componentes. Representa una actualización de la versión anterior del modelo CSIRO-MK3.5 desarrollado por los mismos institutos. Sin embargo, presenta una mejora considerable con respecto a su antecesor al incorporar dentro de sus planteamientos la una dinámica interactiva de los aerosoles a nivel atmosférico para modelar de mejor manera la forzantes radiativas atmosféricas [Collier, 2011].

2.6.2 Modelo CanESM2

El modelo acoplado clima-ciclo del carbón CanESM2, fue desarrollado el año 2010 por el centro Canadiense de modelación y análisis climático (CCCma³) en el marco del quinto reporte del IPCC (AR5). La resolución del modelo es de $2,813^\circ \times 2,79^\circ$ y la principal característica, en comparación con sus antecesores, es el mejoramiento sustancial de la resolución vertical y horizontal del modelo oceánico para dar una circulación oceánica más realista. Sin embargo sigue por debajo del otro modelo en cuanto a resolución.

2.7 Métodos de Procesamiento de Información

Los modelos de proyección climática son herramientas que entregan la información en una grilla a nivel global. Por ejemplo, de los dos modelos utilizados, el que presenta

³ The Canadian center for climate modeling and analysis

menor resolución es CSIRO-MK3.6 que posee una resolución horizontal: Atmosférica de $1,87^{\circ} \times 1,87^{\circ}$ y oceánica de $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$, equivalentes a 210 [km] x 210 [km] y 140 [km] x 140 [km] respectivamente, valores que son varios ordenes de magnitud mayor que el área estudiada, por lo tanto es necesario realizar un escalamiento espacial para representar la información del modelo en el punto específico. Existen varios métodos de escalamiento espacial estadísticos, incluyendo:

- a. Punto más cercano
- b. Inverso de la distancia
- c. Inverso al cuadrado de la distancia

Luego de analizar los tres métodos de escalamiento espacial, se decide por el que posea mejor relación con respecto al punto requerido, es necesario realizar el escalamiento temporal, para lo cual los GCM simulan un período histórico, el cual es correlacionado estadísticamente con el histórico de la zona asociándole igual probabilidad de excedencia. Para así ligar ambos a un patrón en común.

3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación y antecedentes de la región en estudio

La VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, cuya capital es Rancagua, se localiza en la macro zona central del país, aproximadamente entre 33°53' y 35°01' de latitud sur y desde los 70°02' de latitud oeste llegando hasta el Océano Pacífico. Abarca una superficie de 16.365 km², siendo ésta un 2,2% del territorio nacional. Limita por el norte con la Región Metropolitana y por el noroeste con la Región de Valparaíso, al sur con la Séptima Región del Maule, al oeste, como ya se mencionó, con el Océano Pacífico y al este con la Republica de Argentina (ver Figura 3-1).

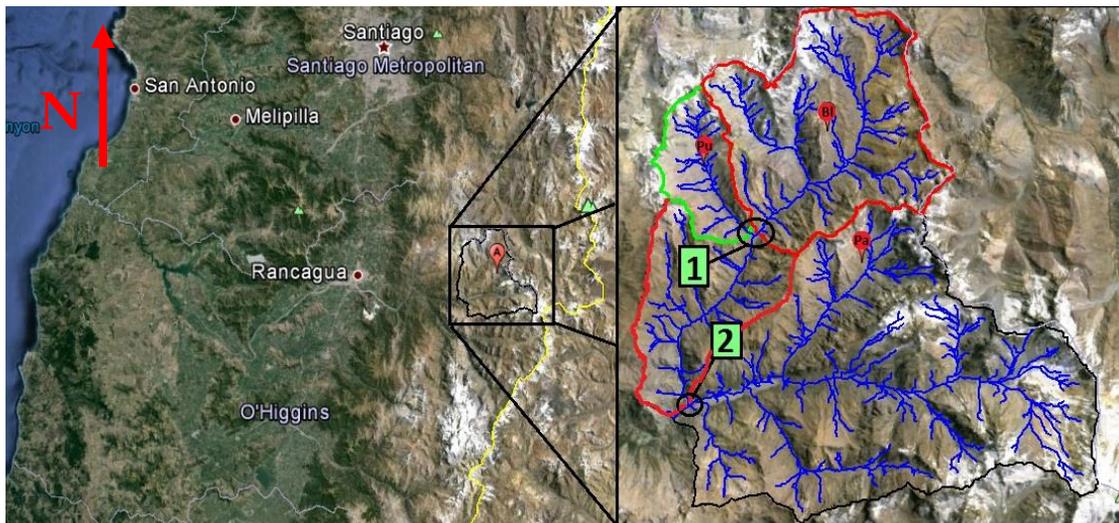


Figura 3-1: Mapa de la zona de estudio con zoom en la cuenca Pangal en Pangal, modificada de Google Earth. Las cuencas se presentan separadas por colores el global corresponde a la cuenca de estudio y las sub divisiones a las subcuencas modeladas.

3.2 Cuenca en estudio

El área de interés para el presente trabajo se ubica en la parte noreste de la cuenca de Rapel. De norte a sur se encuentra en primer lugar la cuenca del río Blanco, cuyo cauce va en sentido noreste-suroeste. Luego, en el punto 1 de la Figura 3-1 dicho río empalma con el tributario estero Puquios, cuya orientación es de norte a sur. Por último, la cuenca que está al sur de ambas es la cuenca del río Paredones, río que avanza de oriente a poniente y que en el punto 2 de la Figura 3-1 confluye con la extensión del río Blanco dando origen al río Pangal. Mayor información de la cuenca se presenta en el Anexo A.

Como se puede ver en la Figura 3-2, la cuenca de estudio es una zona de alta montaña, donde el punto más bajo está a los 1.456 m s.n.m. y el más alto a los 5.000 m s.n.m. (ver Figura 3-3). Este hecho la convierte en una cuenca de régimen hidrológico predominantemente nival, cuyo clima se caracteriza por ser templado, frío, lluvioso y sin estaciones secas.

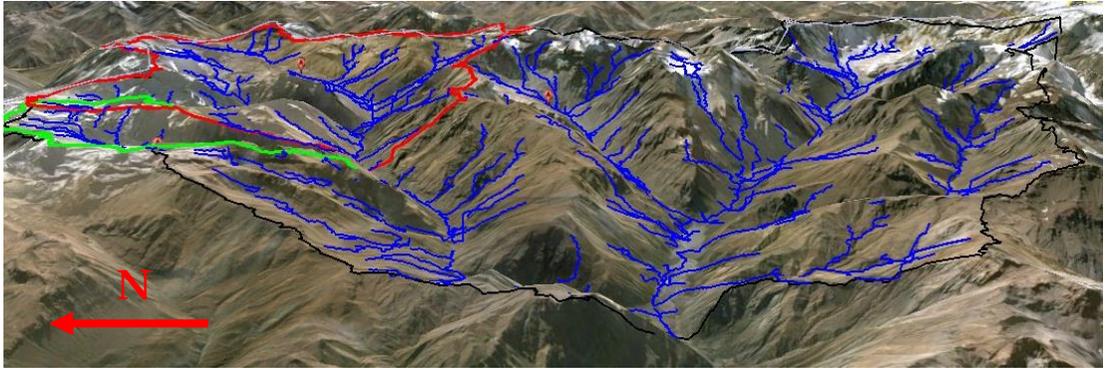


Figura 3-2: Cuenca de Pangal en Pangal, modificada de Google earth.

De la Figura 3-3, se desprende que la cuenca de Paredones posee el punto más bajo y el más alto. Además se observa que la cuenca del estero Puquios posee el centro de gravedad promedio pero con mayor pendiente, en la Tabla 3-1 se detalla lo mencionado anteriormente.

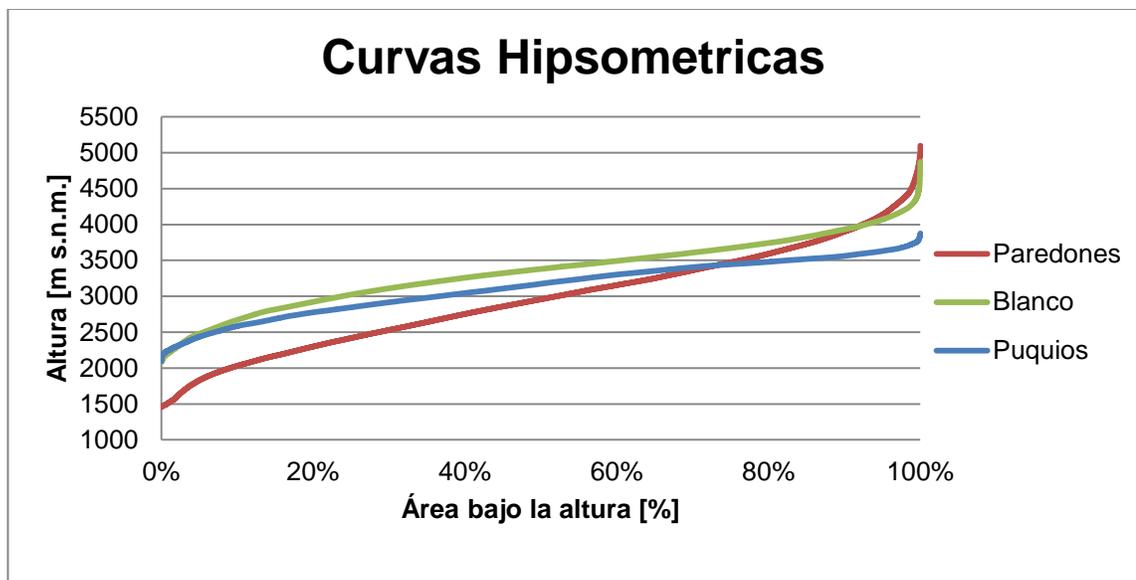


Figura 3-3: Curva hipsométrica de las tres subcuencas de Pangal.

La Tabla 3-1 **Error! Not a valid bookmark self-reference.**denota las dimensiones de las cuencas en estudio. Éstas ordenadas según su tamaño de forma creciente son Puquios, Blanco y Paredones, subcuencas que ocupan el 6%, 26% y 68% de la cuenca de Pangal respectivamente que contiene un área total de 517,8 km².

Tabla 3-1: Propiedades geomorfológicas de la cuenca.

Parámetro	Unidad	Paredones	Blanco	Puquios
Altura mínima	[m]	1456	2083	2094
Altura promedio	[m]	2958	3452	3175
Altura máxima	[m]	5098	4871	3876
Longitud del Cauce	[km]	24.6	14.8	8.6
Área	[km ²]	350.9	134.9	31.9

3.3 Glaciares

En la Figura 3-4 se muestra en celeste los glaciares que existen en las tres subcuencas divididas para la modelación las cuales conforman la cuenca de Pangal (Catastro de Glaciares DGA).

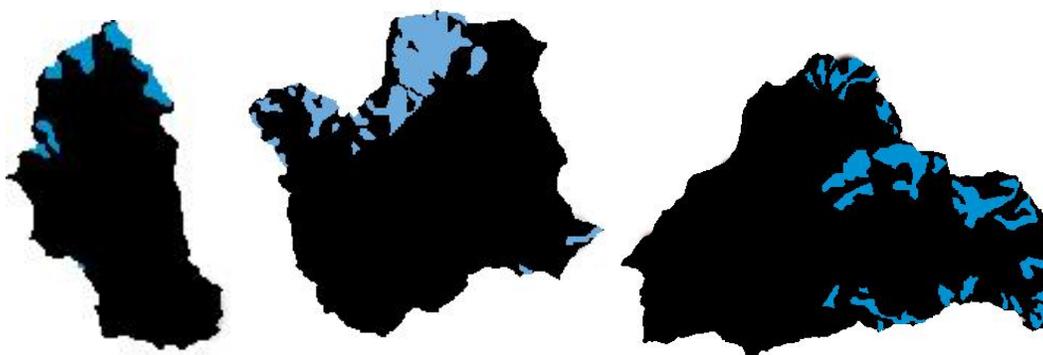


Figura 3-4: De izquierda a derecha se muestran los glaciares de las subcuencas del estero Puquios, río Blanco y río Paredones orientados de norte a sur (no a escala).

Por medio del catastro de glaciares de la DGA, se pudo realizar una desagregación por subcuencas de los 147 glaciares que actualmente existen en la cuenca de Pangal. Éstos cubren cerca del 7% de la cuenca como se puede observar en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Área Glaciar y total de la cuenca Pangal.

Cuenca	Área glaciar [Km ²]	Área total [Km ²]	Área glaciar/total [%]
Puquios	1,0	31,93	3,2%
Blanco	10,7	134,92	8,0%
Paredones	22,2	350,91	6,3%
Total	36,36	517,76	6,6%

El centro de gravedad de la cuenca de Paredones se ubica a menor altura en comparación a las otras dos cuencas estudiadas y además posee mayor área glaciar, seguido en tamaño por la cuenca del río Blanco y estero Puquios. Los glaciares en su mayoría tienen orientación norte-sur, y los que poseen una orientación sur-norte son de menor tamaño.

4 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 Precipitación

4.1.1 Estaciones DGA

Los datos de precipitaciones con los que se alimenta el modelo son extraídos desde la base de datos de las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) ubicadas en las cercanías de la zona de estudio como se puede ver en la Figura 4-1. En ella las líneas de color rojo ilustran los límites de la cuenca.

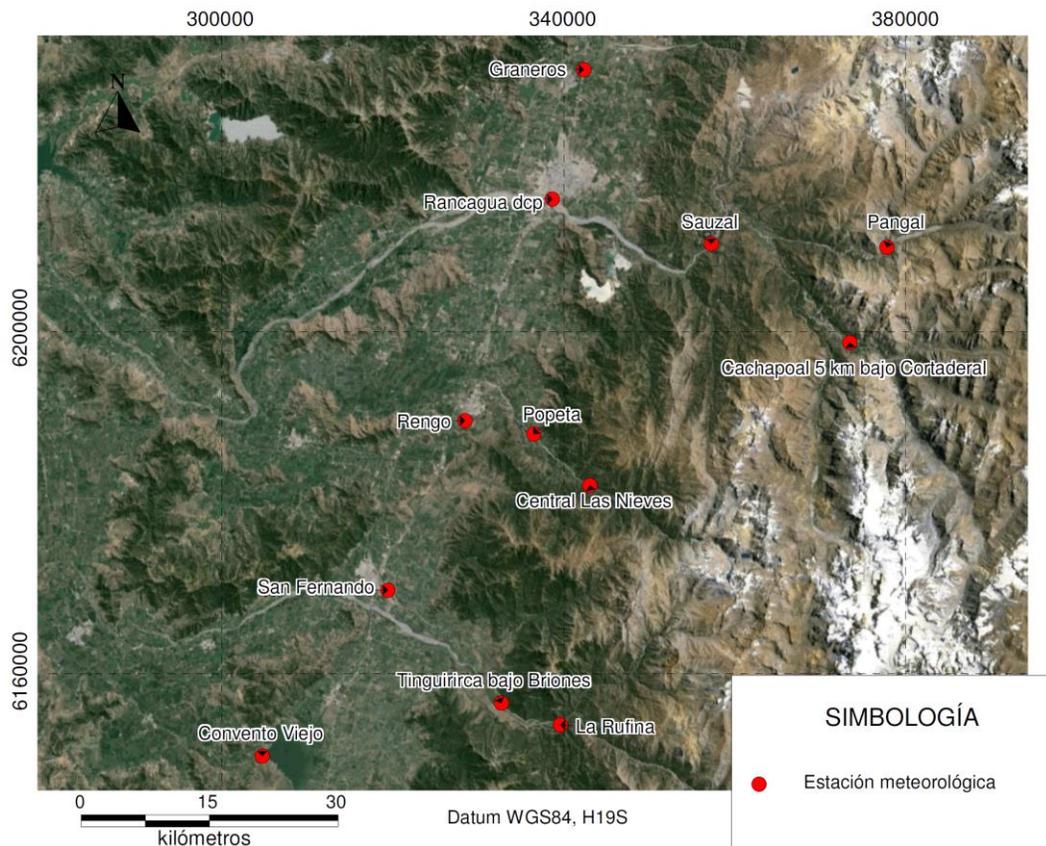


Figura 4-1: Estaciones de precipitación de la DGA.

En la Tabla 4-1 se observan los datos disponibles. Los distintos colores indican la cantidad de datos diarios por año: en verde más de 360; en amarillo entre 360 y 200; menos de 100 datos en color café; y en blanco las estaciones que no registran datos.

Tabla 4-1: Datos disponibles de las estaciones de la DGA.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Convento Viejo													
Rengo													
San Fernando													
Popeta													
Graneros													
Rancagua DCP*													
Tinguirirca bajo Briones													
Sauzal													
Central Las Nieves													
La Rufina													
Cachapoal 5 km bajo Cortaderal*													
Pangal en Pangal*													

*Estaciones seleccionadas

En base a estos dos criterios (ubicación y cantidad de datos), se elige la estación Rancagua DCP, luego de analizar la correlación existente entre la estación Rancagua y las demás, se decide utilizar finalmente las siguientes tres estaciones, sin importar la carencia de información la cual se rellenó con los datos de la estación Rancagua :

- a. Rancagua DCP
- b. Cachapoal 5 km bajo Cortaderal
- c. Pangal en Pangal

4.1.2 Estaciones División El Teniente

Además de las 3 estaciones de la DGA, las que son representativas de la cuenca, se cuenta con las mediciones de las estaciones de la División El Teniente (DET) las cuales se han ido instalando desde el año 2004 en la zona de estudio.

Como primer criterio de selección de estas estaciones se analizan aquellas ubicadas bajo los 1.600 m s.n.m. (ver línea roja en Figura 4-2), para evitar que las precipitaciones sólidas afecten la toma de datos por falta de instrumentos aptos para su medición.

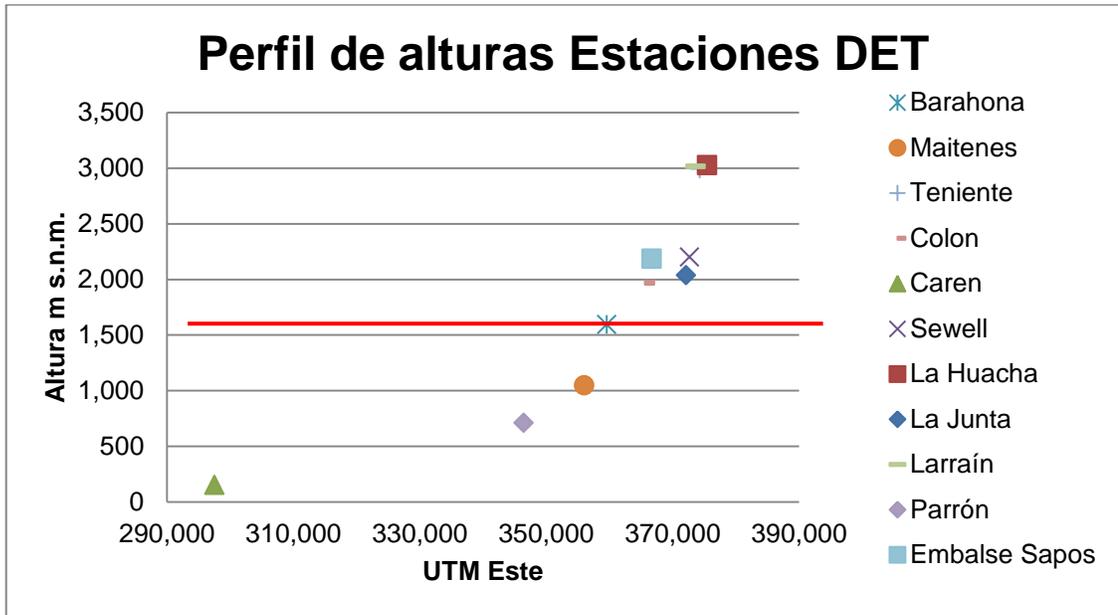


Figura 4-2: Ubicación de las estaciones DET.

En la Tabla 4-2 se muestra la cantidad de mediciones con colores representativos y la fecha correspondiente de cada estación para así seleccionar las adecuadas.

Tabla 4-2: Datos disponibles de las estaciones DET.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Barahona*	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow
Colon		Red	Yellow	Yellow	Red	Red	Yellow	Green	Green
Maitenes*	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green
Teniente		Yellow	Green						
Sewell			Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Carén						Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
La Huacha						Green	Green	Green	Green
La Junta						Yellow	Green	Green	Green
Larraín						Yellow	Red	Yellow	Green
Parrón*						Red	Yellow	Green	Green
Sapos						Yellow	Green	Yellow	Yellow

*Estaciones seleccionadas

En resumen se utilizan las estaciones DET:

1. Parrón
2. Maitenes
3. Barahona

A continuación se presenta la Tabla 4-3 que resume la cantidad de mediciones de precipitación en los años seleccionados para calibración y validación de las estaciones seleccionadas.

Tabla 4-3: Tabla resumen de las estaciones seleccionadas.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Rancagua									
Cachapoal 5 km bajo Cortaderal									
Pangal									
Barahona									
Maitenes									
Parrón									

Para los casos que ameriten, se rellenan los datos de precipitación con correlación mensual y diaria. Se observó que para los meses de invierno el coeficiente de correlación cuadrático entre la estación Barahona y las demás es muy bajo. Esto se debe a los eventos de precipitación solida de la época no generan una precipitación medible.

