



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

EVALUACIÓN DE PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS PARA LA
MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL MANTO NIVAL, EN ESTACIÓN VALLE
NEVADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

FERNANDA JAVIERA GÓMEZ VICUÑA

PROFESOR GUÍA:
JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA
PABLO MENDOZA ZUÑIGA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil
POR: Fernanda Javiera Gómez Vicuña
FECHA: Octubre 2019
PROFESOR GUÍA: James McPhee Torres

EVALUACIÓN DE PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL MANTO NIVAL, EN ESTACIÓN VALLE NEVADO

Los procesos físicos que ocurren en alta montaña y que forman parte del ciclo hidrológico, involucran transporte, sublimación, acumulación y derretimiento de nieve, los que se pueden predecir para conocer la disponibilidad de recursos hídricos en temporadas de interés. En la zona central de Chile, la mayor cantidad del agua presente en ríos proviene de la Cordillera, los que poseen régimen nivo-pluvial, permitiendo que en épocas secas presenten caudal, debido al almacenamiento de nieve.

En este trabajo, se estudia el comportamiento de pronósticos meteorológicos, específicamente *Global Forecast System* (GFS), mediante su evaluación y posterior corrección, utilizando datos registrados en la estación meteorológica y nivométrica Valle Nevado, la que pertenece al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Para la corrección de pronósticos meteorológicos se utiliza un método estadístico de corrección de sesgo, *Quantile Mapping* (QM), con el que solo en el caso de la precipitación acumulada se logra determinar una correlación entre el sesgo y cada horizonte de tiempo. Luego, se procede a realizar modelaciones puntuales en la zona donde se emplaza la estación Valle Nevado, utilizando el modelo *Cold Regions Hydrological Model* (CRHM) para evaluar el *Snow Water Equivalent* (SWE) al emplear forzantes registradas directamente en la estación y las predichas por el pronóstico meteorológico. En el primer caso, al comparar el SWE registrado por el instrumento SnowScale se obtiene una correlación que se refleja en un porcentaje de sesgo igual a 1,5%, por lo que el modelo simula correctamente esta variable, en el período de validación, Julio y Agosto.

Al comparar las simulaciones con las forzantes de interés se obtiene que al utilizar variables corregidas de pronósticos con condición inicial cada semana proveniente de la simulación con observaciones, la relación con el SWE modelado con valores registrados en la estación presenta un R^2 de 0,87, mientras que sin aplicar condiciones iniciales se obtiene un R^2 igual a 0,69. Sin embargo, el derretimiento presenta una correlación bastante baja en ambos casos.

Para trabajos futuros, se recomienda realizar este análisis en una cuenca y no de forma puntual, además intentar realizar el análisis con otra metodología de corrección de sesgo para los pronósticos meteorológicos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por apoyarme en este largo proceso y en todas las cosas que me he propuesto. Como parte de mi familia, también quiero agradecer a mi gata Matilde por acompañarme durante estos últimos 15 años, espero que sean muchos más. Gracias por estar conmigo cada noche de estudio y estar a mi lado cuando lo necesito.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros que estuvieron presentes en mi etapa universitaria, tanto en plan común, como en civil. En primer lugar, a mi grupo de siempre: Alonso, Javier, Oscar, Vicho, Vicho vegano, Mauro y Nico. Gracias por ayudarme cuando en primer año no entendía nada y por todos los buenos momentos que vinieron después, las salidas a comer pizza que tanto le gustan al Javier, las idas a la piscina con el Oscar y tantas otras cosas. También quiero agradecer a mis amigos hidráulicos: Paula, Darío, Felipe y a los de la oficina 340, como la Fabi y el Edu, por acogerme en los momentos en que me aburría de estar sola en mi oficina. Gracias por la comida, el tecito y la compañía. Quería destacar al Felipe, me alegra mucho haberte conocido esa primera clase de Topografía al hacer los grupos. Gracias por tus consejos, ayuda y amistad. También, quiero destacar al Alonso, que forma parte de todos mis grupos de amigos de la u y que ha estado presente en todos los momentos difíciles a lo largo de la carrera, ayudándome a pesar de todo. Agradezco también a tantas personas que han sido parte de mi vida estos años, acompañándome con sus conversaciones y dándome ánimo, como el Ian y el Matías.

Quiero agradecer a mis amigas del liceo, la Cata y la Camila, ya que a pesar que no nos vemos tan seguido, siempre es agradable verlas y darnos cuenta lo mucho que hemos crecido desde que nos conocimos al entrar al liceo el 2007.

Finalmente, quiero agradecer a los profesores de la comisión. A mi profesor guía James McPhee, por intentar ayudarme siempre que lo necesité, a pesar de no disponer de mucho tiempo y por enseñarme éste camino de la ingeniería Hidráulica. También, a los profesores Pablo y Miguel, por su gran ayuda y oportunidades brindadas.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Organización del informe	3
Capítulo 2: Revisión bibliográfica	4
2.1 Introducción	4
2.2 Balance de energía.....	5
2.3 Factores que inciden en la variabilidad de SWE.....	7
2.4 Balance de masa	8
2.5 Pronóstico meteorológico	9
2.5.1 Descripción general.....	9
2.5.2 Evaluación y corrección de pronósticos meteorológicos	10
2.5.3 Corrección pronósticos meteorológicos	12
2.6 Cold Regions Hydrological Model (CRHM).....	14
2.6.1 Componentes de CHRM	14
2.6.2 Módulos de CRHM	15
Capítulo 3: Zona de estudio y datos disponibles	16
3.1 Estación Valle Nevado.....	16
3.2 Cuenca experimental Piuquenes	17
3.3 Sistema físico natural.....	18
3.3.1 Topografía.....	18
3.3.2 Geología.....	19
3.3.3 Clima	19
3.3.4 Vegetación	20
3.4 Datos disponibles	21
3.4.1 Datos meteorológicos observados	21
3.4.2 Datos provenientes de pronósticos meteorológicos	22
Capítulo 4: Metodología	24
4.1 Recopilación de información y preparación de datos	24

4.2 Evaluación de pronósticos meteorológicos.....	24
4.3 Corrección simulaciones pronóstico meteorológico.....	25
4.4 Modelación puntual en Valle Nevado	28
4.4.1 Construcción modelo.....	29
Capítulo 5: Resultados	33
5.1 Datos observados de entrada al modelo	33
5.2 Pronósticos meteorológicos.....	36
5.2.1 Evaluación y corrección de forzantes.....	36
5.2.2 Series de datos observados, pronósticos meteorológicos y corregidos	47
5.3 Modelación puntual en Estación Valle Nevado.....	50
5.3.1 Calibración del modelo	50
5.3.2 Modelación del comportamiento del manto nival	53
• Equivalente en Agua de Nieve	53
Capítulo 6: Discusión y conclusiones.....	65
6.1 Discusión	65
6.1.1 Evaluación y corrección de pronósticos meteorológicos	65
6.1.2 Modelo puntual en CRHM	66
6.2 Conclusiones	67
Bibliografía	69
A nexos	72
Anexo A : Funciones de distribución acumuladas de cada forzante.....	72
Anexo B : Evaluación de pronósticos meteorológicos: R^2 y NSE	75
Anexo C : Climogramas utilizando forzantes observadas y de pronóstico meteorológico	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama del ciclo del agua. Fuente: pmm.nasa.gov.....	4
Figura 2.2. Esquema del volumen de control para el cálculo del derretimiento. Fuente: Pomeroy et al. (2007).....	6
Figura 2.3 Grilla GFS de 0.5°. Fuente: www.ncdc.noaa.gov.	10
Figura 2.4 a) PDFs valores simulados y observados, línea continua y discontinua, respectivamente. b) CDFs obtenidas. Fuente: Piani et al. (2010)	13
Figura 3.1 Estación Valle Nevado, abril 2019.....	16
Figura 3.2 Mapa de zona de estudio: Estación Valle Nevado y Cuenca Experimental Piuquenes. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 3.3 Precipitaciones Medias Mensuales en Estación Estero Yerba Loca antes de junta San Francisco.....	20
Figura 3.4 Cuenca experimental Piuquenes, abril y junio 2019.....	21
Figura 4.1 Esquema de balance de energía. Fuente: Marks et al., 1998	29
Figura 4.2 Relación entre módulos utilizados. Elaboración propia con información del diagrama de flujo del modelo	30
Figura 4.3 Esquema de metodología de modelación	32
Figura 5.1 Temperatura del aire registrada en la estación Valle Nevado entre mayo y diciembre de 2018.....	33
Figura 5.2 Precipitación total del aire registrada en la estación Valle Nevado entre mayo y diciembre de 2018	34
Figura 5.3 Humedad Relativa del aire registrada en la estación Valle Nevado entre mayo y diciembre de 2018	35
Figura 5.4 Velocidad de viento del viento construida a partir de los datos de nodos de cuenca Piuquenes entre mayo y diciembre de 2018.....	35
Figura 5.5 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura de GFS	37
Figura 5.6 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura Corregida	37
Figura 5.7 PB en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura de GFS	38
Figura 5.8 PB en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura Corregida.	39
Figura 5.9 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada de GFS	40
Figura 5.10 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada Corregida	40
Figura 5.11 PB en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada de GFS.....	41
Figura 5.12 PB en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada Corregida.....	41
Figura 5.13 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa de GFS.....	42

Figura 5.14 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa Corregida.....	43
Figura 5.15 PB en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa de GFS.....	43
Figura 5.16 PB en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa Corregida.....	44
Figura 5.17 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento de GFS.....	44
Figura 5.18 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento Corregida.....	45
Figura 5.19 PB en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento de GFS.....	45
Figura 5.20 PB en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento Corregida.....	46
Figura 5.21 Temperatura observada, pronosticada con GFS y Corregida	47
Figura 5.22 Precipitación total observada, pronosticada con GFS y Corregida	48
Figura 5.23 Precipitación total acumulada, pronosticada con GFS y corregida	48
Figura 5.24 Humedad Relativa observada, pronosticada con GFS y Corregida	49
Figura 5.25 Velocidad de viento observada, pronosticada con GFS y Corregida	49
Figura 5.26 Resultado calibración modelo utilizando altura del manto nival	51
Figura 5.27 Relación de altura de manto nival observada y simulada	52
Figura 5.28 Validación SWE de simulaciones con forzantes observadas y de pronóstico	53
Figura 5.29 Equivalente en Agua de Nieve temporada completa utilizando CHRMs.....	55
Figura 5.30 Simulaciones de SWE utilizando forzantes observadas y de pronóstico corregidas y no corregidas	56
Figura 5.31 Relación entre SWE simulado con forzantes observadas y de pronósticos aplicando condición inicial semanalmente	57
Figura 5.32 Relación entre SWE simulado con forzantes observadas y de pronósticos.....	57
Figura 5.33 Precipitación líquida acumulada observada y de pronóstico meteorológico.....	58
Figura 5.34 Precipitación sólida acumulada observada y de pronóstico meteorológico.....	59
Figura 5.35 Derretimiento por intervalo simulado con forzantes observadas y de pronóstico.....	60
Figura 5.36 Derretimiento acumulado simulado con forzantes observadas y de pronóstico.....	60
Figura 5.37 Transporte por viento por intervalo simulado con forzantes observadas y de pronóstico.....	61
Figura 5.38 Transporte por viento acumulado simulado con forzantes observadas y de pronóstico.....	62
Figura 5.39 Sublimación por intervalo simulado con forzantes observadas y de pronóstico.....	63
Figura 5.40 Sublimación acumulado simulado con forzantes observadas y de pronóstico	63