4.1.3 Gradiente de precipitación

El problema que se presenta al formar los gradientes de precipitación en cuencas de alta montaña, donde la información es escasa por falta de instrumentos capaces de medir correctamente los datos, es la sobreestimación de la cantidad precipitada, que por consiguiente, genera irregularidades en el modelo WEAP. Se analizan dos gradientes con el fin de anular el efecto; un gradiente logarítmico y un gradiente parabólico en función del logarítmico, esto quiere decir que se toma como base el gradiente logarítmico para calcular el total de agua caída y se cambia a parabólico respetando el total caído.

4.1.3.1 Gradiente Logarítmico

El gradiente logarítmico se ha utilizado ampliamente en estudios anteriores. La forma de estos gradientes proporciona una disminución en las precipitaciones, achatando la curva a medida que desplaza por el perfil longitudinal de la cuenca.

En la Figura 4-3, se ejemplifica el mes de junio con gradientes logarítmicos para todos los años modelados. Se observa que el año 2005 es el año que más precipitó seguido por el año 2012 que son catalogados como húmedos. El resto de los años modelados se denominan secos, asociados al efecto del Niño y la Niña, respectivamente.

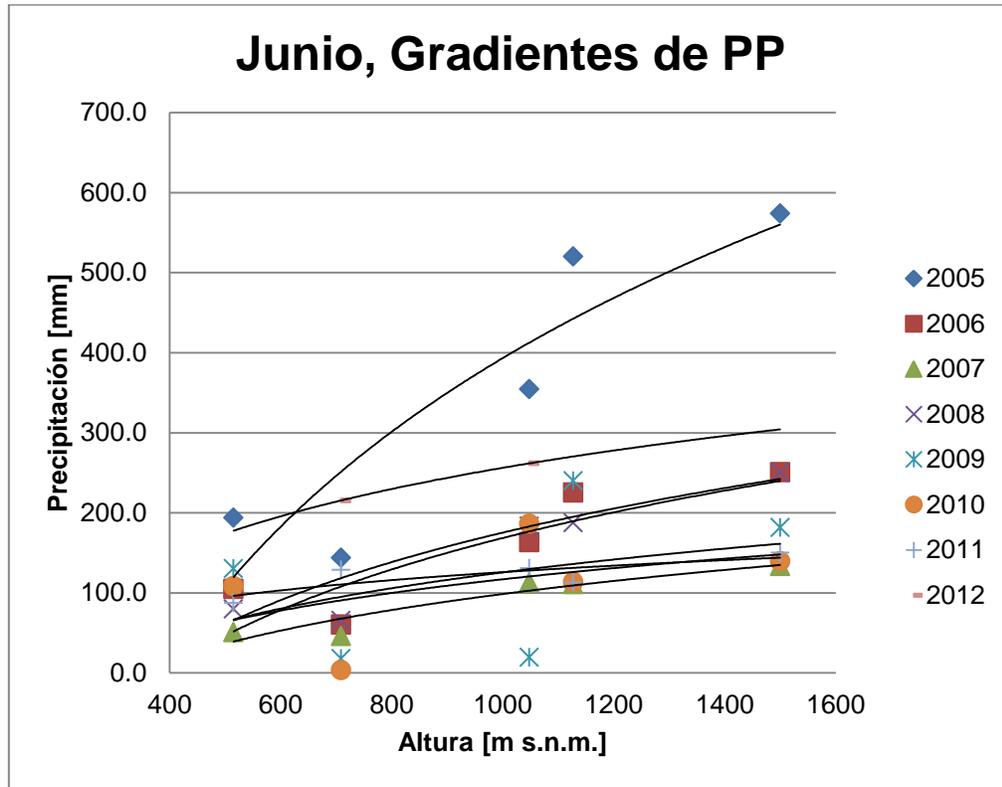


Figura 4-3: Gráfico de los gradientes utilizados para el mes de junio. Se presenta a continuación la Tabla 4-4, en la que se señala la estación meteorológica que posee el mejor coeficiente de correlación cuadrático por mes.

Tabla 4-4: Meses con el respectivo coeficiente de correlación r^2

Mes	Estación	Propiedad	r^2
Enero	Cachapoal	DGA	0.923
Febrero	Cachapoal	DGA	0.923
Marzo	Maitenes	DET	0.910
Abril	Pangal	DGA	0.663
Mayo	Pangal	DGA	0.726
Junio	Cachapoal	DGA	0.724
Julio	Maitenes	DET	0.645
Agosto	Cachapoal	DGA	0.720
Septiembre	Maitenes	DET	0.579
Octubre	Parrón	DET	0.687
Noviembre	Pangal	DGA	0.932
Diciembre	Cachapoal	DGA	0.923

Se opta por Cachapoal como estación base, en consecuencia a su alta correlación con las estaciones colindantes durante todo los meses.

Si se asume que existe una sobreestimación de las precipitaciones producto de la extrapolación de datos de precipitación, es posible ajustar el rendimiento de la cuenca, relación entre la precipitación y el caudal. Por lo tanto el rendimiento se ajustó con un factor reductor de precipitaciones mes a mes.

Existe un efecto producto del gradiente logarítmico y su extrapolación que afecta las zonas altas, las cuales ostentan menores temperaturas y mayores precipitaciones que, en consecuencia, son precipitaciones predominantemente sólidas, que por falta de energía en el sistema acumula nieve año tras año. Una forma de modelar el problema de transporte nival, que WEAP no incorpora en su modelación, es generar gradientes parabólicos, el cual genera que las precipitaciones lleguen a un punto máximo dentro de la cuenca, y luego de este punto comience un descenso leve disminuyendo las precipitaciones en las zonas altas de la cuenca.

4.1.3.2 Gradiente parabólico

El problema que se genera incluso con uso de gradientes logarítmicos es la acumulación de nieve en las zonas altas, acumulándose año tras año desvirtuando el modelo, lo que genera columnas de nieve de gran dimensión que en realidad no existen en las secciones más altas de la cuenca. Por lo tanto se propone utilizar el gradiente parabólico para modelar el transporte gravitacional de nieve desde las zonas altas en forma de alud.

Como base se utilizó la cantidad total diaria precipitada y generada por el gradiente logarítmico, la cual se redistribuyó de forma proporcional al área de cada sección, cuya altura corresponde a la altura media de dicha área. De esta forma se consigue que la última sección, la que posee menor área y mayor conflicto con la acumulación de nieve, merme su acumulación y por lo tanto tenga un comportamiento cercano al real.

En la Figura 4-4 se muestra la acumulación de nieve en la cuenca de Paredones tanto para el gradiente logarítmico como para el parabólico. En ella se observa que la acumulación de nieve para la banda Pa13 con el gradiente logarítmico es creciente y sistemática. Por otro lado, el gradiente parabólico si bien acumula nieve en períodos estivales, está dentro del rango aceptable y no presenta una tendencia creciente. El área de esta banda de elevación representa a un 2% del área total, por lo tanto los efectos anormales de la acumulación no afectan en gran medida la modelación. Se observa que la acumulación de nieve del gradiente logarítmico tiende a igualarse con el gradiente parabólico, por lo que no se generan problemas en las bandas inferiores, por tanto se soluciona el problema.

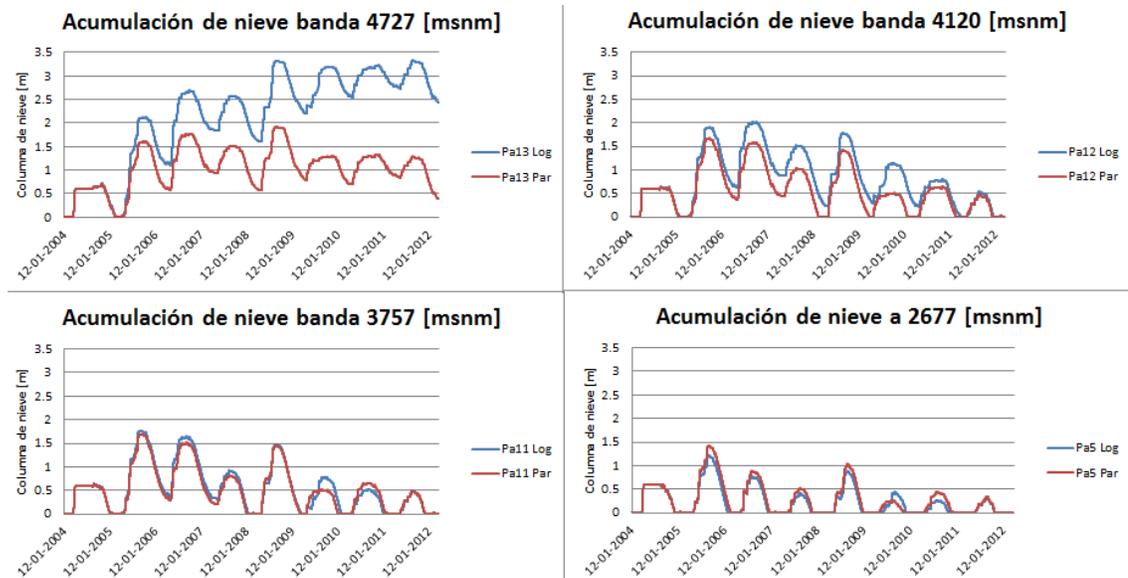


Figura 4-4: Contraste en la acumulación de nieve para los gradientes logarítmicos (azul) y parabólicos (rojo), las bandas mostradas corresponden a las tres más altas de la cuenca de Paredones, Pa13, Pa12 y Pa11, y una banda a media altura Pa5.

4.2 Estaciones para la temperatura y la humedad.

Con respecto a la información de temperatura y humedad, se seleccionaron los datos de la mayoría de las estaciones de DET por su cercanía a la zona de estudio representando de mejor manera el gradiente lineal de ambas variables meteorológicas. Por estar relativamente lejos del rango de la cuenca en estudio se descartan las estaciones El Yeso Embalse, Rengo, Popeta y Convento Viejo de la DGA, además de la estación Parrón de DET.

4.2.1 Temperatura

El gradiente que se utiliza para la temperatura es lineal. Se tomó como estación base a Maitenes debido a su extensión de datos y la correlación con respecto al resto de las estaciones.

4.2.2 Humedad

Luego de un análisis del gradiente lineal de humedad se opta por corregir los días en los cuales la humedad según el gradiente es negativa, adoptando el valor de la última área seccionada de la cuenca con humedad mayor a 0 y repitiendo este valor para las bandas más elevadas si es que existiesen. Se elige la estación Maitenes de DET como estación base por cantidad de datos y ser próxima a la cuenca.

4.3 Nubosidad

Se calcula el promedio mensual por año de la nubosidad de las estaciones Pirque y Embalse el Yeso, corrigiendo los días de lluvia como días completamente nublados con las estaciones meteorológicas DET como patrón, para darle validez y representatividad a los datos sobre la cuenca.

4.4 Viento

Se utiliza la información diaria de la estación el Teniente para darle validez a toda la cuenca. Si bien es un dato muy grueso para representar la totalidad de la cuenca, se utiliza como aproximación.

4.5 Análisis del proceso de escalamiento

Es necesario, como se explicó anteriormente, realizar un escalamiento espacial y temporal de las precipitaciones y temperaturas de ambos modelos (MK3.6 y CanESM2).

El cual se divide en dos procesos:

4.5.1 Escalamiento espacial

Se optó por el escalamiento espacial inverso al cuadrado de la distancia, método que por fórmula da importancia a la distancia que existe entre; el punto de la estación seleccionada y los puntos del modelo que lo rodea, lo cual ayuda a que los puntos más lejanos del modelo, los cuales son menos representativos de la estación, sean menos influyentes y recíprocamente para los que se encuentren más cerca. Decisión que se tomó al analizar el tamaño de la grilla de los dos modelos seleccionados, ver la Figura 4-5. Se descartan los otros métodos de escalamiento espacial por no ser representativos de la zona de estudio luego que se analizara y comparara.

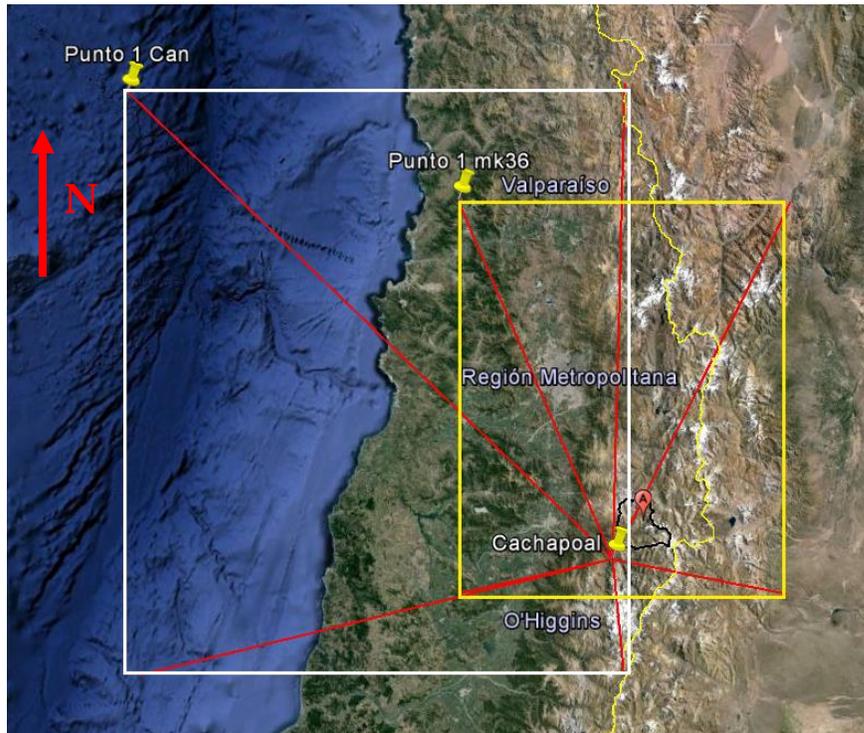


Figura 4-5: Cuadrantes de los modelos Mk3.6 y CanESM2, de amarillo y blanco respectivamente, para el proceso de escalamiento espacial, modificada de Google Earth.

4.5.2 Escalamiento temporal

El escalamiento temporal se utiliza para distribuir las precipitaciones del modelo con respecto las reales en un periodo de tiempo definido, se realiza aplicando una conversión de la precipitación del modelo con respecto a la observada en el mismo periodo de tiempo y que tengan la misma probabilidad de excedencia, ver Figura 4-6.

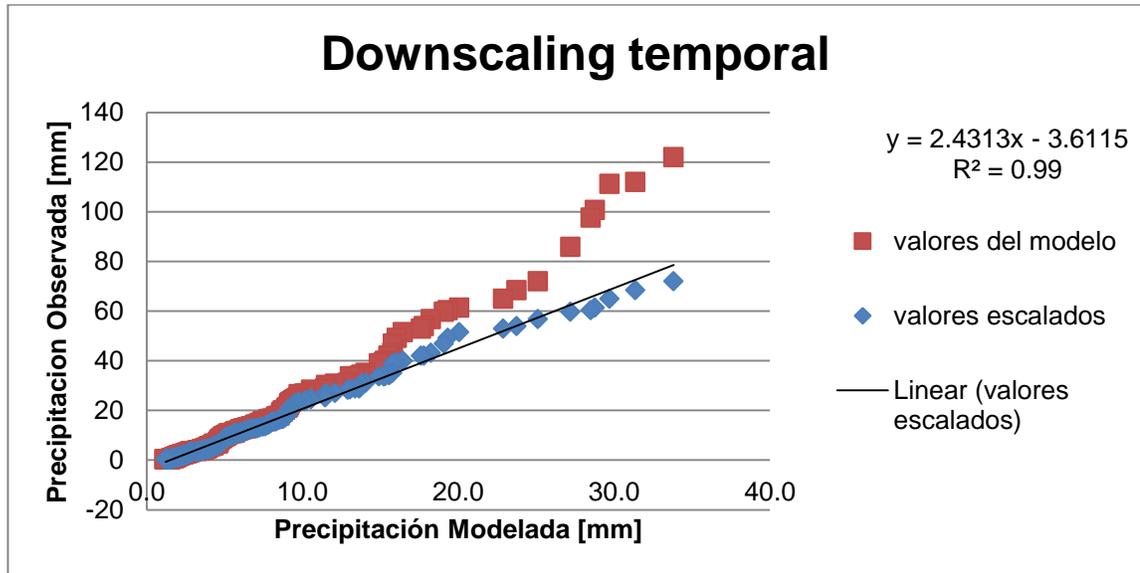


Figura 4-6: Ejemplo del escalamiento temporal

La Figura 4-6 muestra un mes escalado temporalmente con un factor de correlación cuadrático de 0.99. Esto se repitió para todos los meses.

4.6 Comparación de los modelos de cambio climático Mk3.6 y CanESM2

En resumen ambos modelos contemplan los nuevos escenarios del quinto reporte (AR5) del IPCC, simulando las proyecciones de cambio climático las cuales incluyen las proyecciones RCP2.6 y el RCP8.5. Debido a los alcances del presente trabajo de título se debe seleccionar uno de los dos modelos de cambio climático.

La Figura 4-7, muestra que ambos modelos presentan un déficit al representar las temperaturas mínimas. El modelo Mk3.6 por su lado, presenta la temperatura mínima en el mes de julio al igual que las observadas y las máximas presentan temperaturas sobre las observadas con poca variabilidad entre modelos. Las precipitaciones presentan comportamientos parecidos exceptuando por el modelo CanESM2 que en los meses de agosto y septiembre presentan aproximadamente el mismo valor lo cual se contradice con las precipitaciones observadas. Esto sumado a los resultados del escalamiento temporal y espacial da las razones suficientes para elegir el modelo Mk3.6 y sus 10 realizaciones para el análisis hidrológico de la cuenca.

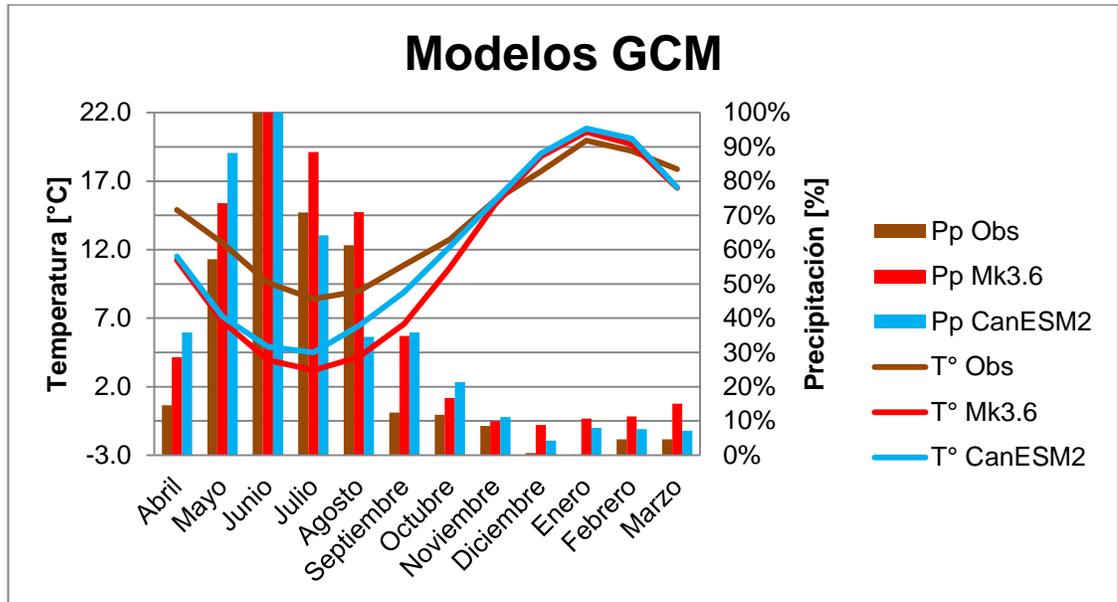


Figura 4-7: Comparación de las precipitaciones y temperaturas de ambos modelos en su periodo histórico (1980-2005) con respecto a los valores observados utilizados en la calibración y validación (2004-2012).

4.7 Glaciares

Se dimensionó el área total abarcada por los glaciares en cada una de las subcuencas de Pangal. Utilizando el catastro de glaciares de la DGA se contabilizaron 147 glaciares, abarcando un área del 7% de la cuenca como se muestra en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Tabla resumen del catastro de glaciares de Pangal.

Cuenca	N° de glaciares	Área glaciar [km ²]	Área Total [km ²]	Relación área glaciar/total [%]
Paredones	88	22,2	350,91	6,3%
Blanco	50	10,7	134,92	8,0%
Puquios	9	1,0	31,93	3,2%
Total	147	33,9	517,76	6,6%

En la Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10, se observa que existe una relación entre la altura de la cuenca y la distribución presencial del glaciar. La cuenca con cota más alta, Paredones, cuenta con glaciares en bandas de elevación cercanas a los 2.850 m s.n.m., siendo la banda de elevación con presencia glaciar más baja de todas las subcuencas de Pangal.