Figura A.1 CDFs de temperatura observada y de pronóstico meteorológico	72
Figura A.2 CDFs de precipitación acumulada observada y de pronóstico meteorológico	73
Figura A.3 CDFs de Humedad Relativa observada y de pronóstico meteorológico	73
Figura A.4 CDFs de velocidad de viento observada y de pronóstico meteorológico	74
Figura A.5 Coeficiente de determinación de temperatura de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	75
Figura A.6 Coeficiente de determinación de temperatura de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa	76
Figura A.7 NSE de temperatura de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa.....	76
Figura A.8 NSE de temperatura de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa.....	77
Figura A.9 Coeficiente de determinación de precipitación total acumulada de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	77
Figura A.10 Coeficiente de determinación de precipitación total acumulada corregida de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	78
Figura A.11 NSE de precipitación total acumulada de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	78
Figura A.12 NSE de precipitación total acumulada de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa	79
Figura A.13 Coeficiente de determinación de Humedad Relativa de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	79
Figura A.14 Coeficiente de determinación de Humedad Relativa corregida de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	80
Figura A.15 NSE de Humedad Relativa de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa.....	80
Figura A.16 NSE de Humedad Relativa de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa	81
Figura A.17 Coeficiente de determinación de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa	81
Figura A.18 Coeficiente de determinación de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa	82
Figura A.19 NSE de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa.....	82
Figura A.20 NSE de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa.....	83
Figura A.21 Precipitación y temperatura registradas en estación Valle Nevado	84
Figura A.22 Precipitación y temperatura de pronóstico meteorológico GFS corregido ..	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Equipos estación Valle Nevado. Fuente: Comte (2017)	17
Tabla 3.2 Altitud de nodos cuenca Piuquenes y estación Valle Nevado	22
Tabla 3.3 Opciones para forzantes meteorológicas de GFS: Fuente: Adaptado desde https://rda.ucar.edu/	23
Tabla 5.1 Parámetros de la modelación	50
Tabla 5.2 Métricas de evaluación para comportamiento del modelo utilizando altura de nieve.....	52
Tabla 5.3 Coeficiente R ² y RMSE, Validación SWE obtenido de forzantes observadas y pronóstico.....	54
Tabla 5.4 Resumen Balance de masa en estación Valle Nevado	64

Capítulo 1: Introducción

La acumulación de nieve que se forma en la cordillera de los Andes, junto a los glaciares, son una de las principales fuentes de agua para los ríos de gran parte del país. Este recurso posee diversos usos, como hidroeléctrico, consumo de agua potable, riego, entre otros. Por lo tanto, estudiar los flujos que provienen de la acumulación de nieve y las variables que influyen en este proceso, como precipitación, densidad y altura del manto nival es de gran relevancia, tanto para el campo científico, como para la sociedad, debido a la relevancia del agua de deshielo en el ciclo del agua, como se señala en USGS, 2019.

La motivación de este trabajo de título consiste en indagar nuevas metodologías para obtener el Equivalente en Agua de Nieve de forma indirecta. De esta forma, se podría conocer esta propiedad de manera oportuna en regiones extensas e inaccesibles, sin necesidad de realizar campañas a terreno y así, disminuir los recursos operacionales, permitiendo la mejora en toma de decisiones que involucran recursos hídricos y poseer una visión amplia sobre la condición actual.

Para lograr obtener estimaciones de SWE y balances de masa y energía, es posible utilizar modelos hidrológicos. En este caso se emplea *Cold Regions Hydrological Model* (CRHM); Pomeroy et al. (2007). Este modelo requiere el ingreso de parámetros que caracterizan la zona de estudio y variables meteorológicas provenientes de observaciones registradas en estaciones, pronósticos meteorológicos, entre otros. Entre las forzantes meteorológicas necesarias, se encuentra la precipitación. Como se menciona en Mabel et al. (2014), determinar el comportamiento de esta variable es bastante complejo, más aún en zonas con topografía irregular, como sucede en la cordillera de los Andes.

Las variables provenientes de pronósticos meteorológicos poseen valores inciertos, ya que las condiciones iniciales, como la representación computacional de las ecuaciones son imprecisas. Una de las causas de la incertidumbre presente en los pronósticos corresponde a que la atmósfera es un sistema dinámico, por lo que tiene una previsibilidad limitada, según Morss et al. (2008).

En este caso, se pretende evaluar la posibilidad de obtener el Equivalente en Agua de Nieve (SWE, por sus siglas en inglés), utilizando pronósticos meteorológicos, realizando correcciones en estas variables con datos que se registran en la Estación Valle Nevado y en el caso particular del viento, nodos ubicados en la cuenca experimental Piuquenes. La estación meteorológica y nivométrica perteneciente a la Universidad de Chile, emplazada en el centro de ski Valle Nevado registra precipitación, velocidad de viento, humedad relativa, temperatura, entre otros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta memoria consiste en evaluar el comportamiento de pronósticos meteorológicos utilizando datos de profundidad de nieve y pluviometría, medidos en la estación meteorológica ubicada en Valle Nevado, en la temporada de mayo a diciembre de 2018, con el fin de obtener el Equivalente en Agua de Nieve (SWE, por sus siglas en inglés) mediante el uso del modelo *Cold Regions Hydrological Model* (CRHM).

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se desarrollan además los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la forma en que se pueden aplicar utilizar datos provenientes de pronósticos meteorológicos en una zona específica.
- Evaluar y corregir el error asociado a los pronósticos meteorológicos mediante la comparación con datos que se registran con los instrumentos que posee la estación Valle Nevado, durante el período de mayo a diciembre de 2018.
- Analizar resultados de SWE que se obtienen en la modelación con CHRM, incorporando las variables corregidas de pronósticos meteorológicos.

1.2 Organización del informe

En el Capítulo 2 del informe se presenta una revisión bibliográfica con los temas que se enmarcan en el trabajo de título, como balance de energía y masa en el manto nival, pronósticos meteorológicos, su evaluación y posterior corrección y el modelo que se utiliza, el que corresponde a *Cold Regions Hydrological Model (CRHM)*.

En el Capítulo 3 se presenta la ubicación de la zona de estudio y algunas de sus características, como clima, topografía, geología y vegetación.

En el Capítulo 4 se describe la metodología que se utiliza para recopilación de datos observados en la estación Valle Nevado y los provenientes de pronósticos meteorológicos, su evaluación y corrección. También se presenta la forma de realizar la modelación puntual utilizando CRHM.

En el Capítulo 5 presenta los resultados que se obtienen para la evaluación de las forzantes obtenidas de pronósticos y su posterior evaluación. También, se muestran los resultados de la modelación puntual y el sesgo que se tiene al comparar con el mismo proceso realizado con forzantes observadas en la estación Valle Nevado.

En el Capítulo 6 se realiza la discusión de los resultados que se obtienen, destacando los aspectos de mayor importancia y su explicación. Además, se presentan las conclusiones finales.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

2.1 Introducción

Comprender la hidrología de nieve es fundamental para el entendimiento del ciclo hidrológico, por lo que poseer un modelo con el que se obtenga una representación precisa del manto nival y de transferencia de energía ayuda a la comprensión de los flujos y los procesos involucrados; Marshall et al. (1993).

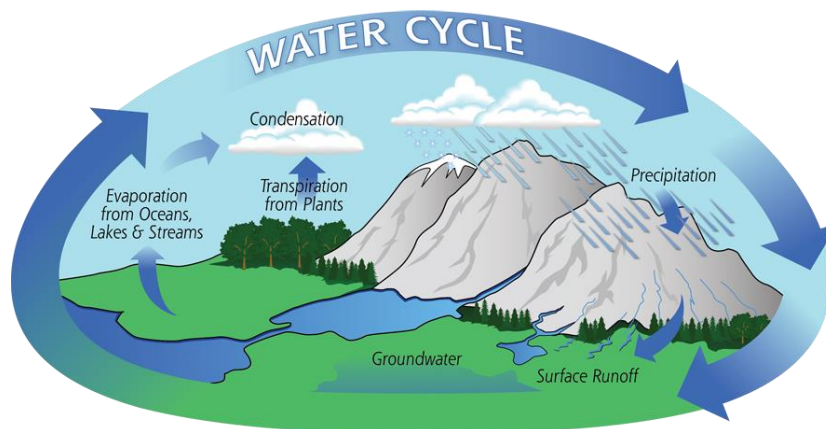


Figura 2.1 Diagrama del ciclo del agua. Fuente: pmm.nasa.gov.

En la Figura 2.1, se observa el ciclo del agua con sus diferentes fases y procesos, entre ellos, la precipitación, variable que se estudia en profundidad en este trabajo de título y que es una de las principales fuentes de incertidumbre, debido a su relación con la topografía del terreno y diversas características, como por ejemplo, elevación; Mabel et al. (2014).

En el estudio de la Hidrología de nieve, una de las variables que se estudia es el *Snow Water Equivalent* (SWE). Como se señala en Jonas et al. (2009), es posible estimar el SWE con valores observados de densidad y altura del manto nival, los que se obtienen con diversos métodos, entre ellos, calicatas y mediciones de estaciones meteorológicas.

El objetivo principal de este capítulo es presentar todos los elementos necesarios para comprender la metodología y los alcances del estudio que se realiza, considerando las variables involucradas y estudios anteriores. Los tópicos principales corresponden a la naturaleza de pronósticos meteorológicos y la manera en que se puede corregir los valores que se obtienen, balance de energía en el manto nival y funcionamiento de *Cold Regions Hydrological Model* (CRHM). Además, se analiza diversas metodologías que se realizan en otras investigaciones para resolver problemas similares.

2.2 Balance de energía

La fusión de nieve es la fuente principal de humedad del suelo, recarga de agua subterránea y flujo de agua en regiones montañosas. La información sobre el tiempo, magnitud y área de fusión en condiciones climáticas variables es necesaria para una gestión exitosa del agua (Marks et al., 1999).

El derretimiento de nieve implica un cambio de fase de sólido a líquido (Pomeroy et al., 2007). La ecuación que representa este fenómeno se aplica a un volumen de control de la nieve, el que posee como límite inferior la interfaz tierra-nieve y superior la interfaz nieve-aire.

La ecuación 2.1 presenta la energía que se utiliza para el cambio de fase y los flujos que se transfieren al manto nival por radiación, convección, advección y conducción, lo que es igual a la tasa de cambio de energía interna.

$$Q_m + Q_n + Q_H + Q_E + Q_G + Q_D = \frac{dU}{dt} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde:

$\frac{dU}{dt}$: Tasa de cambio de energía interna del volumen de control $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Q_m : Energía para el derretimiento $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Q_n : Suma de la radiación neta de onda corta y radiación neta de onda larga $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Q_H : Flujo turbulento de calor sensible $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Q_E : Flujo turbulento de calor latente $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Q_G : Flujo de calor hacia el suelo $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Q_D : Energía por advección de fuentes externas $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

El intercambio de energía es fundamental para que el manto libere agua por medio del derretimiento o sublimación, ya que es la fuente de calor necesaria para que ocurran los cambios de fase. A continuación, se presenta un esquema con los flujos que

intervienen en el cálculo del balance de energía en el manto nival, los que se observan en la Ecuación 2.1. T representa la transferencia horizontal de masa y P la precipitación.