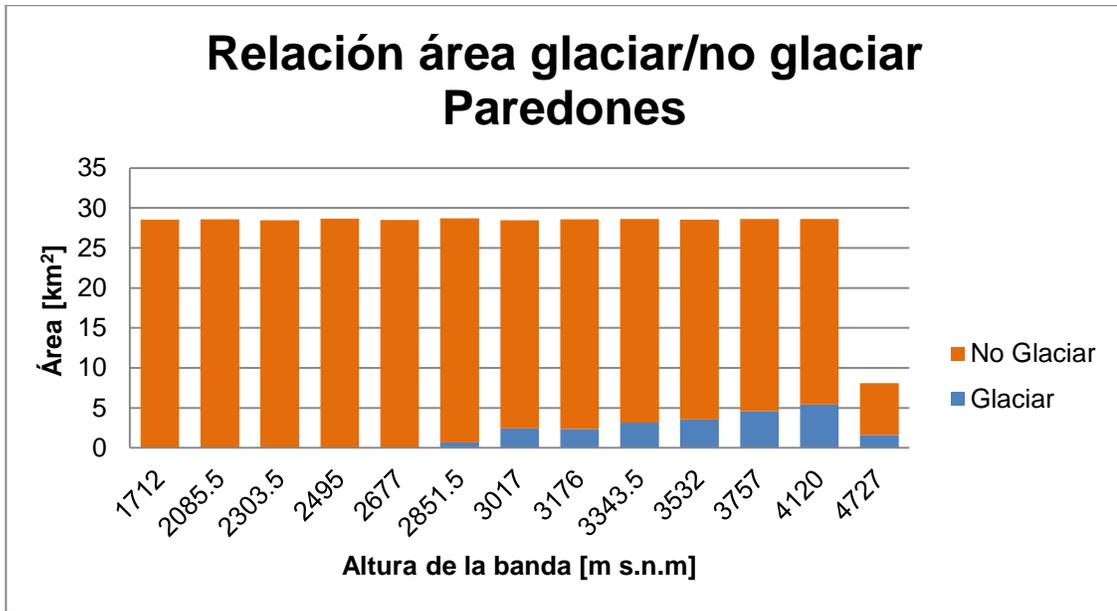


Figura 4-8: Relación área glaciar/no glaciar por banda de la cuenca de Paredones.

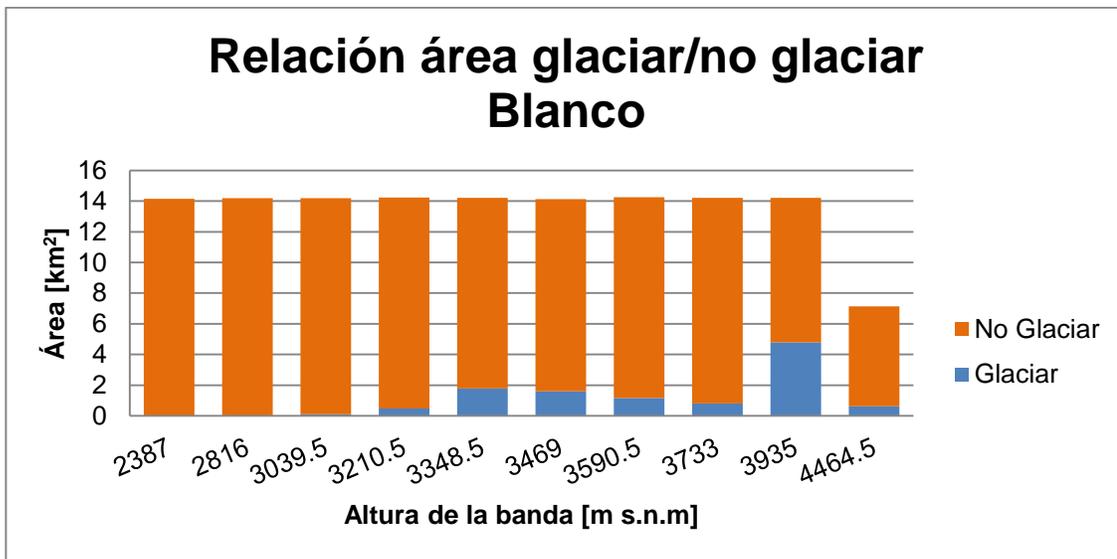


Figura 4-9: Relación área glaciar/no glaciar por banda de la cuenca del río Blanco.

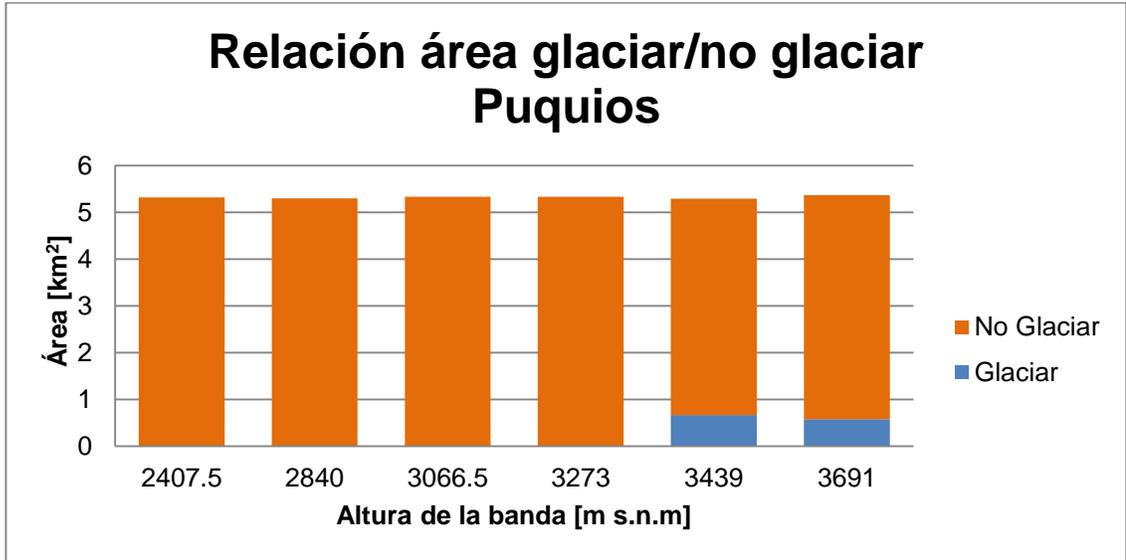


Figura 4-10: Relación área glaciar/no glaciar por banda de la cuenca del estero Puquios.

5 MODELACIÓN

5.1 Modelo WEAP

Se ha abarcado en numerosos trabajos la modelación con el software WEAP todos ellos explican el modelo de escorrentía y humedad que utiliza el WEAP, por lo tanto en el Anexo B se detalla el modelo WEAP normal y el módulo de radiación.

5.2 Modelación Glaciológica

El primer paso antes de iniciar las simulaciones es definir las condiciones iniciales dentro de cada objeto usando para simular los procesos hidrológicos. La descripción de este acercamiento, se refiere únicamente al rol de los glaciares localizados como objetos computacionales definidos dentro de WEAP, mientras para las partes no glaciares de las subcuencas se utilizará la rutina de WEAP normal.

La localización inicial del área actual dentro de cada catchment A_i definida en km^2 se define según la Ecuación 5-1:

$$A_i = \sum_{j=1}^2 A_{y=0,t=0,i,j} \quad (5-1)$$

Mientras la extensión inicial de los glaciares dentro de la subcuenca se define según la Ecuación 5-2:

$$A_{glacier,y=0,t=0} = \sum_{i=m}^n A_{y=0,t=0,i,j=1} \quad (5-2)$$

Donde n indica el número de bandas de nivel dentro de una subcuenca y m es la banda más baja con contenido glaciar, resaltando el hecho que A_i permanece constante pero la proporción entre A_1 y A_2 variará al final de cada año hidrológico, esto debido a que las áreas glaciares en proporción a las no glaciares evolucionan y se actualizan al final de cada año.

En relación a los volúmenes glaciares, el modelo se basa en relaciones empíricas que relacionan el volumen glaciar V , expresado en km^3 con el área glaciar. Las relaciones se tratan con mayor detalle en el trabajo de Bahr et al., 1997. En esta investigación se relacionó el volumen de 144 glaciares de Europa, Norteamérica, Asia Central y el Ártico con su superficie, como se ilustra en la Figura 5-1.

En la Figura 5-1, la línea de ajuste tiene un coeficiente de regresión de 1,36 con un coeficiente de correlación $r^2=0,99$. Según estas relaciones, el volumen glaciar inicial se estima de la siguiente forma:

$$V_{glaciar,y=0,t=0} = c * A^{b}_{glaciar,y=0,t=0} \quad (5-3)$$

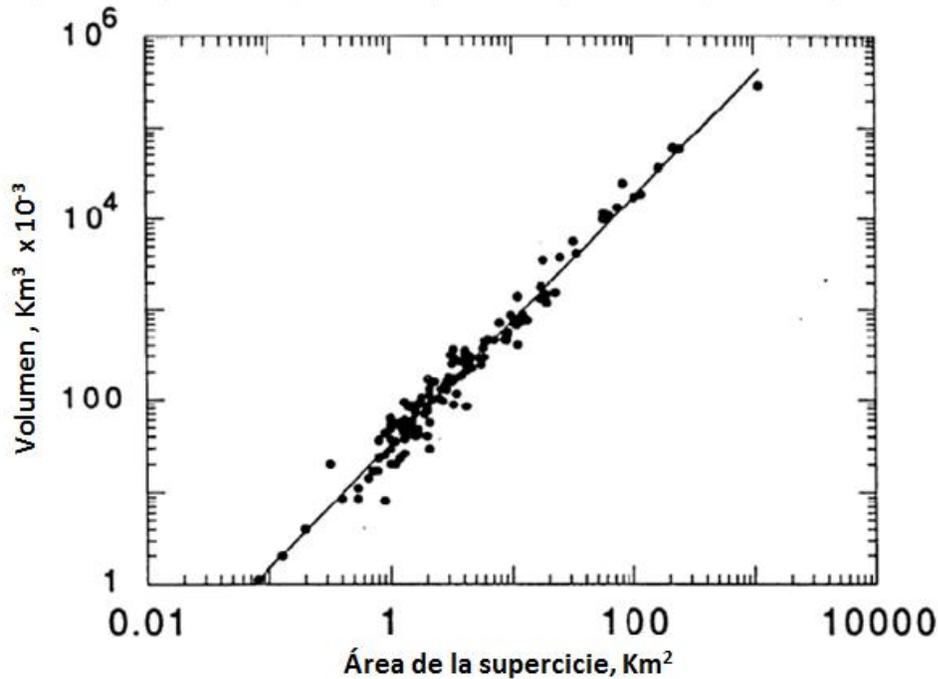


Figura 5-1: Relación Volumen y área glaciar para 144 glaciares (Bahr et al., 1997).

En la investigación de Bahr et al., 1997 se sugiere valores para ambos factores $b=1,36$ y $c=0.048$. A pesar de que esta investigación no consideró glaciares de la región, se utilizarán estos valores para el presente estudio.

Este volumen corresponde a la masa inicial de hielo dentro de una subcuenca de WEAP. Existe una suposición implícita en la expresión anterior, que la profundidad de agua equivalente sobre toda la superficie glaciar es uniforme, por lo tanto el volumen de hielo dentro de cada banda de altura ingresada a WEAP será modelado según el área ingresada a esa banda.

5.3 Estimación del escurrimiento a nivel de subcuenca

Según la conceptualización planteada, dentro del marco del proyecto de investigación desarrollado por el Banco Mundial en Perú [Vergara, 2011], el volumen de escurrimiento dentro de la subcuenca será el resultado de la suma de la contribución de la fusión del hielo, la nieve y el escurrimiento proveniente de la zona no glaciaria de la subcuenca simulando con el modulo hidrológico de WEAP, en la versión desarrollada por el banco mundial el análisis se realizaba a paso mensual y para el siguiente trabajo se modificó para su uso diario según la Ecuación 5-4.

$$Q_{sub-watershed,y,t} = \sum_{i=m}^n (VQ_{snow,y,t,i,j=1} + VQ_{ice,y,t,i,j=1}) + \sum_{i=1}^n Q_{WEAP,y,t,i,j=2} \quad (5-4)$$

La contribución de la fusión de la nieve y el hielo en el i-ésimo catchment al caudal superficial de una subcuenca y la acumulación de nieve en la superficie del glaciar se determina cuantificándolas para el área superficial del glaciar dentro de cada banda de elevación como se muestra en las ecuaciones 5-5 a 5-8, las unidades de volumen están en m³.y las de área en km².

$$VQ_{snow,y,t,i,j=1} = (Q_{snow,y,t,i,j=1}) * A_{y,t=0,i,j=1} * 1000 \quad (5-5)$$

$$VQ_{ice,y,t,i,j=1} = (Q_{ice,y,t,i,j=1}) * A_{y,t=0,i,j=1} * 1000 \quad (5-6)$$

$$VP_{liq,y,t,i,j=1} = (P_{liq,y,t,i,j=1}) * A_{y,t=0,i,j=1} * 1000 \quad (5-7)$$

$$VS_{Final,y,t,i,j=1} = (S_{Final,y,t,i,j=1}) * A_{y,t=0,i,j=1} * 1000 \quad (5-8)$$

Dónde:

$Q_{snow,y,t,i,j=1}$: Descarga del i-esimo catchment desde el reservorio de la nieve (mm/día)

$Q_{ice,y,t,i,j=1}$: Descarga del i-esimo catchment desde el reservorio del hielo (mm/día)

$P_{liq,y,t,i,j=1}$: Precipitación líquida en la superficie glaciaria del i-esimo catchment (mm/día)

En función de la temperatura, la precipitación que reciben los catchments puede ser líquida o sólida en forma de nieve. Esta separación se realiza con la siguiente función:

$$P_{liq,y,t,i,j} = \begin{cases} P_{y,t,i,j} & T_{y,t,i} \geq T_0 \\ 0 & T_{y,t,i} < T_0 \end{cases}$$

Dónde:

$T_{y,t,i}$: Temperatura media diaria en el i-esimo catchment (°C)
 T_0 : Límite de conversión de la precipitación liquida en nieve (°C)

Para cálculo de la fusión de la nieve y del hielo en la porción glaciaria de la subcuenca se utiliza una simplificación del método propuesto por Schaepli (2005), que inicialmente se desarrolló para estimar las contribuciones diarias al caudal provenientes de la fusión de la nieve y del hielo. Estas modificaciones fueron realizadas por Suarez et al. (2008). La contribución debida a la fusión de la nieve y el hielo al caudal en una banda de altitud particular es:

$$Q_{snow,y,t,i,j=1} = \left\{ Q_{snow,y,t-1,i,j=1} * e^{-\frac{t-(t-1)}{K_{snow}}} + [P_{liq,y,t,i,j=1} + M_{snow,y,t,i,j=1}] * \left(1 - e^{-\frac{t-(t-1)}{K_{snow}}} \right) \right\} \quad (5-9)$$

Dónde:

$Q_{snow,y,t-1,i,j=1}$: Descarga del reservorio de la nieve del i-esimo catchment del día anterior (mm/día)

K_{snow} : Constante de decaimiento de la nieve (día)

El término K_{snow} es un parámetro que retarda el fluir del agua de un tiempo a otro.

$M_{snow,y,t,i,j=1}$ =nieve derretida desde la superficie glaciaria en el i-esimo catchment (mm/día)

$$M_{snow,y,t,i,j=1} = \min \left\{ \begin{array}{l} S_{initial,y,t,i,j=1} \\ M_{pot\ snow,y,t,i,j=1} \end{array} \right\} \quad (5-10)$$

$S_{initial,y,t,i,j=1}$: Equivalente de agua de nieve en la superficie del glaciario en el i-esimo catchment (mm/día)

$$S_{initial,y,t,i,j=1} = S_{final,y,t-1,i,j=1} + P_{snow,y,t,i,j=1} \quad (5-11)$$

$P_{snow,y,t,i,j}$: Nieve acumulada en la superficie glaciaria en el i-esimo catchment (mm/día)

$$P_{snow,y,t,i,j=1} = \begin{cases} 0 & T_{y,t,i} \geq T_0 \\ P_{y,t,i,j} & T_{y,t,i} < T_0 \end{cases} \quad (5-12)$$

$M_{pot\ snow,y,t,i,j=1}$: Nieve potencialmente derretida en el i-esimo catchment (mm/día)

$$M_{pot\ snow,y,t,i,j=1} = \begin{cases} a_{snow} * (T_{y,t,i} - T_0) & T_{y,t,i} \geq T_0 \\ 0 & T_{y,t,i} < T_0 \end{cases} \quad (5-13)$$

a_{snow} : Factor grado día para el derretimiento de nieve (mm/día /°C)

Al final de cada paso diario, el equivalente de agua nieve acumulado en la superficie del glaciar es actualizado y cuantificado como escorrentía de derretimiento nival, como se observa en la siguiente ecuación.

$$SF_{final,y,t,i,j=1} = SF_{final,y,t-1,i,j=1} + P_{snow,y,t,i,j=1} - Q_{snow,y,t,i,j=1} \quad (5-14)$$

Es posible que la nieve que potencialmente es derretida al final de un paso diario, t, exceda el equivalente de agua nieve en la superficie del glaciar. En este caso, todo el equivalente de agua nieve que se encuentra en la banda será derretida y la superficie del glaciar será expuesta. Para calcular la porción diaria de superficie que es expuesta se utiliza la siguiente expresión:

$$SFree_{y,t,i,j=1} = \begin{cases} 0, & P_{snow,y,t,i,j=1} \geq 0 \\ \left(1 - \frac{SF_{final,y,t,i,j=1} - Q_{snow,y,t,i,j=1}}{SF_{final,y,t,i,j=1}}\right), & 0 < \left(1 - \frac{SF_{final,y,t,i,j=1} - Q_{snow,y,t,i,j=1}}{SF_{final,y,t,i,j=1}}\right) < 1 \\ \left(1 - \frac{SF_{final,y,t,i,j=1} - Q_{snow,y,t,i,j=1}}{SF_{final,y,t,i,j=1}}\right) > 1 \\ 1, & SF_{final,y,t,i,j=1} < 0 \\ 1, & \end{cases}$$

La fracción dentro del paréntesis indica la porción de superficie que fue cubierta con nieve.

Las ecuaciones 5-15 y 5-16 corresponden al cálculo realizado mientras el $SF_{final,y,t,i,j=1}$ es distinto de cero para estimar el aporte a la escorrentía del derretimiento del hielo glaciar en el i-esimo catchment.

$$Q_{ice,y,t,i,j=1} = \left\{ Q_{ice,y,t-1,i,j=1} * e^{-\frac{t-(t-1)}{K_{ice}}} + [P_{liq,y,t,i,j=1} + M_{ice,y,t,i,j=1}] * \left(1 - e^{-\frac{t-(t-1)}{K_{ice}}}\right) \right\} \quad (5-15)$$

$Q_{ice,y,t-1,i,j=1}$: Descarga del reservorio del hielo del i-esimo catchment en el día anterior (mm/día)

K_{ice} : Constante de decaimiento del hielo (día)

$M_{pot\ ice,y,t,i,j=1}$: Potencial hielo para derretirse en el i-esimo catchment (mm/día)

$$M_{pot\ ice,y,t,i,j=1} = SFree_{y,t,i,j=1} * \begin{cases} a_{ice} * (T_{y,t,i} - T_0) & T_{y,t,i} \geq T_0 \\ 0 & T_{y,t,i} < T_0 \end{cases} \quad (5-16)$$

a_{ice} : Factor grado día para el derretimiento de hielo (mm/día/°C)

5.4 Evolución anual del glaciar

Es posible calcular la tasa de crecimiento/decrecimiento glaciar calculando la evolución del área año a año, dato fundamental para la calibración de este trabajo, ya que al no poseer caudales de deshielo de la cuenca se realizará una comparación entre los valores de la tasa de decrecimiento glaciar del estudio que realizó Rivera el año 2000 y la tasa modelada, la superficie de glaciar del modelo se calcula de la siguiente forma según la Ecuación 5-17.

$$A_{glaciar,y,t=365} = \sqrt{\frac{b \left(V_{glaciar,y,t=0} + \frac{\Delta V_{glaciar,i,t=365}}{1000^3} \right)}{c}} \quad (5-17)$$

Como se dijo anteriormente el área glaciar es recalculada cada año cambiando la distribución entre el área glaciar y la no glaciar, según Ecuación 5-18.

$$\Delta A_{glaciar,y,t=365} = A_{glaciar,y,t=365} - A_{glaciar,y,t=0} \quad (5-18)$$

5.5 Modelación a escala diaria

En este capítulo se presenta la calibración y validación del modelo WEAP con información meteorológica a escala diaria. Ambos procesos se ejecutaron en tres pasos: el primero, calibrar la cuenca con la información meteorológica incorporando el módulo de glaciares sin modificar sus parámetros; el segundo, calibración de los parámetros que incluyen el módulo de glaciares con los parámetros ya calibrados en el primero proceso; y por último, la calibración de todos los parámetros en conjunto.

Es importante destacar que son 11 parámetros los que tiene el modelo de WEAP en su versión normal. A esto se le agregan 3 parámetros más para el módulo de radiación, y por último 5 más del módulo de glaciares como se muestra en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Parámetros de WEAP.

Parámetros	
Normal	Coefficiente de Cultivo
	Capacidad zona raíces
	Capacidad zona profunda
	Índice de resistencia a la escorrentía
	Conductividad Zona raíces
	Conductividad zona Profunda

Parámetros		
Rad	Dirección Preferida de Flujo	
	Estanque Superior capacidad de zona de raíces	
	Estanque Inferior, Capacidad del suelo	
	Temperatura de derretimiento	
	Temperatura de congelamiento	
	Factor de radiación	
	Límite superior del Albedo	
	Límite inferior del Albedo	
	Glaciares	Factor de fusión para nieve
		Constante de retardo temporal de la nieve
Factor de fusión para hielo		
Constante de retardo temporal del hielo		
Temperatura de fusión		

5.5.1 Calibración del modelo WEAP con módulo de glaciar sin modificar.

El primer paso es conocer e identificar cuáles son las variables influyentes en la modelación. Se puede observar que los parámetros relacionados con la nieve son influyentes a la hora de modelar, por ser una cuenca predominantemente nival. Entonces se agregó el módulo de radiación, y con ello 3 nuevos parámetros, para poder así modelar de mejor forma los deshielos.