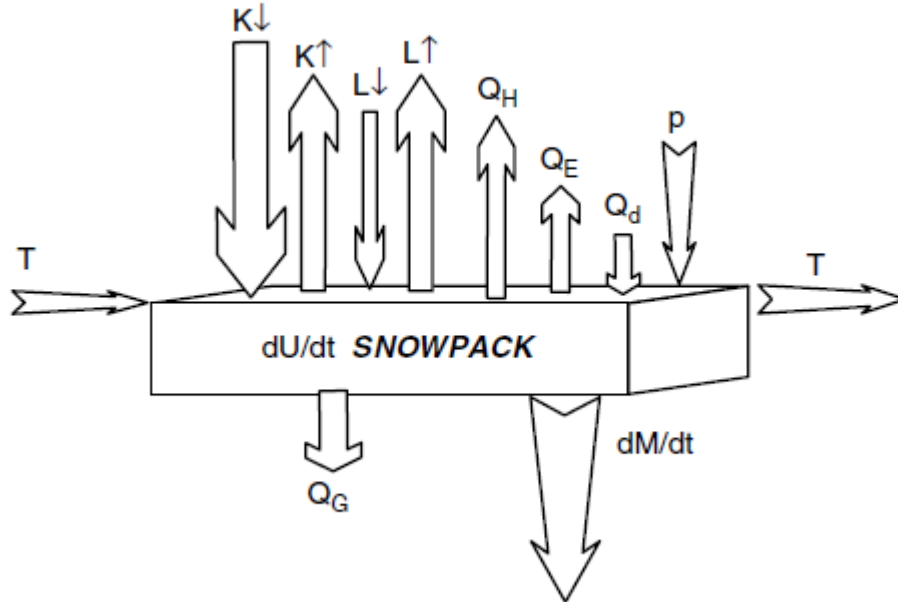


Figura 2.2. Esquema del volumen de control para el cálculo del derretimiento. Fuente: Pomeroy et al. (2007)

La cantidad de masa que se derrite, se obtiene a partir de la Energía de derretimiento Q_m , utilizando la siguiente expresión:

$$M = \frac{Q_m}{\rho_w h_f B} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde:

M : Tasa de derretimiento (m/s)

Q_m : Energía para el derretimiento ($\frac{W}{m^2}$).

ρ_w : Densidad agua, $1000 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

h_f : Calor latente de fusión de hielo, $333.5 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

B : Calidad térmica del manto (-)

2.3 Factores que inciden en la variabilidad de SWE

El concepto de Equivalente en Agua de Nieve o en inglés *Snowpack Water Equivalent* (SWE) representa la altura de lámina de agua generada si un volumen de nieve es derretido, el que se convierte en agua líquida. Se utiliza para determinar el volumen de agua en forma de nieve existente en un área determinada (DeWalle & Rango, 2008). A continuación, se presenta la ecuación característica del SWE.

$$SWE = H \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

H : Altura manto nival (m)

ρ_s :Densidad manto nival $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

ρ_w :Densidad agua, 1000 $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

Las unidades del SWE pueden variar dependiendo del caso, sin embargo, siempre debe expresarse en unidad de longitud. Por otro lado, si se conoce la altura de nieve y la densidad es posible obtener el SWE. En Jonas et al. (2009) se determina que la densidad depende de 4 factores: estación del año, profundidad de la nieve, altitud y ubicación de la zona. Otro de los factores que influye en el equivalente en agua corresponde a la precipitación, la que varía dependiendo del lugar en que ocurre, tanto en distribución como en forma. Además, es importante señalar que es la variable más importante del ciclo hidrológico y su comportamiento es bastante complejo, más aún en zonas con topografía irregular, como se señala en Mabel et al. (2014).

Otro factor que afecta la acumulación de nieve corresponde a la temperatura, ya que para cuencas dominadas por la acumulación sustancial de nieve la elevación de temperatura provoca aumento de la escorrentía en invierno y disminución del máximo Equivalente en agua almacenado como nieve (Hamlet et al., 2005).

El viento es un actor importante en el proceso de acumulación de nieve, ya que como se señala en Winstral et al. (2002); los campos de viento complejos y altamente variables en terrenos accidentados conducen a campos de distribución de nieve con áreas sin nieve adyacentes a áreas de acumulación profunda. Sin embargo, a causa de

la dificultad que presenta incluir estos efectos se desarrollan parámetros basados en el terreno para representar esta problemática y así, modelar la distribución de nieve. En CRHM se asume que la nieve se distribuye uniformemente en cada intervalo del día a causa del viento.

La variabilidad espacial a escala de la cuenca hidrográfica está determinada por la variabilidad en los campos meteorológicos cercanos a la superficie y, siempre que se disponga de datos meteorológicos adecuados, se pueden resolver explícitamente mediante interpolación/extrapolación espacial, en este caso pronósticos meteorológicos. Por otro lado, la variabilidad espacial de SWE a escala de laderas se rige por procesos como la deriva (drifting), desprendimiento de nieve en pendientes pronunciadas, captura de nieve por los arbustos y descarga no uniforme de nieve por el dosel del bosque, que son más difíciles de resolver explícitamente, Clark et al. (2011).

2.4 Balance de masa

El balance de masa en el manto nival, permite obtener la variación temporal de SWE, tanto en época de acumulación, como de ablación. En Pomeroy et al. (2007) se presenta un esquema para el cálculo realizar este cálculo, el que se representa de la siguiente manera:

$$\frac{dSWE}{dt}(x) = P - p \left(\nabla F(x) + \frac{\int E_B(x) dx}{x} \right) - E - M \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

P : Tasa de precipitación en forma de nieve $\left(kg \cdot \frac{m^2}{s} \right)$

p : Probabilidad de ocurrencia de transporte de nieve (-)

F : Tasa de transporte por viento $\left(kg \cdot \frac{m^2}{s} \right)$

E : Tasa de sublimación de nieve superficial $\left(kg \cdot \frac{m^2}{s} \right)$

E_B : Tasa de sublimación de nieve transportada $\left(kg \cdot \frac{m^2}{s} \right)$

M : Tasa de derretimiento de nieve transportada $\left(kg \cdot \frac{m^2}{s} \right)$

x : Distancia fetch considerada para el transporte (m)

La cubierta de nieve estacional presente en la Cordillera de los Andes es la principal fuente de agua para el uso humano y de los ecosistemas de la región (Cornwell et al., 2016), por esta razón estudiar el Equivalente en Agua de Nieve es fundamental para comprender los aportes de caudal provenientes del deshielo estacional.

2.5 Pronóstico meteorológico

2.5.1 Descripción general

Para lograr el objetivo propuesto y obtener simulaciones de Equivalente en Agua de Nieve en la zona de estudio de forma actualizada sin registros observados en la estación, se requiere como variable de entrada las precipitaciones, temperatura del aire, velocidad de viento y humedad relativa. Por esta razón, se utilizan pronósticos meteorológicos. Sin embargo, los valores entregados son inciertos, ya que las condiciones iniciales, como la representación computacional de las ecuaciones son imprecisas. Una de las causas de la incertidumbre presente en los pronósticos corresponde a que la atmósfera es un sistema dinámico, por lo que tiene una previsibilidad limitada, según Morss et al. (2008). Además, en Hamill et al. (2006) se indica que en el caso de las precipitaciones, al ser una variable hidrológica correspondiente a un proceso físico que ocurre a escalas por debajo de las resueltas por los modelos, es particularmente propensa a errores.

En este trabajo se utiliza un sistema de pronóstico climático global denominado *Global Forecast System* (GFS), el que posee variables determinísticas, el que es producido por *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). En *National Climatic Center (2018)* se explica que GFS posee diversas variables atmosféricas, entre ellas, la precipitación. Consiste en una grilla que cubre todo el planeta, su resolución es de 28km y varía a 70km por píxel, dependiendo de la resolución temporal, la que puede abarcar predicciones de hasta 16 días. Además, posee 4 modelos acoplados (atmosfera, océano, suelo y hielo marino), los que trabajan juntos para crear imágenes precisas de las condiciones climáticas.

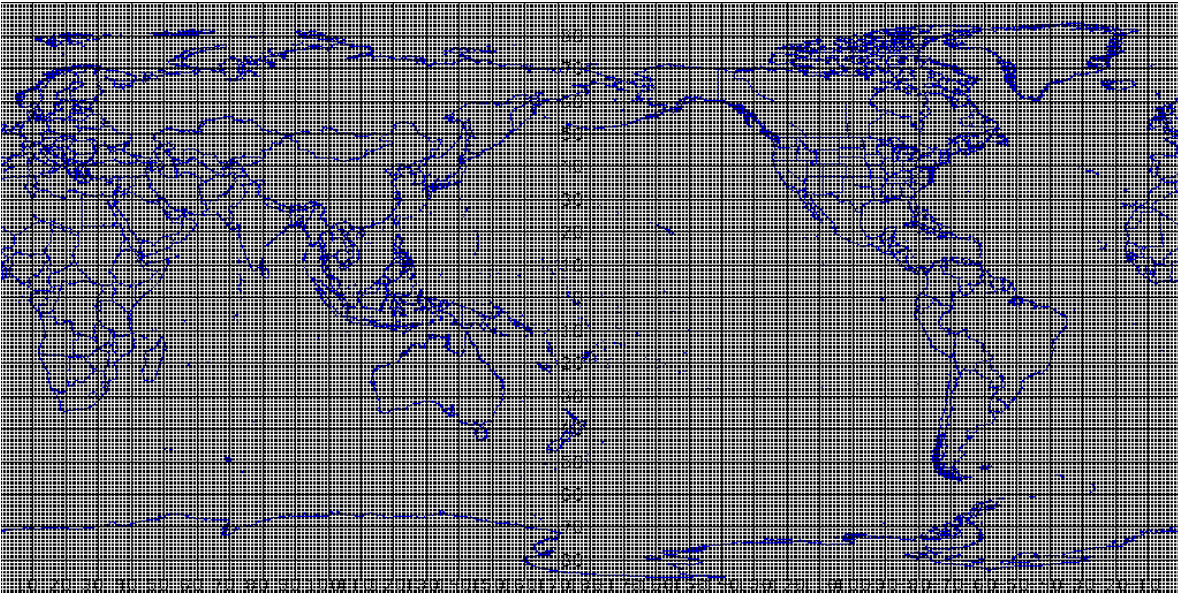


Figura 2.3 Grilla GFS de 0.5°. Fuente: www.ncdc.noaa.gov.

Global Forecast System no es el único sistema de pronóstico climático global. Otro sistema especialmente renombrado es *ECMWF Ensemble Prediction System (EPS)*. En *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2018)* se explica que consta de 51 pronósticos separados realizados por el mismo modelo computacional, todos con el mismo tiempo de inicio. La resolución de EPS es espectral (Mullen & Buizza, 2000). Sin embargo, a diferencia de GFS, no está disponible de forma gratuita a toda la comunidad.

Ambos sistemas poseen similitudes y diferencias. Sin embargo, ECMWF posee mayores habilidades que GFS (Hamill et al., 2007). Al calibrar los dos sistemas, se tiene que en condiciones de bajas precipitaciones el rendimiento es menor que con eventos de mayor magnitud. En las siguientes imágenes se observa que al utilizar los pronósticos sin procesar ECMWF se comporta de mejor manera, situación que se repite al calibrar los sistemas. Los dos sistemas que se mencionan anteriormente son los más utilizados a nivel global. Sin embargo, existen otros como UKMO, GEM, WRF, entre otros.

Los pronósticos meteorológicos pueden ser probabilísticos (conjuntos) o determinísticos. Estos últimos, entregan solo un valor, por lo que en los estudios que trabajan con predicciones, mayoritariamente utilizan pronósticos probabilísticos.