Finalmente, se seleccionaron los siguientes cinco parámetros mostrados en la Tabla 5-2. Los parámetros restantes se tomaron de trabajos previos realizados en la misma área.

Tabla 5-2: Parámetros seleccionados para la primera calibración.

Parámetros
Temperatura de derretimiento
Temperatura de congelamiento
Factor de radiación
Límite superior del Albedo
Límite inferior del Albedo

5.5.2 Calibración del modelo WEAP con el módulo de glaciares.

Para la calibración del módulo de glaciares se utilizaron los datos de retroceso anual de glaciares, también llamado tasa de abrasión. [Rivera et al, 2000], El Dr. Rivera realizó un catastro de ciertos glaciares a lo largo de Chile. Dentro de su investigación no contó con ninguno de los glaciares dentro de la cuenca de Pangal, por lo tanto, se seleccionaron los ocho glaciares monitoreados entre el paralelo 33° 02' y 34° 33', zona cercana a la de estudio, durante los años 1955 y 1997. El resumen de estos glaciares y su tasa de abrasión se muestra en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Catastro de glaciares próximos a la zona de estudio, [Rivera et al, 2000]

Nombre del Glaciar	Localización		Período	Cambio	Variación	Cambios de Área	Variación
	Lat. S	Lon. W		distancia frontal	promedio anual		Promedio anual
				[m]	[m/año]	[km ²]	[km ² /año]
Juncal Norte	33° 02'	70° 06'	1955-97	-170	-4	-0,22	-0,01
Juncal Sur	33° 05'	70° 06'	1955-97	-2108	-50	-2,8	-0,07
Risopatrón	33° 08'	70° 05'	1955-97	-530	-13	-0,53	-0,01
G30	33° 08'	70° 08'	1955-97	-517	-12	-0,4	-0,01
G32	33° 08'	70° 07'	1955-97	-527	-13	-0,72	-0,02
Olivares Beta	33° 08'	70° 11'	1955-97	-898	-21	-1,2	-0,05
Olivares Gama	33° 08'	70° 10'	1955-97	-623	-15	-0,4	-0,03
Cipreses	34° 33'	70° 22'	1955-97	-1.128	-27	-0,64	-0,02

De la tabla anterior se observa que la variación promedio anual del área glaciar varía entre -0,01 y -0,03 [km²/año] a excepción del Juncal Sur y Olivares Beta. En promedio la variación es de 0,028 [km²/año].

La modelación de la cuenca se realiza entre agosto del 2004 y abril del 2012, por lo que es necesario conocer como ha variado la cobertura glaciar en este período. Le Quesne et al. (2009), en su publicación agregó al inventario una variación del glaciar Cipreses de -0,04 [km²/año] entre el período 2000 y 2004, tasa de abrasión mayor a la registrada por Rivera et al. Para los años posteriores.

Para la calibración del modelo se utilizó los valores máximos y mínimos de los parámetros del módulo de glaciares según la literatura [Schaepli, 2005].

Tabla 5-4: Valores máximos y mínimos para los parámetros del módulo de glaciares, [Schaefli, 2005].

Parámetros	Unidad	Valor Mínimo	Valor Máximo
Factor de fusión para nieve	[mm/°C días]	1.3	11.6
Constante de retardo temporal de la nieve	[días]	4	18
Factor de fusión para hielo	[mm/°C días]	5	20
Constante de retardo temporal del hielo	[días]	0.2	15
Temperatura de Fusión	[°C]	0	8

El objetivo planteado para la calibración del módulo de glaciares es obtener una tasa de abrasión promedio entre las tres cuencas (Estero Puquio, río Blanco y río Paredones) parecido a los obtenidos por el Dr. Rivera.

5.5.3 Calibración en conjunto con modelo WEAP y módulo de Glaciares

La calibración realizada en el paso dos, produjo alteraciones en los indicadores obtenidos en el paso uno. Esto se explica por la interacción que existe entre el módulo de glaciares y el modelo WEAP. Cada año el módulo de glaciares modifica el área glaciar aumentando el área donde WEAP, con el método de humedad de suelo, realiza sus cálculos.

En este proceso de calibración se optó por seleccionar los mismos parámetros antes calibrados al ser éstos los más sensibles al modelo, ver Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Parámetros calibrados en primera instancia en el paso tres.

Parámetros
Temperatura de derretimiento
Temperatura de congelamiento
Factor de radiación
Límite superior del Albedo
Límite inferior del Albedo
Constante de retardo temporal de la nieve
Constante de retardo temporal del hielo

Luego de conseguir una calibración adecuada en el paso anterior, se procede a calibrar los parámetros menos sensibles al modelo (ver Tabla 5-6).

Tabla 5-6: Parámetros menos sensibles.

Parámetros
Coeficiente de Cultivo
Capacidad zona raíces
Capacidad zona profunda
Índice de resistencia a la escorrentía
Conductividad Zona raíces
Conductividad zona Profunda
Dirección Preferida de Flujo
Estanque Superior
Estanque Inferior

5.5.4 Resultado calibración y validación.

Se presenta en la Figura 5-2 la serie de caudales calibrados y validados para la cuenca de Pangal. En ella se observa el período de calibración, en azul, y validación del modelo WEAP. Este software, debido al cálculo matemático que realiza, requiere un período de pre-arranque, el cual comienza en noviembre del 2004 y finaliza a fines de marzo del 2005. Los siete años restantes se dividen en 4 años de calibración y 3 de validación. En la Tabla 5-7 se expone el valor de los indicadores para los dos periodos.

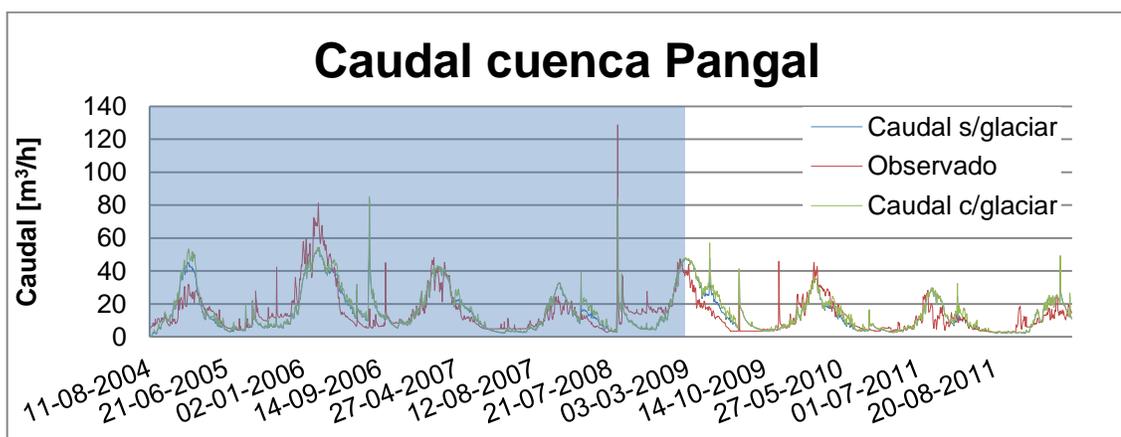


Figura 5-2: Serie de caudales completa 2004-2012.

Tabla 5-7: Indicadores para los períodos de calibración y validación.

Caudal Pangal		
Indicador	Calibración 2004-2008	Validación 2009-2012
R2	0.69	0.55
BIAS	0.23	2.00
Nash-Sutcliffe	0.67	0.61
Log Nash-Sutcliffe	0.57	0.75

A continuación, en la Tabla 5-8, se muestran los valores de los parámetros ingresados a modelo WEAP para todas las cuencas.

Tabla 5-8: Valores finales de los parámetros utilizados.

	Parámetros	Valor
Normal	Coefficiente de Cultivo	0.1
	Capacidad zona raíces	150
	Capacidad zona profunda	250
	Índice de resistencia a la escorrentía	0.8
	Conductividad Zona raíces	55
	Conductividad zona Profunda	55
	Dirección Preferida de Flujo	0.9
	Estanque Superior	0
	Estanque Inferior	0
	Temperatura de derretimiento	6
	Temperatura de congelamiento	5.5
	Radiación	Factor de radiación
Límite superior del Albedo		0.8
Límite inferior del Albedo		0.4
Glaciares	Factor de fusión para nieve	7
	Constante de retardo temporal de la nieve	4
	Factor de fusión para hielo	13
	Constante de retardo temporal del hielo	1
	Temperatura de fusión	7

5.6 Verificación de la acumulación de nieve.

Luego haber calibrado el modelo, se verifica que la acumulación de nieve en las subcuencas de Pangal tenga coherencia y correlación con la realidad. Se propone, por lo tanto, corroborar esta variable con datos reales obtenidos del trabajo realizado por Rene Garreaud en el sitio web <http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/>, que consiste en el procesamiento de la fracción nival basado en la información procedente de *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid*⁴ con resolución de 500 x 500 m².

El cálculo de la fracción nival se realiza de la siguiente forma

$$Fn = \frac{\text{pixeles indentificados con nieve}}{\text{pixeles validos}} * 100 \quad (5-19)$$

Donde los pixeles válidos son el número total dentro de la cuenca menos los pixeles identificados con nubes. El cálculo de Fn se realiza solo cuando la fracción nubosa cumple el siguiente criterio.

$$Fn = \frac{\text{pixeles indentificados con nubes}}{\text{total pixeles}} * 100 > 30\% \quad (5-20)$$

Dicho lo anterior, se muestra en la Figura 5-3 la comparación de la acumulación de nieve modelada y la procesada por Garreaud en su trabajo.

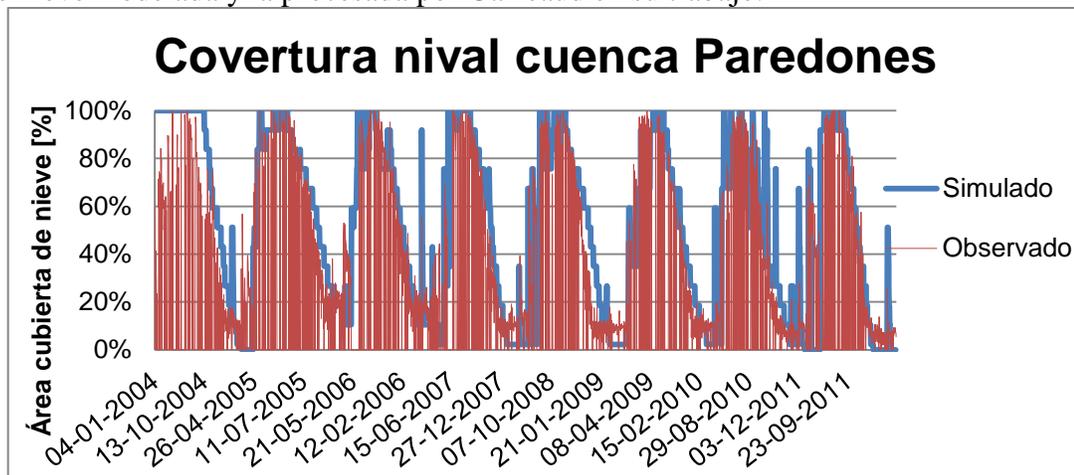


Figura 5-3: Fracción nival de la cuenca de Paredones.

⁴ Elaborado y distribuido por el National Snow and Ice Data Center de la NASA – EEUU.

Se observa la estrecha relación que existe entre lo simulado y lo observado a través de las imágenes satelitales post procesamiento. Existen diferencias de hasta 10% en la fracción nival en los valores mínimos. La acumulación de nieve tiene directa relación con los caudales de deshielo, por lo tanto se observa que la calibración en cuanto a deshielos es representativa.

En la Tabla 5-9 se muestran la correlación que existe entre los datos observados y los modelados. Se observa que las cuencas de menor tamaño poseen menor correlación, lo anterior se explicaría debido a que las cuencas se subdividieron en áreas y la discretización de ellas disminuye proporcional al área, por lo tanto la diferencia que existe entre el los datos representados en la Figura 5-3 y la baja correlación que existe entre los datos modelados y observados, que se muestra en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9: r^2 de la fracción nival para las subcuencas de Pangal.

Cuenca	r^2
Paredones	0,66
Puquios	0,48
Blanco	0,47

Otro factor a considerar, es la cantidad de días que no se observó nieve debido a la nubosidad. Se muestra, en la Tabla 5-10 el porcentaje de días que no se obtuvo información con un promedio total de 52% días sin información durante todo el periodo comparado.

Tabla 5-10: Porcentaje de días sin información

Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
% de días sin información	56%	57%	53%	49%	45%	62%	46%	47%	52%

6 ANALISIS Y RESULTADOS

6.1 Comparación escenarios climáticos

Se comparan las dos últimas versiones de los modelos de cambio climáticos proporcionados por CSIRO, el Mk3 y Mk3.6 los cuales se realizaron en respuesta a los informes AR4 y AR5 dispuestos por el IPCC. En el presente trabajo de título se utilizó el último modelo antes mencionado, Mk3.6, y se comparó con los resultados entregados por Climate Wizard (Maurer, et al. 2007) para la versión anterior, Mk3, datos dispuestos desde su página web interactiva⁵, la cual permite determinar las variaciones de precipitación y temperatura para una zona en general.

En la Tabla 6-1, se dispone en la primera fila la época comparada, 2050 y 2080, fechas a mediano y largo plazo. La segunda fila muestra la versión del modelo dispuesto por CSIRO el Mk3 y el Mk3.6 para cada época comparada. Las últimas dos filas corresponden a la variación de las series meteorológicas comparadas, temperatura y precipitación, las que están separadas por los escenarios B1/RCP2.6 y A1/RCP8.5 los cuales corresponden a los extremos de series climáticas proyectadas para cada versión de los reportes del IPCC.

Tabla 6-1: Temperaturas y precipitaciones para los modelos de cambio climático generados por CSIRO, el escenario B1 es equivalente al RCP2.6 los cuales representan el escenario menos desfavorable, por otro lado, el escenario A1 es equivalente al RCP8.5 en cuanto a que son los más desfavorable, comparándose en los dos periodos seleccionados a mediano y largo plazo 2045 y 2075, correspondientes a los años 2045 y 2075 respectivamente, en una ventana de tiempo de +5 y -5 años por cada periodo seleccionado.

Época		2045		2075	
Versión del modelo CSIRO		Mk3 (B1 o A1)	Mk3.6 (RCP2.6 o RCP8.5)	Mk3 (B1 o A1)	Mk3.6 (RCP2.6 o RCP8.5)
Variación de Temperatura	B1/RCP 2.6	1.01	0.39	1.41	0.41
	A1/RCP 8.5	1.52	0.41	2.54	0.42
Variación de Precipitación	B1/RCP 2.6	-2%	-2%	-14%	-5%
	A1/RCP 8.5	-5%	-6%	-18%	-5%

⁵ <http://www.climatewizard.org/>

La Tabla 6-1 muestra que las temperaturas en ambos modelos tienden al aumento, sin embargo existe una diferencia de hasta 2°C en el largo plazo y cerca es 1 °C en el corto plazo para el escenario más desfavorable, por lo tanto el modelo que se utilizó si bien representa la tendencia al alza de las temperaturas es menos severo que el comparado.

Por otro lado, el aumento de la temperatura para el modelo que se utiliza en el presente trabajo muestra una leve diferencia entre el mediano y largo plazo. Las precipitaciones muestran un descenso en ambos modelos, siendo similares al mediano plazo en ambos escenarios, en cambio en el largo plazo muestran diferencias de hasta un 13%. Es importante destacar que en ambos elementos climáticos, temperatura y precipitación, existe una leve diferencia entre los lapsos de tiempo para el escenario más desfavorable, RCP8.5.

6.2 Temperatura

A continuación se muestran las proyecciones de cambio climático en la serie de tiempo modelada comprendida entre los años 1980 y 2080.

En la Figura 6-1 y Figura 6-2 se observa, en la sección cuadrada de color verde, la serie de tiempo histórica que comprende los años del 1980 al 2005 y, en la sección de color blanco, las proyecciones del cambio climático para el intervalo de años entre el 2006 y 2080 según el modelo MK3.6. La línea de color rojo muestra el escenario más desfavorable, RCP8.5, la azul el menos desfavorable, RCP2.6. Esta simbología acompañará todas las figuras desde ahora para su mayor comprensión. Las temperaturas máximas y mínimas que se muestran están a nivel diario y corresponden al promedio de éstas a nivel mensual para el año que se señala. Se hace una simplificación acorde a los objetivos planteados, se promedian los 10 ensembles, que son representaciones de estados o eventos futuros de sistemas dinámicos que entrega el modelo Mk3.6, se modelan en el WEAP y luego se promedian los resultados.

En la Figura 6-1, se observa que la temperatura máxima y la mínima en períodos históricos corresponden a +2,5°C y -3°C, respectivamente. Se observa que la mínima en valores absolutos es mayor a la máxima, situación que se invierte para los períodos proyectados, donde se alcanza valores máximos de +3,2°C y mínimos de -2,8°C aumentando en 0,7°C la máxima y 0,2°C la mínima. Cabe destacar que las variaciones antes señaladas se miden con respecto al promedio histórico.

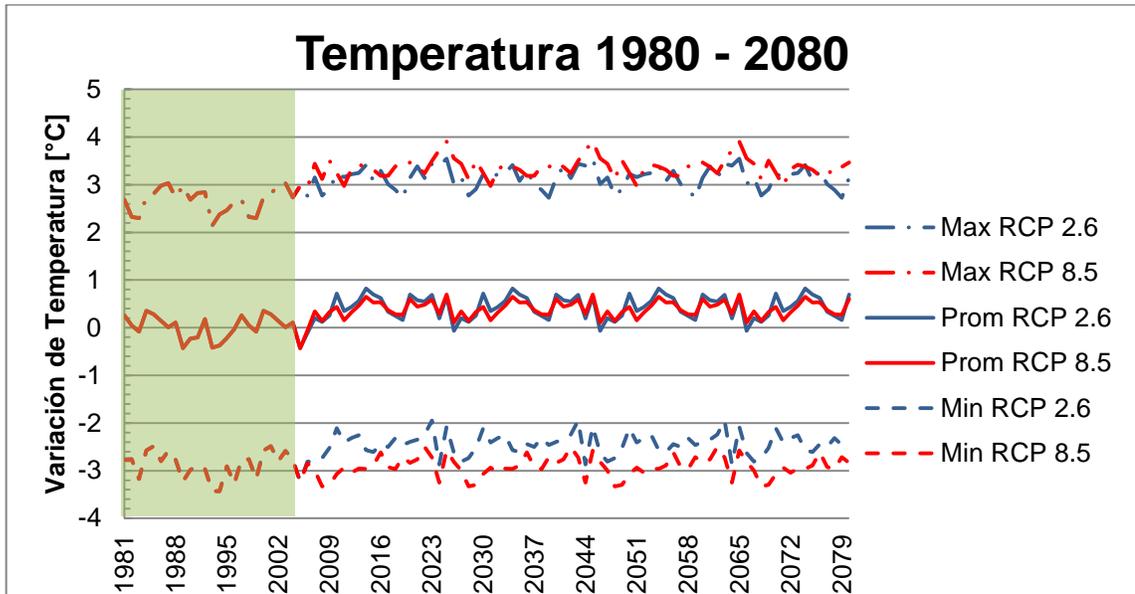


Figura 6-1: Variación del promedio de las máximas y mínimas anuales y el promedio anual de temperaturas para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

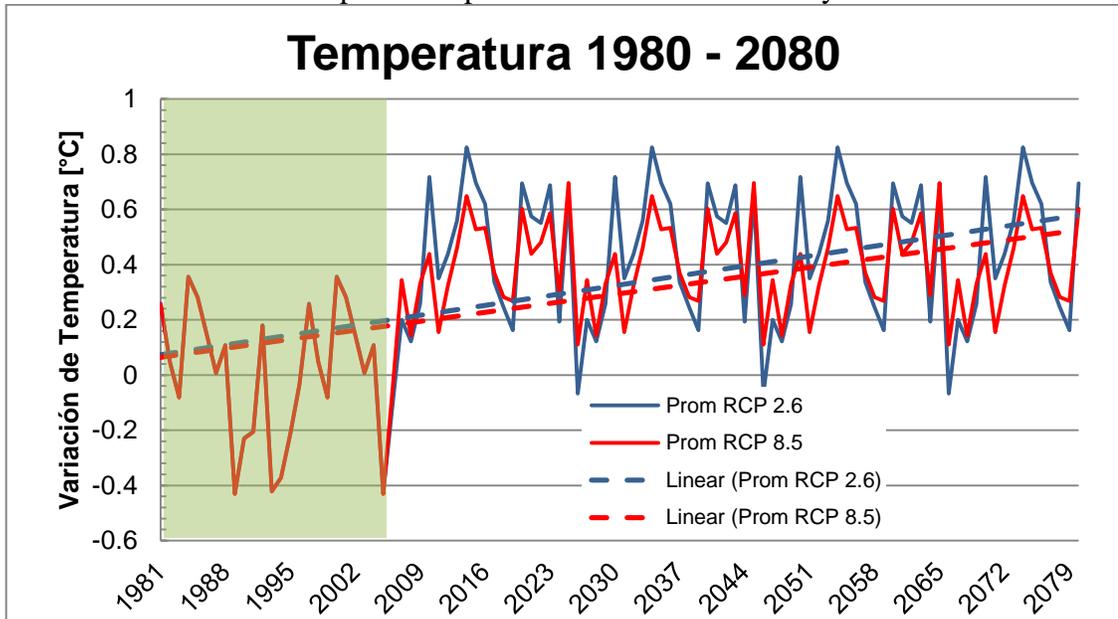


Figura 6-2: Variación promedio anual de temperaturas.

Entre las proyecciones de temperatura de los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, se muestra que predominan los valores extremos por parte del escenario menos desfavorable, situación que cambia cuando se observan los valores promedios del mismo

período (ver Figura 6-2). Además se nota que la serie de temperaturas del modelo CSRIO Mk3.6 tiene ciclos que duran aproximadamente 20 años.

La Figura 6-3 muestra la temperatura promedio mensual, calculada para cada uno de los 10 ensembles que el modelo Mk3.6 presenta, lo que genera una banda de temperaturas para el periodo histórico y los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, se observa para el periodo histórico no existe una diferencia notable entre los ensembles del modelo para el periodo comprendido entre abril y noviembre, lo mismo ocurre para el escenario RCP 2.6 entre los meses de junio y noviembre, para el escenario RCP 8.5 no se presenta tan marcadamente a excepción de los meses de septiembre y octubre donde esta relación entre ensembles se estrecha. Además, se puede notar que la diferencia entre el periodo histórico y los escenarios futuros se presenta en el periodo de verano, donde las temperaturas proyectadas se elevan levemente por encima de las históricas.

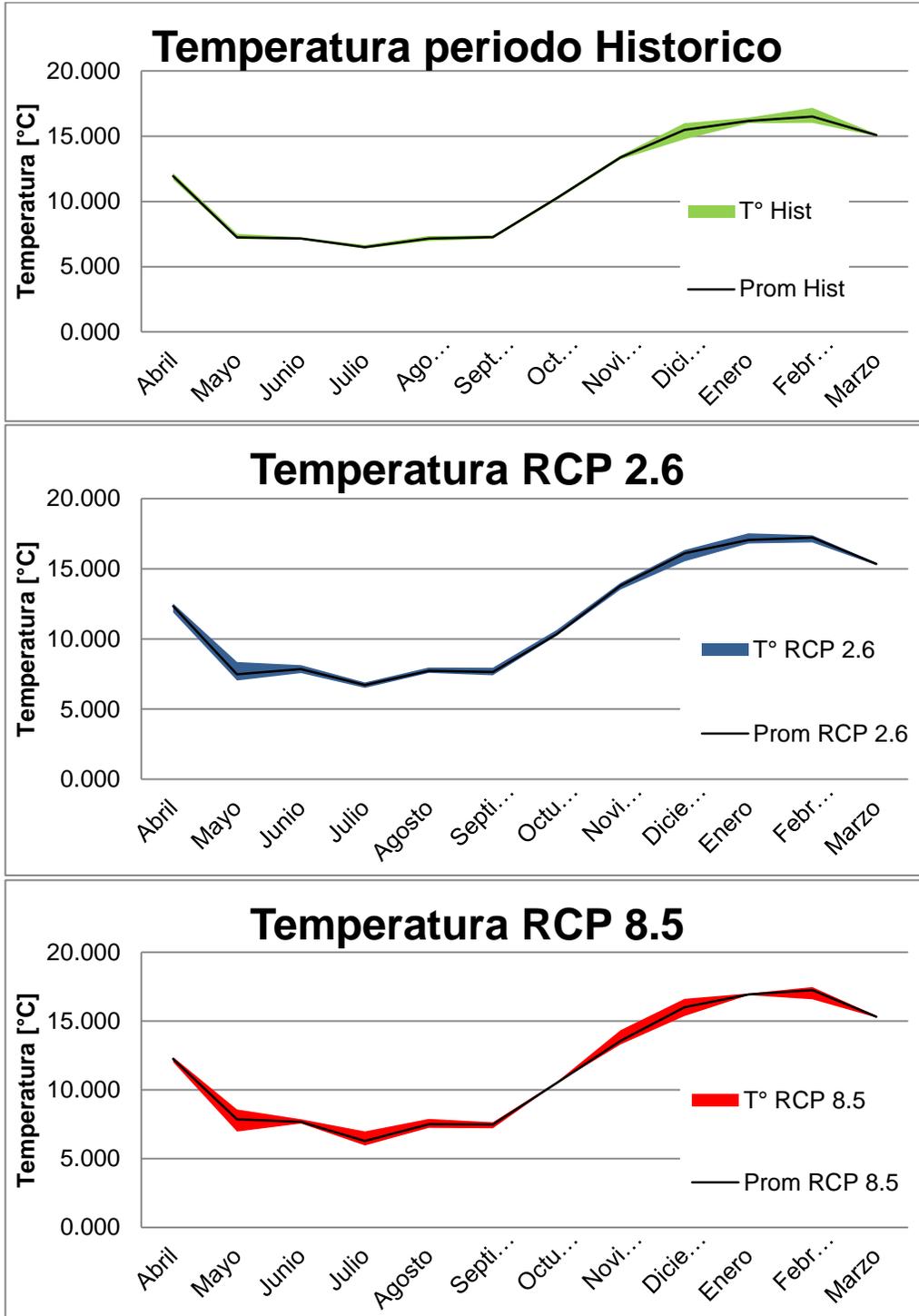


Figura 6-3: Temperatura para los periodos Histórico y escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente.

En la Tabla 6-2 se presenta un resumen de los datos y un gráfico de las temperaturas promedio, máxima y mínima a nivel mensual para las dos ventanas de tiempo que se propone analizar según los objetivos.

Tabla 6-2: Resultados históricos (1980-2005) y futuros (2045-2075) del modelo MK3.6.

	T promedio [°C]			Variación [°C]		T Max [°C]			T Min [°C]		
	Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5	Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5
Abril	11.5	12.2	12.2	0.7	0.7	15.7	15.9	15.0	4.3	5.8	5.8
Mayo	6.9	7.3	7.4	0.4	0.6	12.9	12.9	12.1	-10.8	-9.3	-9.4
Junio	6.9	7.8	7.7	1.0	0.8	13.7	13.7	12.2	1.3	1.0	1.1
Julio	6.2	6.7	6.5	0.6	0.3	12.4	12.6	11.5	0.8	0.5	0.4
Agosto	6.8	7.6	7.5	0.8	0.7	14.5	13.8	12.5	0.8	1.9	1.6
Septiembre	6.9	7.7	7.6	0.7	0.6	12.2	11.8	10.6	3.6	3.7	3.5
Octubre	9.9	10.4	10.5	0.5	0.6	15.4	15.1	14.2	5.8	5.6	5.7
Noviembre	12.9	13.9	13.7	1.0	0.9	18.0	18.1	16.7	8.4	9.1	8.8
Diciembre	15.2	16.3	16.3	1.1	1.1	21.9	22.6	20.8	7.8	7.9	8.3
Enero	15.5	16.9	16.9	1.4	1.4	23.1	23.2	21.2	9.3	10.3	9.8
Febrero	15.6	17.2	17.2	1.7	1.7	23.2	23.1	21.2	10.4	11.2	10.6
Marzo	14.5	15.3	15.3	0.8	0.8	17.5	17.6	17.1	11.5	11.9	11.4
Promedio	10.7	11.6	11.6	0.9	0.8	16.7	16.7	15.4	4.4	5.0	4.8

En las primeras tres columnas de la Tabla 6-2, las cuales muestran la temperatura promedio de los tres escenarios, evidencia el alza de temperaturas en cada uno de los meses que se ratifica en las columnas cuatro y cinco, que representan a las variaciones entre el periodo histórico y los dos escenarios futuros, donde los resultados son todos positivas con máximas de 1,7°C en febrero y mínimas de 0,3 y 0,4°C, dependiendo del escenario que se analice

6.3 Precipitación

Las precipitaciones son el segundo input meteorológico ingresado en la modelación de la cuenca de Pangal. Se presenta la serie de tiempo completa de 100 años para los dos escenarios de cambio climático.

En la Figura 6-4 se observa que el promedio individual de las precipitaciones de ambos escenarios son parecidos con tendencia a la baja en ambos casos. Sin embargo existe una ventana de tiempo en los primeros años de la proyección del escenario RCP8.5, del 2006 al 2020, fecha entre las cuales existe un aumento en las precipitaciones que genera una pendiente en la regresión lineal mayor en dicho escenario. Esta anomalía carece de sentido ya que los efectos del cambio climático no se reflejan a escalas de tan corto plazo, no obstante estos valores no afectara el análisis posterior, esto debido a que el período de tiempo estudiado comienza el 2045, 25 años más que el periodo que representa esta inconsistencia.

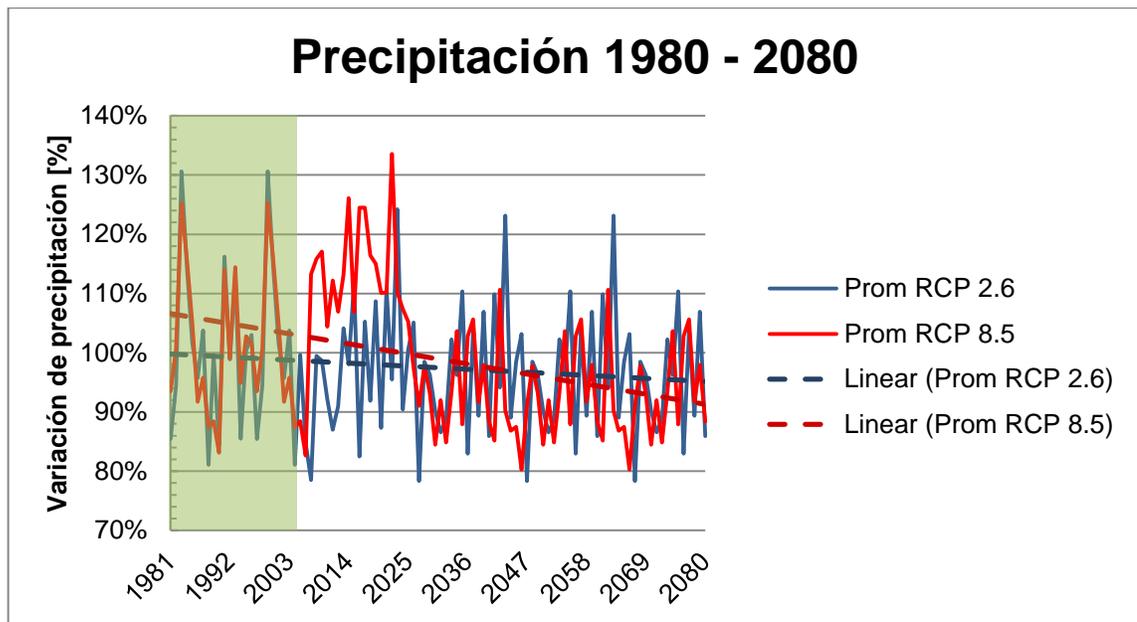


Figura 6-4: Serie de tiempo de precipitaciones promedios anuales para la estación de Pangal en Pangal.

La Figura 6-5, muestra el promedio mensual de precipitaciones para el período comprendido entre los años 2045-2075. En ella se observa que la mayor diferencia ocurre en los meses de invierno, donde los eventos de precipitación total de ambas proyecciones disminuyen en comparación con los históricos. Es más pronunciado este efecto para el escenario más desfavorable, RCP8.5. También se puede observar que ocurre el efecto contrario para los meses estivales. En cuanto a los eventos diarios de precipitación éstos son mayores para el escenario RCP8.5, seguidos por el RCP2.6 y por último el escenario histórico.

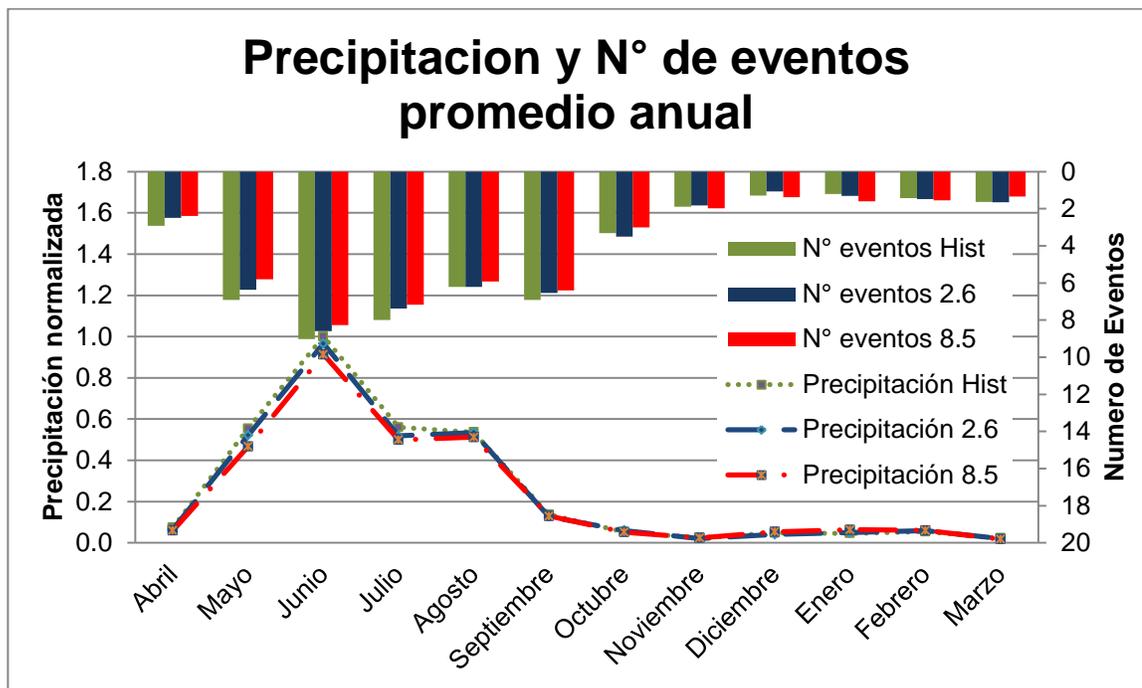


Figura 6-5: Serie anual del promedio de las precipitaciones mensuales, y el número de eventos por mes en el periodo Histórico (1980-2005) y el periodo de proyección para ambos escenarios (2045-2075). Se normalizo la precipitación con respecto al valor más alto alcanzado en la serie el cual corresponde al mes de Junio.

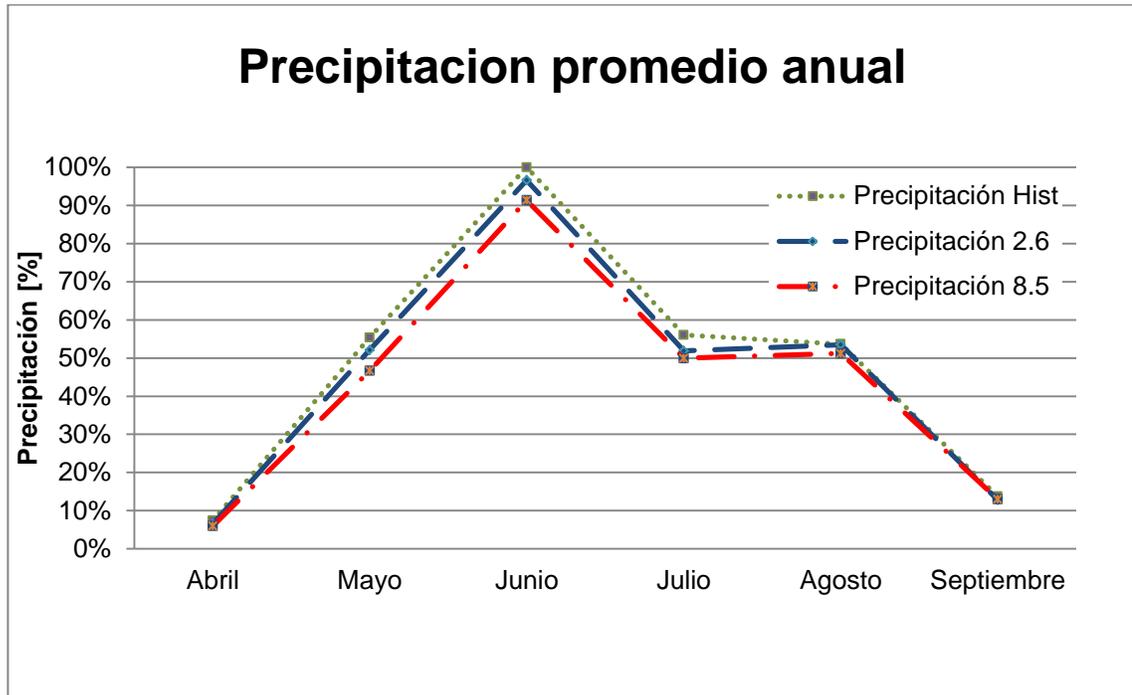


Figura 6-6: Promedio del porcentaje de precipitaciones para los meses desde abril hasta septiembre, para el periodo Histórico (1980-2005) y las dos proyecciones en el periodo (2045-2075).

La Figura 6-6, muestra las precipitaciones en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre para poder ser analizados de mejor forma debido a que estos meses son los que más aportan precipitaciones durante el año. Se observa que no existen cambios significativos en los meses de abril y septiembre, en ninguno de los dos períodos ni en los escenarios proyectados. Las precipitaciones de los meses de mayo y junio se comportan de forma parecida, cerca de un 10% de diferencia entre el periodo histórico y el escenario RCP8.5, meses donde las precipitaciones son mayores en conjunto con julio, donde las proyecciones RCP2.6 y RCP8.5 son parecidas con 8% menos de precipitaciones que el escenario histórico. Estos tres meses son los que generan en proporción las disminuciones anuales de las proyecciones siendo mayor el descenso para el escenario más desfavorable, el RCP8.5.

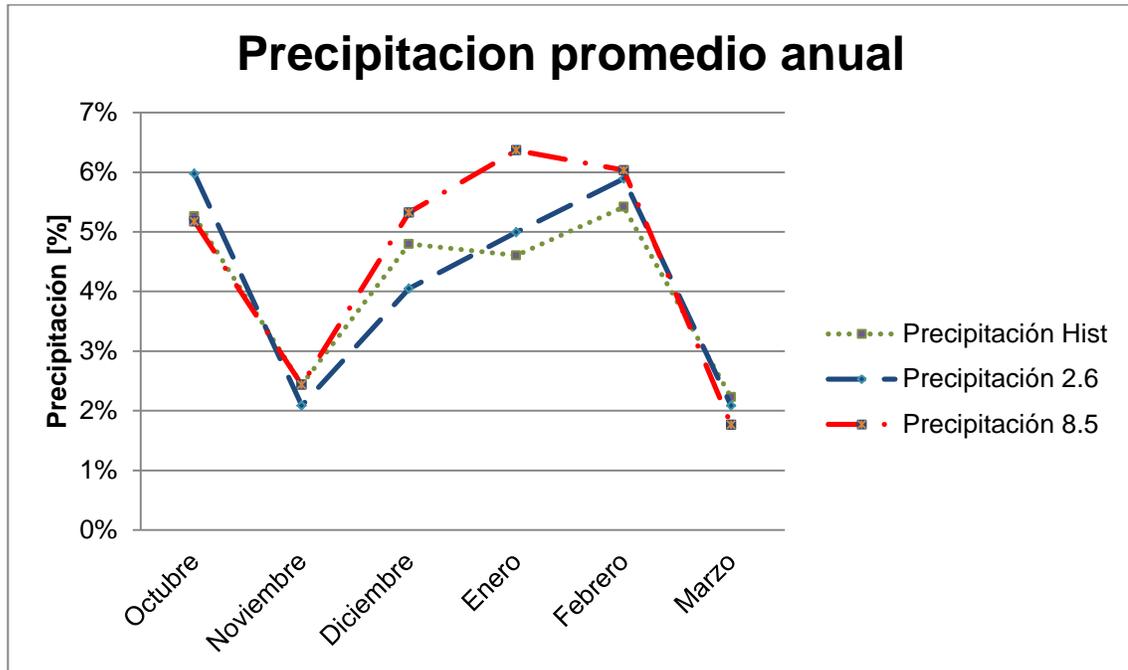


Figura 6-7: Promedio del porcentaje de precipitaciones para los meses desde octubre hasta marzo, para el período histórico (1980-2005) y las dos proyecciones en el periodo (2045-2075).

La Figura 6-7, muestra un acercamiento de las precipitaciones en los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo. Se observa que octubre es un mes donde las precipitaciones históricas son parecidas a las proyecciones más desfavorables, y aproximadamente un 1% menores a las del escenario RCP2.6.

En los meses comprendidos entre noviembre y marzo el escenario RCP8.5 posee precipitaciones mayores a los ocurridos en el periodo histórico e incluso mayores a las proyecciones RCP2.6, alcanza a ser un 1,5% mayor que el periodo histórico. En el mismo período de tiempo el escenario RCP2.6 presenta precipitaciones que oscilan con respecto a las del período histórico, siendo mayor en enero y febrero por 0,8% y menor en el mismo porcentaje en diciembre. Por lo tanto, se puede decir que las precipitaciones tienden a aplazarse en verano para el escenario RCP2.6 manteniendo la cantidad precipitada y en el caso del escenario RCP8.5 la situación cambia proyectando mayores precipitaciones en verano llegando incluso a ser un 2% más en el mes de enero.

La Figura 6-8 muestra que solo en tres meses ambas proyecciones superan los valores históricos. En el caso de la proyección menos desfavorable, RCP2.6, esto ocurre en los meses octubre, enero y febrero, superando los valores históricos en un 10%. La proyección RCP8.5, presenta valores superiores en los meses de diciembre, enero y

febrero. Es importante destacar que en enero el aumento con respecto al histórico, es un 40% más y los otros dos cercanos al 10%. Dicho lo anterior, se observa que si bien aumentan las precipitaciones en verano, éstas ponderadas por la cantidad de milímetros caídos, son insignificantes con respecto al total anual.