2.5.2 Evaluación y corrección de pronósticos meteorológicos

Predecir condiciones atmosféricas es un proceso que posee diversas fuentes de incertidumbre. Un pronóstico, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2019), corresponde a una estimación, basada en leyes físicas, del estado futuro de la

atmósfera en un lugar y momento determinado. Por otro lado, sesgo, en el campo de la predicción meteorológica, es la diferencia más o menos sistemática entre el valor previsto para una variable y el valor observado.

En Werth & Garrett (2011) se procede a realizar la validación de los tramos horarios utilizando el estadístico RMSE, entre otros, el que se calcula con los datos emitidos por el pronóstico en un tiempo determinado y los valores observados en estaciones meteorológicas.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [s_i - q_i]^2 \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

donde:

s_i :Variable simulada por pronósticos meteorológicos

q_i :Variable observada en estación meteorológica

n : Número de mediciones en cada horizonte de tiempo

Otro indicador que se utiliza es el Porcentaje de sesgo o *Percent bias*. Como se describe en Sharma et al. (2018), PB mide la tendencia promedio de los flujos simulados a ser mayores o menores que sus contrapartes observadas, su valor óptimo es cero, mientras que si es un valor positivo indica sobreestimación del modelo, en cambio, valores negativos apuntan a un sesgo de subestimación del modelo. La forma en que se calcula es la siguiente:

$$PB = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - q_i)}{\sum_{i=1}^n q_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde:

s_i :Variable simulada por pronósticos meteorológicos

q_i :Variable observada en estación meteorológica

n : Número de mediciones en cada horizonte de tiempo

En Van Liew et al. (2005) se indica que para realizar comparaciones se toman 3 rangos de valores en PB. Valores resultantes menores a $\pm 20\%$ se consideran buenos, entre $\pm 20\%$ y $\pm 40\%$ son satisfactorios y los que presentan valores superiores a $\pm 40\%$ son insatisfactorios.

Otra métrica que se define en Nash & Sutcliffe (1970) denominada Nash-Sutcliffe efficiency (NSE). Corresponde a la relación de la varianza residual a la varianza inicial, se utiliza para indicar si es que los flujos simulados se ajustan correctamente a las observaciones. Su rango varía entre infinito negativo a 1, este último es el valor óptimo, mientras que el rango positivo se considera aceptable. Se calcula como se observa a continuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_i)^2} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde:

s_i :Variable simulada por pronósticos meteorológicos

q_i :Variable observada en estación meteorológica

\bar{q}_i :Promedio del flujo observado en estación meteorológica

n : Número de mediciones en cada horizonte de tiempo

Con los resultados que se obtienen de las métricas de evaluación es posible determinar la necesidad de un post procesamiento. En el caso de los pronósticos meteorológicos, debido a las diversas fuentes de incertidumbre, es un proceso indispensable para utilizar los datos.

2.5.3 Corrección pronósticos meteorológicos

Los servicios meteorológicos utilizan *Global Climate Models* (GCM) para obtener perspectivas estacionales de la atmósfera y condiciones atmosféricas, sin embargo, antes de aplicarse suele realizarse un post procesamiento de los pronósticos, Zhao et al. (2017).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el uso de pronósticos meteorológicos para conocer la distribución de Equivalente en Agua, para lo que se realiza una comparación y posterior corrección de pronósticos con valores que se obtienen de registros experimentales en la estación Valle Nevado y cuenca Piuquenes.

Una de las metodologías que se utilizan para realizar este objetivo es la asimilación de datos, la que corresponde al proceso de utilizar datos observados y combinarlos con el modelo que se pretende ejecutar y así, actualizar las variables de estado relevantes que se desean conocer en base a los errores que tienen las salidas del modelo con

respecto a las observaciones (Hreinsson, 2008). De esta forma, es posible mejorar el comportamiento de los modelos corrigiendo las variables involucradas.

Al realizar asimilación de datos es necesario considerar la existencia de diversos tipos de errores, los que pueden afectar el resultado de este proceso. Entre ellos, se encuentran los errores de las observaciones, las que pueden ser de tipo instrumental, muestreo y transformación desde el espacio de observación al espacio de estado del modelo. El otro tipo de errores presentes son los asociados al modelo (Mendoza, 2010). En Blöschl, (1999) se explica que los errores en las mediciones provocan sesgos en los datos, mientras que los errores en los modelos ocasionan sesgos en las predicciones.

Uno de los métodos más utilizados para realizar asimilación de datos corresponde al Filtro de Kalman (Kalman, 1960), sin embargo, existen otras metodologías como interpolación estadística, la que se utiliza en Magnusson et al. (2014).

Otro método para corregir los datos de pronósticos meteorológicos es Quantile Mapping (QM). De acuerdo a la metodología que se describe en Piani et al. (2010), Quantile Mapping es un método estadístico de corrección de sesgo, el que se basa en el supuesto inicial que tanto los datos observados, como los simulados se aproximan a la distribución gamma.

En la Figura 2.4 se observa un ejemplo del procedimiento que se utiliza en QM, donde “x” corresponde al valor simulado e “y” es el dato corregido que se obtiene con el valor de probabilidad de la función de distribución acumulada.