Uno de los factores importantes del cambio climático es el descenso de precipitaciones, que se observó en detalle en las Figura 6-6 y Figura 6-7, sin embargo existen efectos climáticos extremos los cuales deben ser analizados con el fin de diseñar obras hidráulicas o generar planes de contingencia para apaciguar estos efectos.

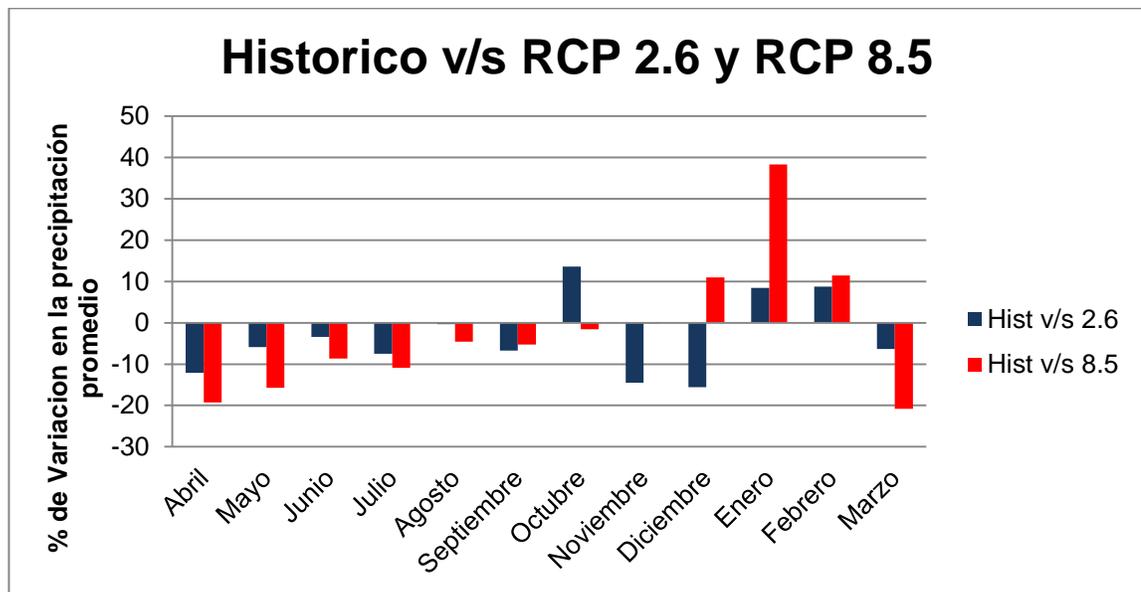


Figura 6-8: Porcentaje de variación de precipitaciones de las proyecciones RCP2.6 y RCP8.5 entre los años 2045 y 2075 con respecto al escenario histórico 1980-2005.

Las precipitaciones totales para ambos escenarios se esperan que descendan entre un 4% y un 8% para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente, como se puede observar en la Figura 6-9.

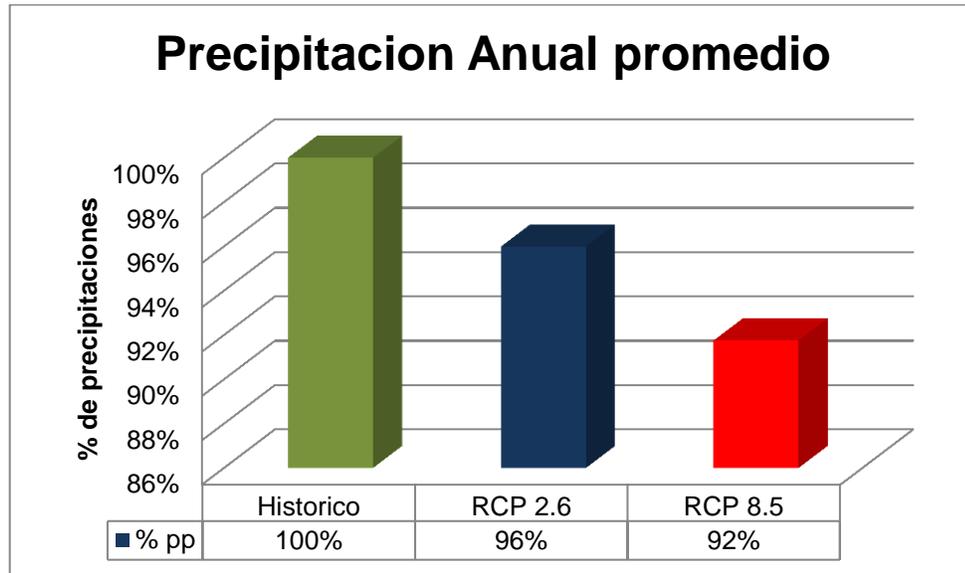


Figura 6-9: porcentaje de precipitaciones históricas y proyecciones RCP2.6 y RCP8.5 para los períodos comprendidos entre 2045 y 2075.

6.4 Acumulación de nieve

Uno de los objetivos de la tesis es generar gradientes coherentes con el modelo real, se propuso realizar gradientes de precipitación parabólicos con el fin de simular el transporte de nieve en forma de aludes desde las bandas más altas (ver capítulo Gradiente de precipitación), para así evitar la acumulación de nieve que ocurren en las zonas altas al ser modeladas en WEAP. En la Figura 6-10, se muestra el esquema de una tormenta tipo.

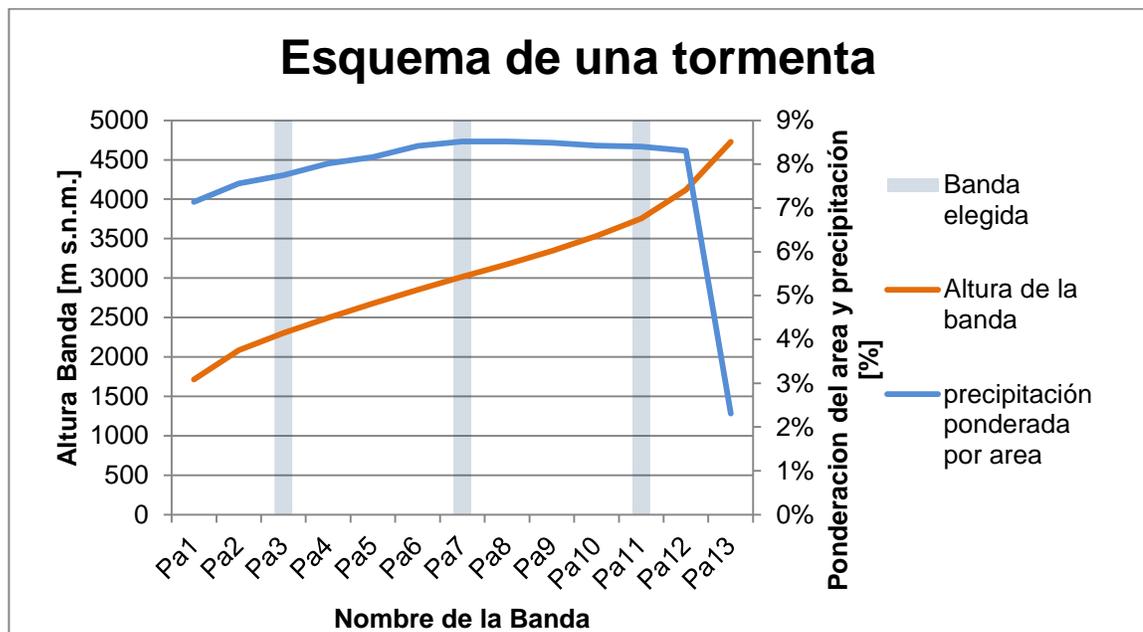


Figura 6-10: Esquema de una tormenta representada en la cuenca de Paredones, se muestra el nombre de la banda y su correspondiente elevación en color rojo. En color azul se muestra la precipitación ponderada por el área de la banda. Además, se seleccionan tres bandas Pa3, Pa7 y Pa11, en celeste para ser analizadas.

En la Figura 6-11 se muestra la altura de nieve desde las bandas de elevación bajas pasando por una intermedia y finalizando en una de las altas para la cuenca de paredones. Las proyecciones RCP2.6 y RCP8.5 en comparación con el período histórico, presentan un descenso en las bandas seleccionadas Pa3, Pa7 y Pa11 con variaciones de 0,05; 0,1; y 0,3 m, respectivamente. Además, ambas proyecciones no difieren mucho en las bandas más altas, sobre los 3000 m s.n.m., y para bandas inferiores las diferencias que existen son milimétricas y por lo tanto no significativas.

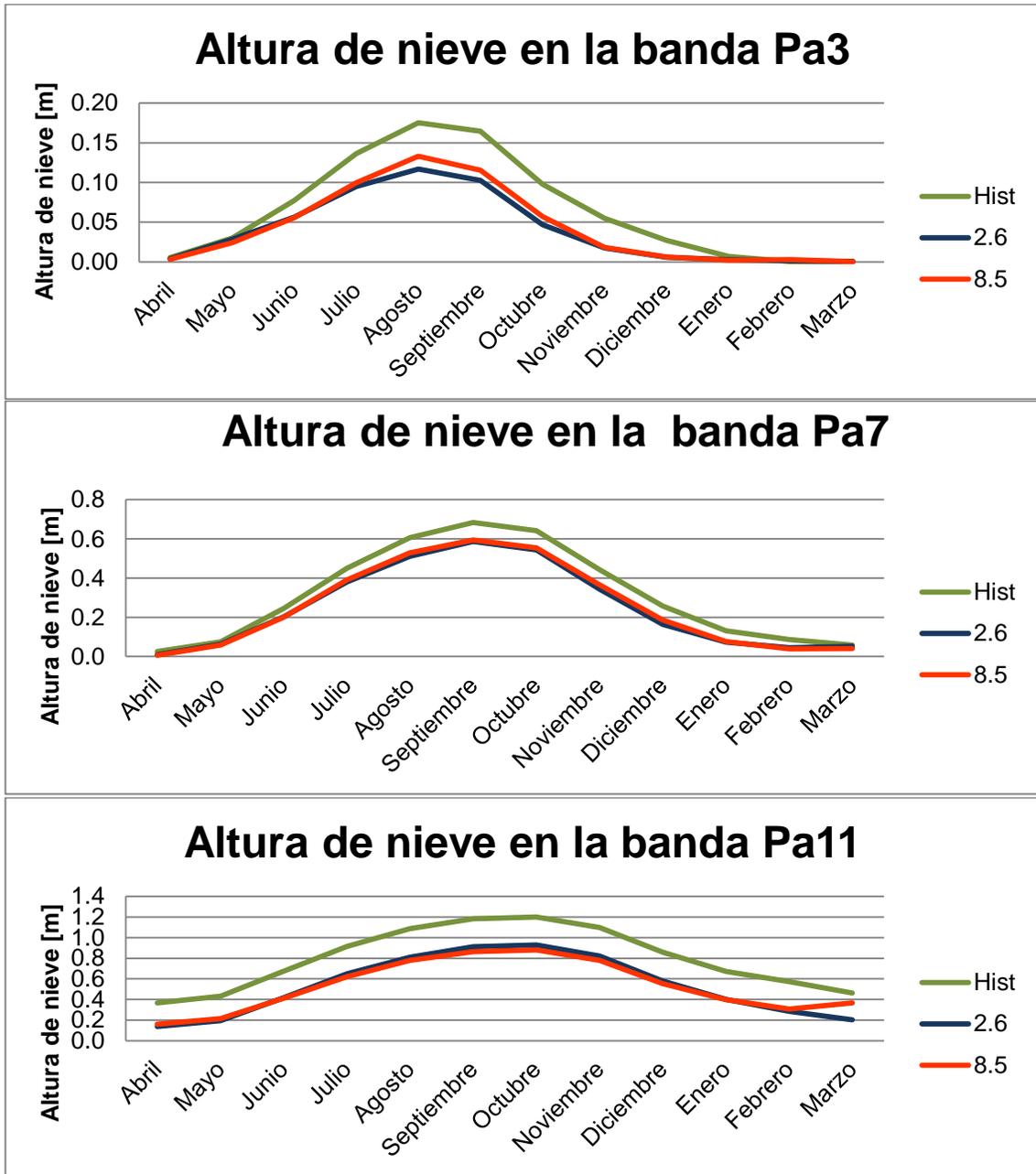


Figura 6-11: Columna de nieve para las bandas Pa3, Pa7 y Pa11.

Al disgregar las cuencas en varias bandas de elevación, es posible crear la curva de cobertura nival con mejor detalle, como se observa en la Figura 6-12. La cuenca de Paredones alcanza en los meses de junio hasta fines de agosto una cobertura de nieve de 100%, valor que puede ser sobre estimado. Se observa que, en comparación al período histórico, la cobertura de nieve siempre desciende alcanzando hasta un 15% menos de cobertura en el mes de marzo. El escenario RCP2.6 muestra un derretimiento de las

bandas de elevación más pronunciado en comparación al escenario RCP8.5 que comienza a principios de octubre y finaliza en marzo con valores similares a los del escenario RCP8.5. Por otro lado, en el mes de abril se observa un desplazamiento lateral de la columna que corresponde a la cobertura nival.

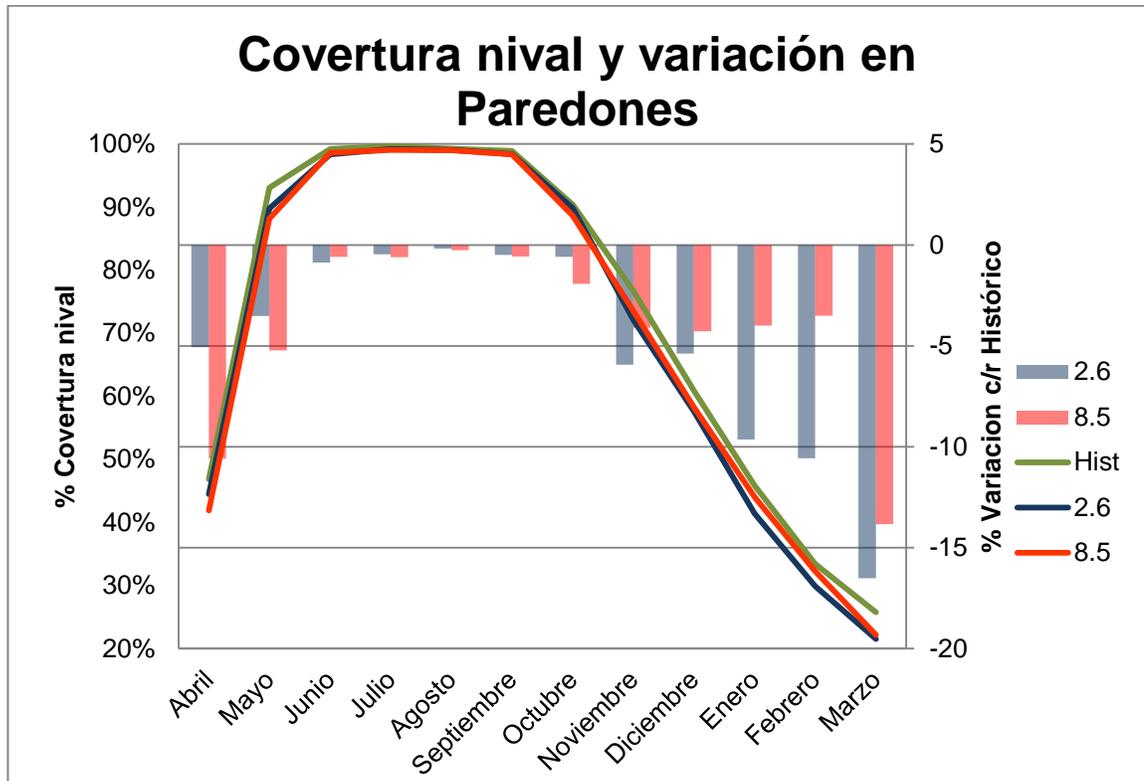


Figura 6-12: Cobertura nival para el período histórico y las proyecciones (eje izquierdo) y la variación de los escenarios climáticos en comparación con el período histórico (eje derecho).

6.5 Área glaciar

La evolución glaciar es uno de los objetivos de la tesis. El módulo de glaciares, como se explicó anteriormente, separa cada banda de elevación en dos; la parte con glaciares y la que no posee glaciares. La parte glaciar está sujeto al cálculo diario basado en el modelo grado-día que genera el balance de masa que año a año actualiza el área glaciar de cada banda de elevación, resultados que se exponen en la Figura 6-13.

La tasa de abrasión hace mención a la masa de hielo glaciar expresada en área que pierde año tras año. Al no existir datos propios de estos glaciares ni sus afluentes en la zona de interés, la forma utilizada para calibrar el módulo de glaciares fue calibrar el área de derretimiento glaciar anual que, según la investigación realizada por Andrés Rivera (Rivera, 2000), la abrasión de glaciares cercanos a los modelados es del orden de $-0,03$ $-0,04$ $\text{km}^2/\text{año}$.

Dicho lo anterior, se puede observar en la Figura 6-13 que la tasa de abrasión promedio para el período histórico es de $0,047$ $\text{km}^2/\text{año}$, valor que si bien levemente superior al promedio no supera la tasa máxima registrada por Andrés Rivera en el glaciar Olivares Beta ($-0,054$ $\text{km}^2/\text{año}$).

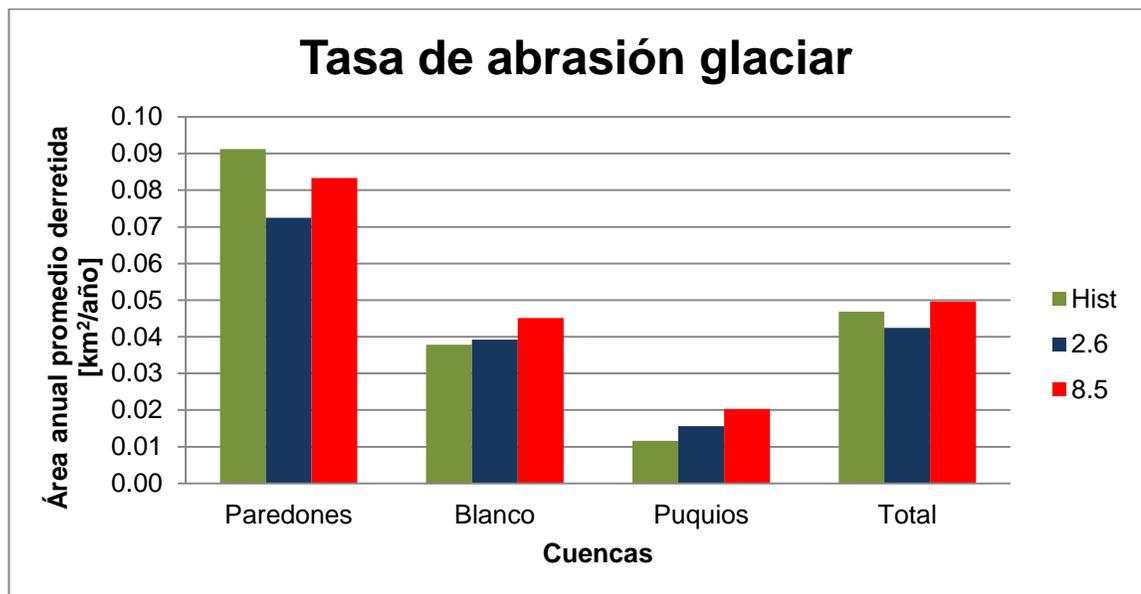


Figura 6-13: Tasa de abrasión glaciar, para las tres cuencas ordenadas por altura del centro de masa siendo la más alta la cuenca del río Paredones y la más baja el estero Puquios.

Se observa que Paredones, cuenca que aporta con la mayor área glaciaria, es la única cuenca donde el valor de la tasa de abrasión de las proyecciones es mayor a la histórica, además de ser la más alta. La cuenca más baja y la que aporta menor área glaciaria es la que posee la tasa de abrasión más baja. Por lo tanto, el módulo de glaciares anexo al WEAP hace relación directa entre el área y la tasa de abrasión luego de ser calibrado.

Otra observación es que la tasa de abrasión del escenario RCP8.5 siempre es mayor a la del escenario RCP2.6 lo cual indica que el escenario más desfavorable genera mayor pérdida de área glaciaria.

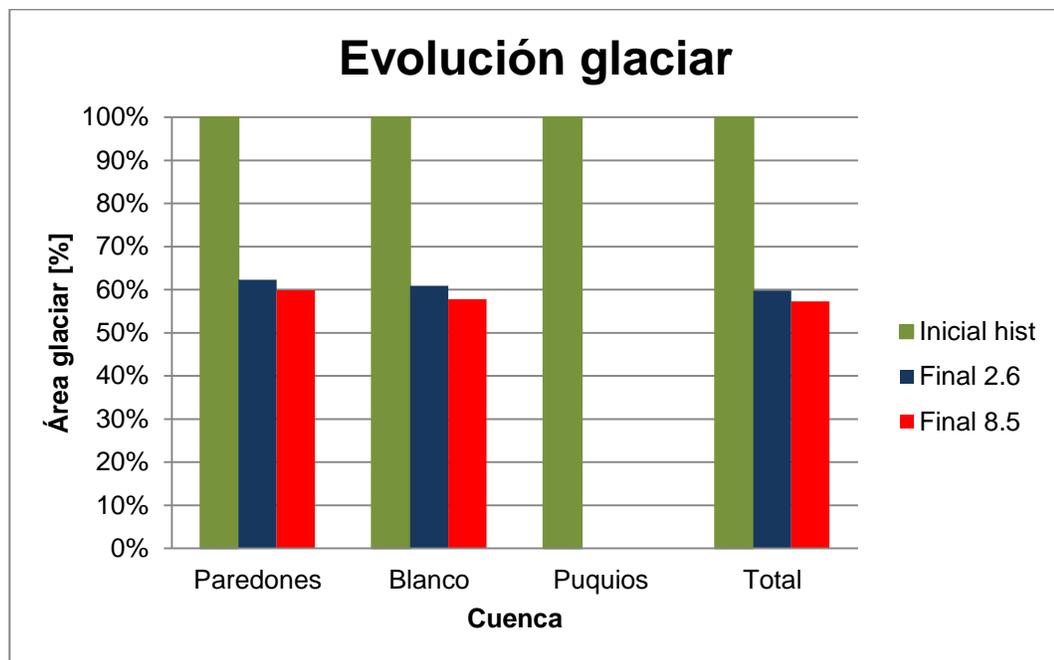


Figura 6-14: Evolución glaciaria, el valor 100% corresponde al valor del glaciar en el año de inicio, 1980. El valor de las proyecciones es el valor que obtuvo 95 años después al término del período proyectado, 2075.

La Figura 6-14, muestra que ambas cuencas; río Paredones y río Blanco, reducen su área en valores cercanos al 40%, el promedio total es de 40% y 43% de reducción para el escenario RCP2.6 y RCP8.5 respectivamente. Otro punto a destacar es la desaparición de los glaciares que existen en la cuenca del estero Puquios hecho que ocurre en el año 2061 y 2068 para el escenario RCP8.5 y RCP2.6 respectivamente.

6.6 Caudal

Se observa en Figura 6-15 la serie completa del porcentaje de caudales promedios anuales desde el año 1980 al 2080, comparados con el período histórico (1980-2005), para las proyecciones RCP2.6 y RCP8.5. Los caudales se obtuvieron a través de las proyecciones climáticas del GCM Mk3.6 utilizando los modelos hidrológicos desarrollados para este trabajo. Además la Figura 6-16, muestra las proyecciones de caudales glaciares de la cuenca Pangal.

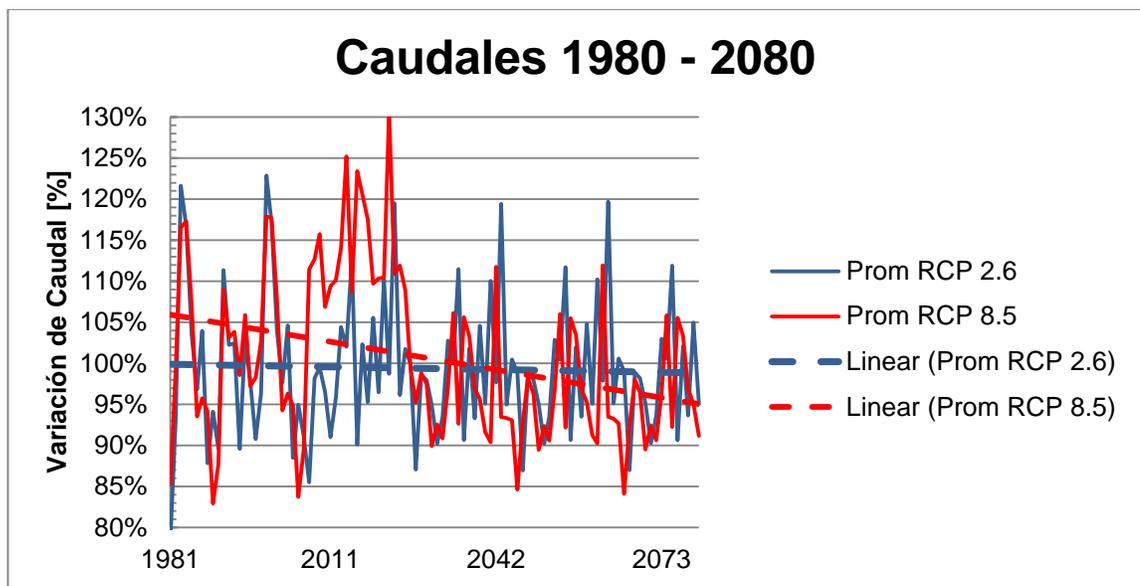


Figura 6-15: Variación de la serie de caudal total de la cuenca Pangal proyectada.

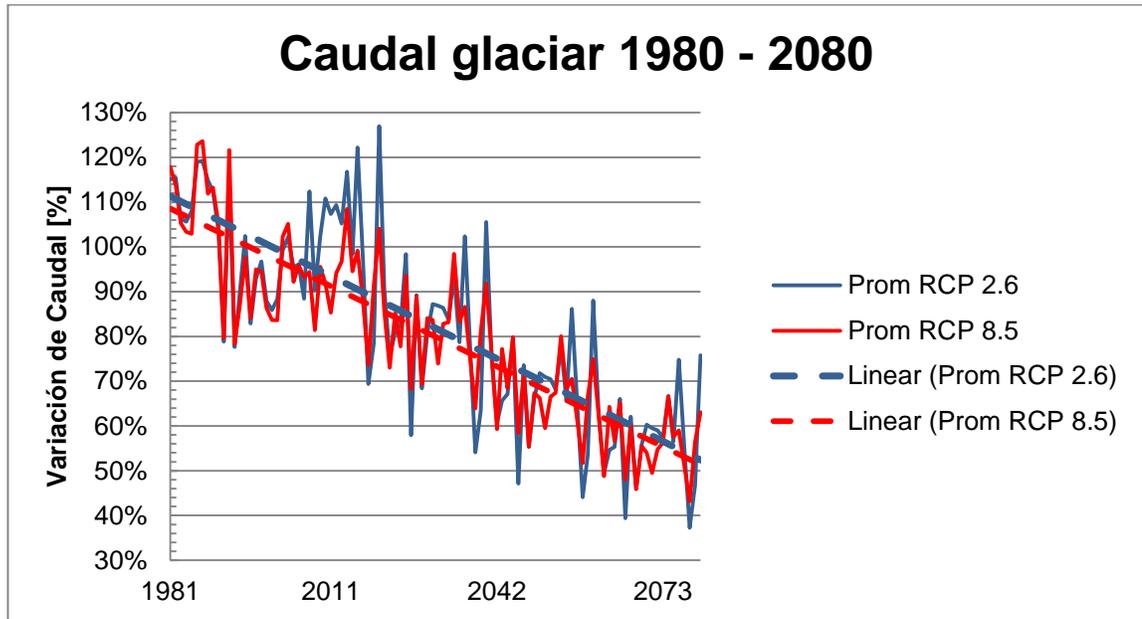


Figura 6-16: Variación de la serie de caudal medio glaciar de la cuenca Pangal proyectado.

De la figura anterior se deduce que los caudales esperados para fines de siglo tienden a la baja, sobre todo los caudales glaciares que son independientes del escenario proyectado, no así los caudales totales que muestran una clara diferencia el escenario más desfavorable y el más conservador.

En la Figura 6-17, el eje vertical izquierdo representa el caudal promedio mensual total de la cuenca, y el eje vertical derecho el caudal glaciar. Se puede apreciar que el caudal glaciar es un orden de magnitud menor que el caudal total y que, según el módulo de glaciares, entre los meses de julio y octubre no existe una contribución significativa de los glaciares sobre el caudal total de la cuenca, y que la mayor diferencia de caudales totales y glaciares ocurre en las épocas de verano y otoño.

En términos generales, no existen diferencias significativas entre los caudales glaciares para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, no obstante ambos escenarios difieren en gran medida con el periodo histórico. En cuanto a los caudales totales de la cuenca de Pangal, se observa que en el mes de junio el escenario RCP 2.6 presenta un *peak* mayor al escenario RCP 8.5 e incluso al periodo histórico. Esta variación positiva dura aproximadamente cuatro meses. Por otro lado, entre los meses de noviembre – mayo las proyecciones presentan una variación negativa prácticamente constante en el tiempo.

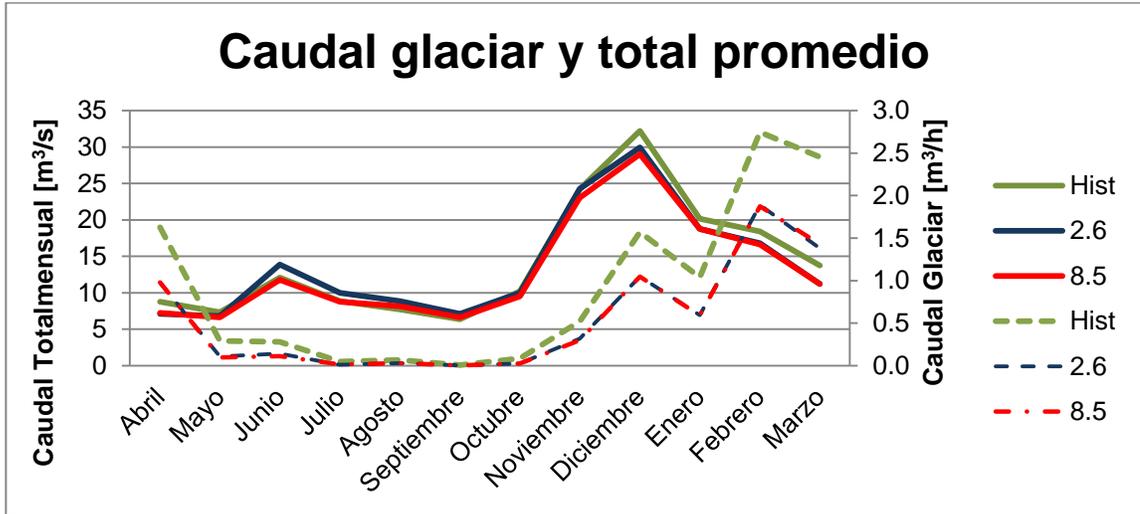


Figura 6-17: Caudal promedio mensual total y glaciar de la cuenca para el periodo histórico y las proyecciones.

La Figura 6-18, representa la serie de tiempo del caudal diario, que señala más detalladamente lo analizado en la Figura 6-20. Se desprende a partir del análisis de este gráfico que en el periodo histórico el *peak* de caudales se obtiene a fines de diciembre, en cambio, el *peak* de proyecciones se adelanta hacia principios de diciembre. Se observa, por lo demás la presencia de discontinuidades a principios de junio para el caudal total, lo cual coincide con el periodo de inicio de precipitaciones además de anomalías en el caudal glaciar y total que disminuyen el caudal en el mes de enero tanto para el periodo histórico como para las proyecciones.

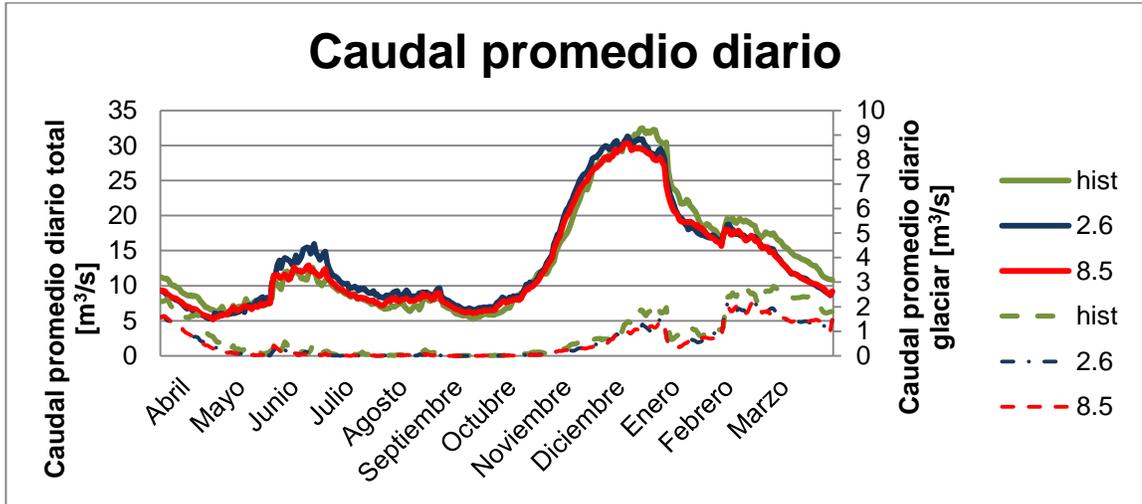


Figura 6-18: Caudal glaciar y total promedio diario de la cuenca de Pangal para el periodo histórico y las proyecciones.

La Figura 6-19 muestra la variación del caudal total de la cuenca de Pangal. Se observa que desde mediados de mayo hasta principios de diciembre la variación es positiva, llegando a valores de 4 [m³/s] a mediados de junio, el resto de meses ocurre lo contrario se observan variaciones negativas que llegan a -4 [m³/s]. En cuanto a las proyecciones, en el periodo de variación positiva el escenario RCP2.6 muestra variaciones de mayor magnitud que las del escenario RCP8.5, diferencia que desaparece al comparar en el periodo de variación negativa. La Figura 6-20 muestra la variación del caudal glaciar, se observa que es negativa incluso en el periodo que prácticamente no aportaba, alcanzando en marzo variaciones de -1 [m³/s].

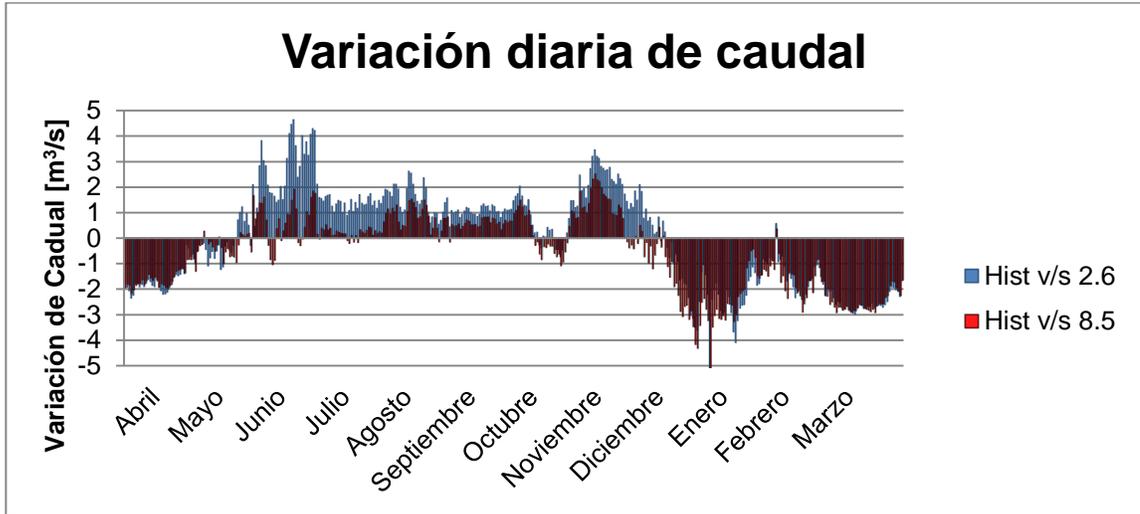


Figura 6-19: Variación del caudal diario total de las proyecciones con respecto al periodo histórico.

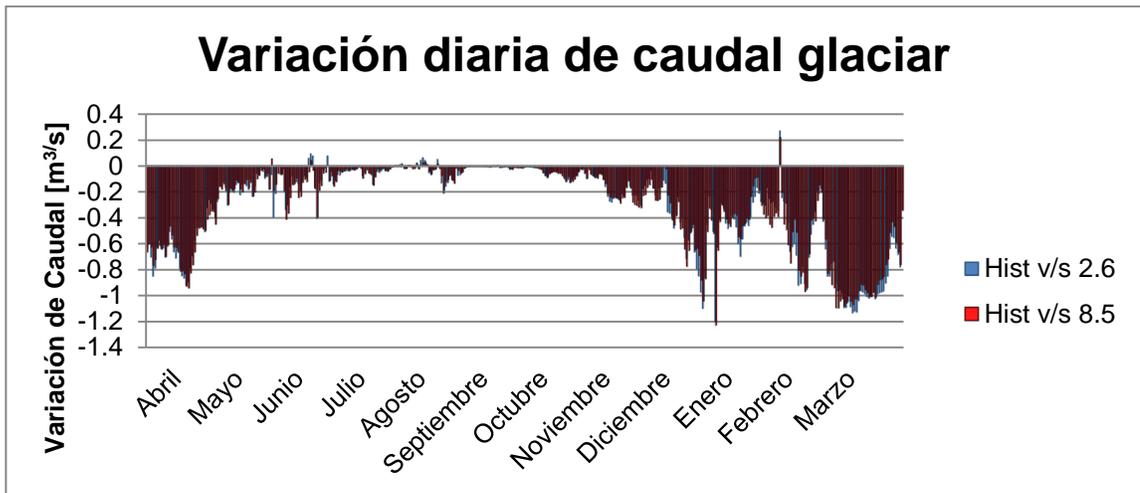


Figura 6-20: Variación del caudal diario glaciar de las proyecciones con respecto al periodo histórico.

La Figura 6-21 muestra la probabilidad de excedencia del caudal total diario, mostrando que prácticamente el 40% de los caudales más bajos no presenta variaciones. Por el contrario la mayor variación ocurre 2 y 12% de los caudales más altos.

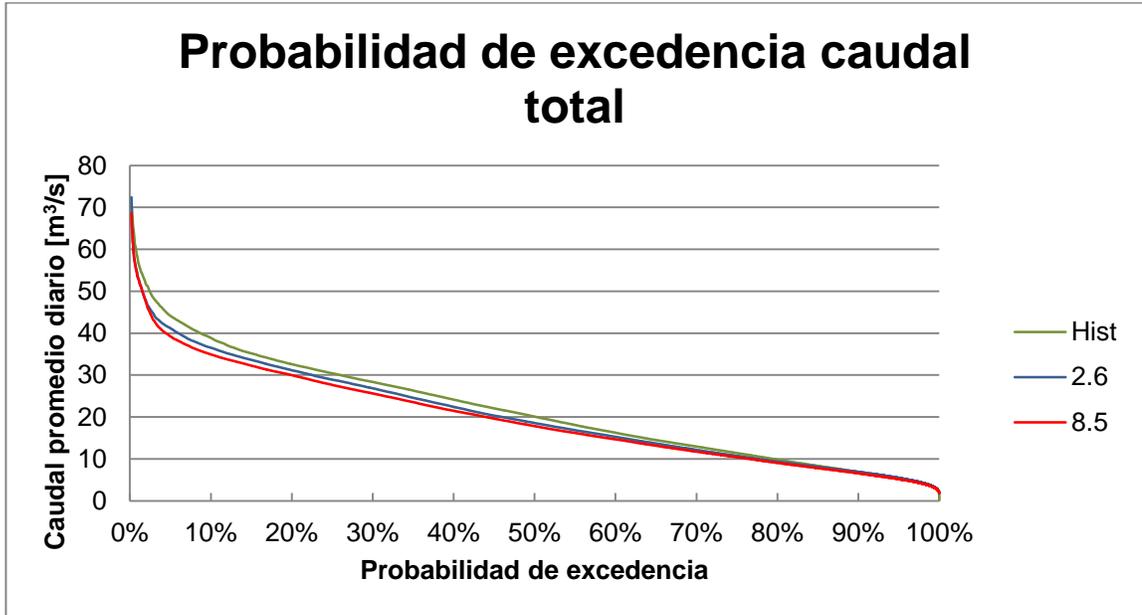


Figura 6-21: Probabilidad de excedencia caudal total

En resumen, como se observa en la Figura 6-22, se obtienen variaciones prácticamente nulas en el caudal total anual para el escenario más conservador, por el contrario el escenario RCP8.5 muestra una diferencia total anual cercana a $-0.6 \text{ [m}^3/\text{s]}$. El mayor aporte de las variaciones antes mencionadas corresponden al aporte glaciar cuyo descenso es independiente del escenario analizado y cercano a $-0.3 \text{ [m}^3/\text{s]}$, explicado por la desaparición de los glaciares de la cuenca del estero Puquios que ocurre en la mitad del periodo de 2045-2075.

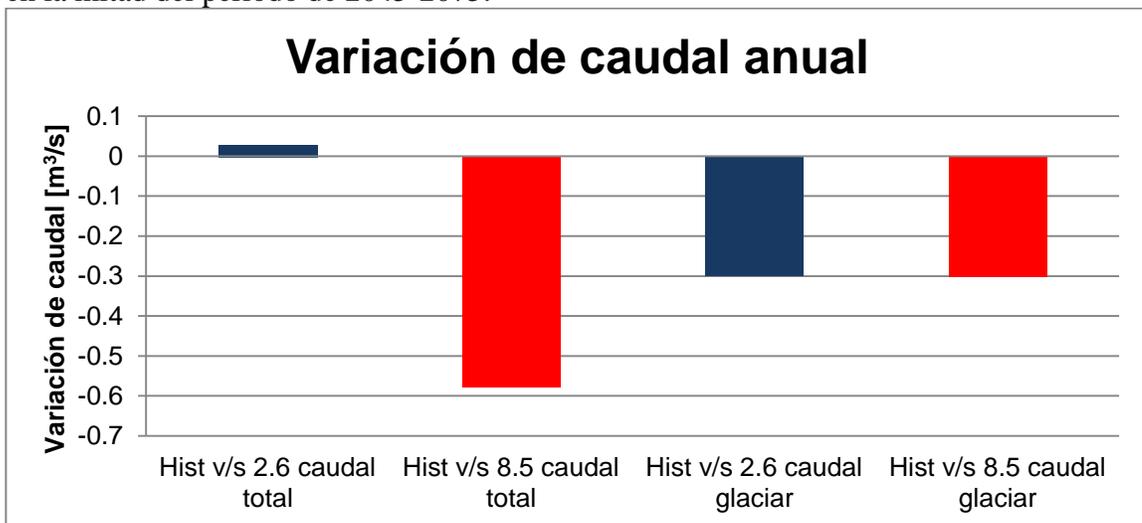


Figura 6-22: Variación anual del caudal total y glaciar.

7 CONCLUSIONES

7.1 Conclusión

Luego de exponer los resultados del trabajo de tesis es posible realizar las siguientes conclusiones:

La modelación de la cuenca de pangal resulto exitosa, y por lo tanto el método que se utilizó para el gradiente de precipitaciones resolvió el problema de la acumulación de nieve en las bandas altas que WEAP no incorpora, simulando el transporte gravitacional de nieve. Por lo demás se corroboró la calibración con la fracción de nieve de la cuenca, resultando una correlación cuadrática de 0.66 para la cuenca de Paredones, hecho de relativa importancia al tratarse de una cuenca nival.

La integración e implementación del módulo de glaciares al programa WEAP resulto acorde a lo esperado, la metodología utilizada si bien utiliza datos que no son propios de los glaciares de la zona, logró su objetivo, es decir modelar la evolución de los glaciares y su aporte al caudal de la cuenca.

La elección del modelo de cambio climático Mk3.6 resulto estar acorde a lo esperado según la literatura, con un aumento en la temperatura cercana a 1°C en promedio y con variaciones máximas de 3.5°C, y un descenso en las precipitaciones en un 6% anual promedio de los dos escenarios, con valores extremos de -10% en el periodo de mayor precipitación.

Los resultados de cobertura nival para el periodo 2045-2075 disminuye producto de la acción conjunta de las dos variables climáticas antes mencionadas; el aumento de la temperatura eleva la isoterma cero, y el descenso en las precipitaciones, disminuye la acumulación de nieve, adelantando la época de deshielos y retrasando la de acumulación.

Los glaciares de la cuenca se ven seriamente afectados, según lo proyectado los glaciares de la cuenca del estero Puquios desaparecen en el año 2061 para el escenario RCP8.5 y 7 años más tarde para el escenario RCP2.6, los demás reducen su área en un 40%.

El régimen hidrológico en términos generales tiende a adelantar su Caudal máximo, esto indistintamente del escenario que se analice, esto se explica por un adelantamiento de la época de deshielos antes explicada. Los meses posteriores al *peak* ven reducido su caudal significativamente. El escenario RCP8.5 presenta una variación anual de -0.6 [m³/s] mientras que el escenario RCP2.6 prácticamente no varía, lo cual se explica por la reducción de precipitaciones un 4% para el escenario RCP2.6 y un 8% para el escenario RCP8.5. El caudal glaciar disminuye 0.3 [m³/s], la mitad de lo que disminuye el caudal del escenario RCP8.5. Este descenso no es producto de la

desaparición de los glaciares de la cuenca del estero Puquios, ya que el volumen aportante es proporcional al área y a la tasa de derretimiento y en ambas representa el valor más bajo.

7.2 Recomendación y comentarios.

Se recomienda mejorar la metodología de calibración del módulo de glaciares, utilizar por ejemplo caudales afluentes para calibrar un glaciar y extrapolar la información a los glaciares del sector.

Utilizar varios modelos de cambio climáticos para reducir la incertidumbre de las proyecciones.

Los glaciares y casquetes polares que son la principal fuente de agua dulce del mundo y Chile posee gran parte de ellos, son fuentes de recarga de ríos y napas subterráneas, en zonas áridas llegan a cubrir el 100% en verano y en sequías. Parece ilógico que no exista mayor financiamientos para la investigación que se traduzcan en monitoreo y estudios más acabados para conocer el panorama nacional actual y futuro de este bien, ni siquiera el código de aguas incluye su protección quedando en un vacío legal.

8 BIBLIOGRAFÍA

Ahumada, F., (2012). Impacto del calentamiento global en zonas de inundación de la Isla de Maipo, Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Cortés G., 2010, Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la esorrentía de deshielo en el río Juncal, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

CONAMA, 2007, Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Santiago, Chile, Efectuado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

Figuroa R., 2008, Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca – Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería.

Gómez, T., (2013). Evaluación del impacto del cambio climático en centrales hidroeléctricas de la cuenca del alto Cachapoal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Herrero, Javier (2007). Modelo físico de acumulación y fusión de la nieve, Tesis para la obtención del título de doctor por las Universidades de Granada, Córdoba y Málaga. Granada.

IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático), 2013, Quinto informe de evaluación del Cambio Climático, <https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf>.

Lagos, M., (2012). Impacto del cambio climático en eventos extremos y análisis de la vulnerabilidad de algunas obras hidráulicas en Chile. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico Ingeniero Civil

Fernández, Andrés (2010). Modelación del balance de masa del glaciar 15^a del volcán Antisana usando el software WEAP. Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J.A., Rivera, A., and J. Barichivich. (2009) Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 281, 334-344.

Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delayque, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436

Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C. & Lange, H. (2000): "Variaciones recientes de glaciares en Chile" *Revista Investigaciones geográficas*, 34: 25-52.

Vergara, Walter; Deeb, Alejandro; Leino, Irene; Kitoh, Akio ; Kitoh, Akio; Escobar, Marisa (2011). Assessment of the impacts of climate change on Development of a methodology through a case study in the Andes of Peru, A World Bank Study. *mountain hydrology*,

Schaefli, B.: Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources : Application to a glacier-fed hydropower production system in the Swiss Alps, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland. Available at [http://library.epfl.ch/theses.](http://library.epfl.ch/theses/), 209 pp., 2005.

ANEXO A: INFORMACIÓN DE LA CUENCA DE PANGAL

(Extracto del trabajo de título de Gómez, 2013)

GEOLOGÍA Y RELIEVE

Dada la ubicación en el sector cordillerano del área de estudio, se observan valores de elevación relativamente altos, así como también otros bajos lo que se traduce en grandes desniveles y pendientes elevadas. Esta propiedad de la cuenca la determina fuertemente ya que al considerar la gran variación que se presenta entre las alturas incide directamente en la validez y representatividad de los datos que se tienen desde algunas estaciones meteorológicas, en variables como por ejemplo la temperatura, o potenciales efectos sobre las precipitaciones, la cual puede precipitar como nieve en valores altos de altura o bien generar una componente de precipitación orográfica.

Sobre la geología de la región en estudio, ésta se puede observar en detalle para toda la región en la Figura A-1. En particular, del área de estudio se puede comentar lo siguiente:

- a. Sobre los depósitos cuaternarios, se pueden observar la presencia de los del tipo morrénicos exclusivamente en el sector cordillerano, a lo largo de los cauces de los ríos.
- b. Sobre las rocas intrusitas, se observa que las presentes en el área de estudio corresponden a un grupo post Paleozoico. Se trata principalmente de granodioritas de granos finos y con poca alteración. Debido a que cortan la Formación Farellones, su edad es post Mioceno.
- c. Sobre la estructuras geológicas detectadas en la cordillera, se reconocen tres unidades separadas por discordancias (que reúne a las unidades del Jurásico medio al Cretácico medio) aparece separada de la segunda unidad. La segunda unidad (Formación Coya Machalí) se encuentra frecuentemente cortada por fallas inversas con poco desplazamiento. La última unidad corresponde a la Formación Farellones y se caracteriza por plegamientos de gran amplitud.

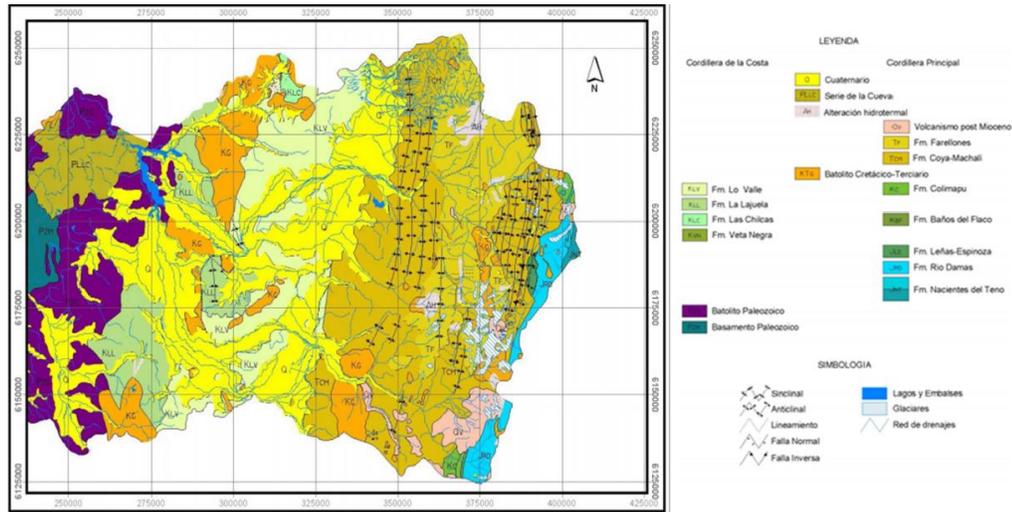


Figura A.1: Geología de los ríos Cachapoal y Tinguirirca Fuente: DGA, 2005.

Clima

En la VI región es posible encontrar una diversidad de climas dependiendo del sector geográfico en el que uno se encuentre, variando este según su posición con respecto a la costa, la depresión intermedia o la cordillera. En este caso y considerando las condiciones de geología y relieve mencionadas anteriormente se observa un clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses. En el sector cordillerano de la Región, por sobre los 800 m, el ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima, ya que las temperaturas medias en el invierno se aproximan a 0° y las precipitaciones invernales se hacen sólidas, al mismo tiempo que aumentan a cerca de 1.000 mm anuales, acortándose así la duración de la estación seca a sólo 4 a 5 meses con precipitación inferior a 40 mm. Las temperaturas medias son del orden de 4° C más bajas que en el valle y la diferencia entre el mes más cálido y el más frío también descende a unos 11°C.

Uso del Suelo

Según la información proporcionada por la literatura, el área de estudio de ambas cuencas corresponde a suelos que no presentan una variación de su estado natural y que no se encuentran habitadas ni modificadas debido a actividades agropecuarias. Los usos de suelo presentes en la cuenca corresponden principalmente a áreas sin vegetación, nieves y glaciares y en un porcentaje menor, en general cercano a los valles por donde fluyen los ríos, praderas y matorrales, tal como se observa en la Figura 3-3.

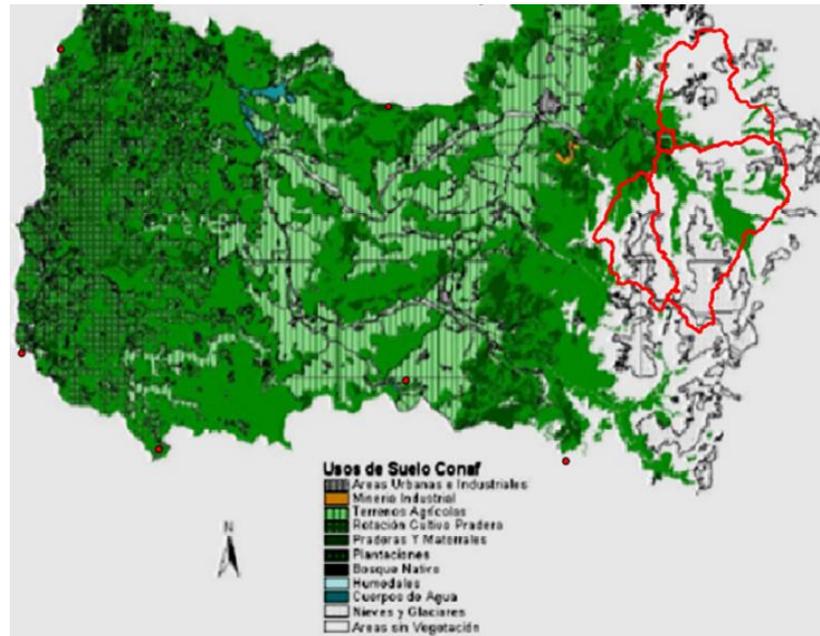


Figura A.2: Uso de suelo de la VI Región. Fuente DNP (2006).

ANEXO B: MODELACION WEAP

(extracto Tesis Gomez,2013)

El modelo a utilizar en este trabajo, WEAP, corresponde a un modelo simbólico, ya que utiliza ecuaciones para simular los procesos asociados, lo que a su vez lo clasifica dentro de los modelos matemáticos. Además, corresponde a un modelo conceptual ya que utiliza simplificaciones de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico, no lineal, no variable en el tiempo ya que asume una condición invariante de la cuenca durante los años, semidistribuido ya que distribuye de forma discreta las variables observadas y finalmente determinístico ya que las ecuaciones no consideran procesos estocásticos para calcular las variables hidrológicas de la cuenca.

Dentro de los modelos que se han utilizado en Chile para simular procesos hidrológicos destaca este modelo, el cual se ha utilizado en diversas ocasiones debido a su simpleza y buenos resultados para simular escenarios de cambio climático [Mena, 2009; Mardones, 2009; Cortés,2010; Lagos y Vargas, 2009].

El software de modelación hidrológica WEAP – Water Evaluation And Planning – es una iniciativa desarrollada por el Stockholm Environment Institute, cuyo objetivo es ser una herramienta de ayuda para la modelación, planificación, evaluación y simulación de la gestión de recursos hídricos. Provee un marco de trabajo amigable al usuario, flexible y de modelación para la gestión de recursos hídricos [SEI, 2012]. En este trabajo se explota principalmente la faceta que permite la modelación hidrológica.

El programa WEAP permite la modelación de una cuenca al representar ésta en función de diversas posibles subdivisiones de ella a elección, como puede ser en unidades de subcuencas por punto de interés o bandas de elevación. En cada una de estas subdivisiones, cuya elección se determina en función de los requerimientos y necesidades de la modelación, se ingresan variables meteorológicas tales como temperatura, precipitación, radiación solar, entre otras, con los cuales el programa desarrolla una estimación de los caudales de la cuenca modelada.

Como se señaló anteriormente, el programa WEAP utiliza un modelo semi-conceptual para la evaluación de los procesos que ocurren al interior de la cuenca, ofreciendo tres metodologías diferentes, según sea el objetivo que se tiene:

- i. Precipitación/Escurrimiento
- ii. Demandas de riego
- iii. Humedad del suelo

El primer método, precipitación/escurrimiento, resulta una buena aproximación en algunos casos donde el estudio no busca una mayor profundidad y no se consideran demasiados

factores, pero carece de la profundidad necesaria para el tipo de análisis que se quiere desarrollar en este trabajo.

El segundo método, demandas de riego, tiene un enfoque centrado en las actividades agrícolas, por lo que tampoco es considerado adecuado, dado el enfoque final que considera este trabajo.

El tercer método nombrado, humedad del suelo, es la opción de modelo semi-conceptual más completo de los nombrados y representa una buena alternativa al momento de simular los procesos hidrológicos de la cuenca en estudio, al representar adecuadamente todos los fenómenos que es posible observar en el ciclo hidrológico y las distintas fases que puede adoptar el recurso hídrico, por medio de ecuaciones simplificadas de los procesos físicos involucrados.

El método de humedad del suelo representa cada una de las captaciones definidas por el usuario como un modelo de dos “estanques” que presentan interacciones entre ellos según el esquema de la Figura B.1. Esquema de las variables del método de humedad del suelo Fuente: weap user manual, modificado para este trabajo. Figura B.1.

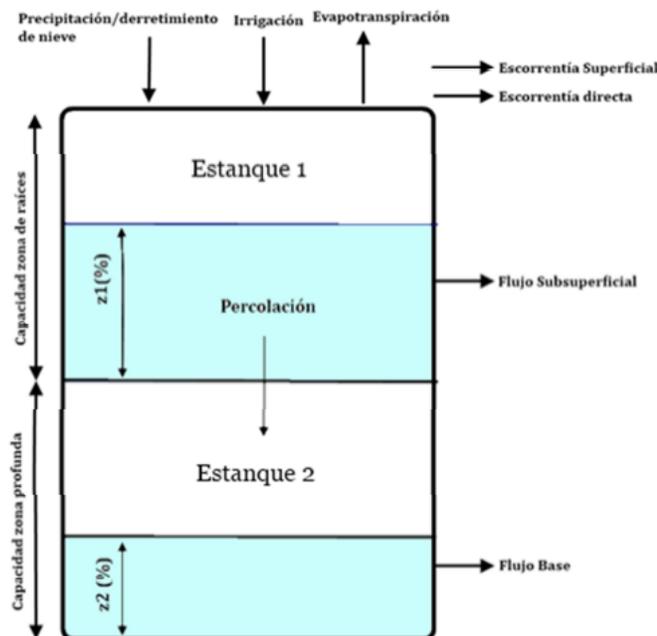


Figura B.1: Esquema de las variables del método de humedad del suelo. Fuente WEAP user Manual modificado para el trabajo de tesis.

Las ecuaciones específicas que rigen los procesos se pueden ver en el anexo A. Estas ecuaciones son aplicadas a cada una de las captaciones usando como datos de entrada la información meteorológica. Como resultado se obtiene un valor de caudal proveniente de esa captación. Dependiendo de la definición de las captaciones, estos caudales podrían ser utilizados directamente (por ejemplo en el caso de que una captación representara una cuenca por sí sola) o bien requerir de algún tipo de agregación al ser necesario integrar varias series de caudales de diferentes captaciones (como por ejemplo en el caso de que una cuenca se modelara según bandas de elevación) para representar adecuadamente una cuenca.

Se presenta en la Tabla B.1 la definición de cada una de las variables involucradas en los procesos de cálculo de los algoritmos del programa. De estas variables, solo la información de área y los valores iniciales de z_1 y z_2 no deben ser calibrados: en el caso de la primera variable corresponde a información definida por la delimitación de la cuenca mientras que para las otras su valor inicial no influye en el proceso de calibración después de un cierto lapso de tiempo, por lo que al considerar un periodo de “warm up” del modelo sus valores pueden quedar exentos de calibración (no obstante, intentar asignarles valores cercanos a los que se tienen en una condición de equilibrio puede ser una ayuda para el proceso de calibración).

Tabla B.1: Parámetros del método de humedad del suelo

Parámetro	Traducción	Unidad	Descripción
Area	Área	m ² o km ²	Área de cada captación definida.
Crop coefficient	Coefficiente de cultivo	-	Coefficiente de cultivo utilizado por la FAO para calcular evapotranspiración.
Soil Water Capacity	Capacidad de la capa superior de suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la primera capa de suelo.
Deep Water Capacity	Capacidad de la capa inferior de suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la capa profunda de suelo.
Runoff Resistance Factor	Factor de resistencia a la escorrentía	-	Parámetro que controla la magnitud de escorrentía directa.
Root Zone Conductivity	Conductividad de la capa superior de suelo	mm/mes o mm/día	Conductividad hidráulica de la primera capa de suelo.
Deep Conductivity	Conductividad de la capa inferior de suelo	mm/mes o mm/día	Conductividad hidráulica de la capa de suelo profunda.
Preferred Flow Direction	Dirección preferida de flujo	%	Factor que divide flujo entre las capas.
Initial Z1	Z1 inicial	%	Porcentaje de humedad inicial de la capa superior de suelo.
Initial Z2	Z2 inicial	%	Porcentaje de humedad inicial de la capa inferior de suelo.

Evidentemente, para que el modelo simule caudales se requiere cierta información meteorológica y geográfica. Se muestra en la Tabla B.2 el conjunto de valores específicos requeridos por el modelo. La escala temporal de la información definirá en que frecuencia se entreguen los resultados: información diaria entregara una simulación de caudales a nivel diario; una mensual entregará los caudales promedios de un mes y así sucesivamente.

Tabla B.2: Parámetros meteorológicos y climatológicos del WEAP

Parámetro	Traducción	Unidad	Descripción
Precipitation	Precipitación	mm/mes	Precipitación que cae sobre cada área
Temperature	Temperatura	mm/día	Temperatura media registrada en cada área.
Humidity	Humedad Relativa	%	Humedad relativa registrada en cada área.
Wind	Viento	m/s	Velocidad media del viento registrada en cada área
Cloudiness fraction	Fracción cubierta por nubes	%	Fracción del cielo cubierto en cada área
Rnet	Radiación neta incidente	W/m ²	Radiación incidente adicional
Latitude	Latitud	°	Latitud de la zona en estudio
Initial Snow	Nieve inicial	mm equivalente en agua	Nieve inicial observada en cada área.
Melting Point Td	Temperatura de derretimiento	°C	Temperatura de derretimiento para el método grado día (mes) del modelo
Freezing Point Ts	Temperatura de congelación	°C	Temperatura de congelación para el método grado día (mes) del modelo

De esta información, hay alguna que debe ser agregada como parte del proceso de calibración.

Estas variables corresponden a las siguientes: Melting Point, Freezing Point y Rnet. En particular, esta última variable será modelada con una distribución sinusoidal a lo largo del año, a través de una ecuación de la forma señalada en la Ecuación B.1:

$$R_{net} = R_{base} + R_{var} * \cos(t) \quad (B-1)$$

Donde R_{base} es el valor promedio de radiación incidente, R_{var} es la amplitud de la variación de radiación y el tiempo t corresponde al día en que se está aplicando la radiación, ajustado de tal forma que es consecuente con los periodos estacionales.

La cantidad de nieve inicial puede suponerse como cero al definir como comienzo del proceso de calibración el inicio de cada año hidrológico. Todo el resto de las variables que se encuentran en la Tabla B.2 no nombradas anteriormente corresponden a información que debe ser entregada como datos de entrada para obtener la serie de caudales como resultado.