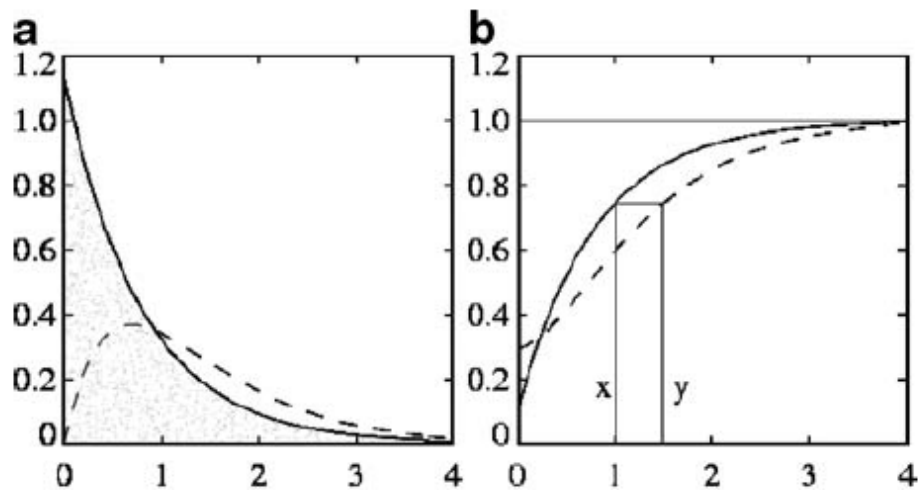


Figura 2.4 a) PDFs valores simulados y observados, línea continua y discontinua, respectivamente. b) CDFs obtenidas. Fuente: Piani et al. (2010)

2.6 Cold Regions Hydrological Model (CRHM)

CRHM es una plataforma desarrollada por el Centro de Hidrología de la Universidad de Saskatchewan, en Canadá. Es un modelo modular que permite representar los procesos hidrológicos de cuencas pequeñas y medianas, utilizando diferentes módulos, los que incorporan algoritmos que permiten simular el ciclo hidrológico de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) (Pomeroy et al., 2007).

Para diversos procesos hidrológicos, hay una variedad de módulos que pueden ser conceptuales o de base física, los que permiten utilizar algoritmos adecuados para los datos disponibles, la confiabilidad de la información, características de la cuenca, escala y objetivo de la modelación (Zhou et al., 2014). El modelo CRHM permite simular procesos característicos de zonas frías, como fusión, acumulación de nieve, infiltración, balance de humedad del suelo, evapotranspiración, balance energético, interceptación vegetal, sublimación, transporte de nieve y seguimiento direccional de flujos superficiales y subterráneos.

CRHM no posee limitaciones para ser utilizado en latitudes y altitudes altas, si es que los módulos seleccionados son adecuados para representar los procesos hidrológicos de la zona de estudio.

2.6.1 Componentes de CHRM

- **Observaciones:** Corresponden a series de tiempo de datos meteorológicos y observaciones de flujo superficial, manto nival y humedad de suelo en diferentes intervalos.
- **Parámetros:** Información espacial, como por ejemplo, área de la cuenca, elevación y cobertura de suelo. Estas características se generan utilizando herramientas GIS, las que permiten delimitar la cuenca, caracterizar y parametrizar cada HRU.
- **Módulos:** Algoritmos que simulan los procesos físicos/hidrológicos que son seleccionados por el usuario. La estructura de datos del modelo se especifica mediante las declaraciones en los módulos, pero se implementa globalmente a través de la plataforma CRHM.
- **Grupos:** Colección de módulos que se ejecutan en secuencia para todas las HRU. Permiten agrupar módulos de acuerdo a una situación hidrológica particular y así, no se especifican individualmente los módulos.
- **Estructura:** Colección paralela de módulos, permiten trabajar las HRU en forma separada. Las estructuras permiten que diversos conjuntos de módulos sean representativos, tanto de una HRU, como de la cuenca.

- **Variables y estados:** Son creados al ser declaradas en los módulos. Las variables incluyen las forzantes meteorológicas como precipitación, temperatura y velocidad de viento. Los estados son condiciones de las HRU como humedad de suelo, Equivalente en Agua de Nieve y albedo.

2.6.2 Módulos de CRHM

Los módulos de CRHM se clasifican en las siguientes categorías, las que poseen procedimientos que pueden ser conceptuales o de base física y así, utilizar los algoritmos apropiados según el objetivo y características de la zona.

- **Cuenca:** Características físicas del suelo y vegetación de las HRUs y cuenca.
- **Observación:** Interpola datos meteorológicos en las HRUs utilizando relaciones adiabáticas y cálculo de presión de vapor de saturación.
- **Transporte de nieve:** Utiliza rutinas de transporte de nieve y sublimación.
- **Intercepción:** Estudios de la intercepción de la precipitación.
- **Radiación:** Selecciona rutinas para algoritmos de onda corta directa y difusa, correcciones de pendiente, disminución del albedo, radiación de onda larga, transmisividad del dosel de árboles y radiación neta.
- **Evaporación:** Incluye rutinas para el cálculo de evapotranspiración como Penman-Monteith, Granger y Pomeroy (1997) y Shuttleworth y Wallace (1985).
- **Derretimiento de nieve:** Introduce modelos para el derretimiento de nieve como *Energy Balance Snowmelt Model*, SNOBAL y otros como radiación neta y el índice de temperatura.
- **Infiltración:** Utiliza una variedad de rutinas de infiltración para suelos congelados, infiltración en suelos no congelados, infiltración y redistribución.
- **Balance de humedad del suelo:** Usa un modelo lineal de 3 capas destinado para realizar balance hídrico en los flujos subsuperficiales y subterráneos. Simula el suelo en zona de recarga, subsuperficial y agua subterránea.
- **Flujo:** Controla los tiempos de desfase y almacenamiento en los distintos flujos, de agua subterránea y caudal superficial, en base a diferentes técnicas de ruteo hidrológico.

Capítulo 3: Zona de estudio y datos disponibles

El lugar en que se realiza el análisis de este trabajo es parte la cuenca Mapocho en los Almendros, la que se ubica en la zona Cordillerana de la Región Metropolitana. Los datos que se emplean se obtienen de la estación Valle Nevado y Nodos ubicados en la cuenca experimental Piuquenes, los que corresponden a estaciones de monitoreo pertenecientes a la Universidad de Chile.

3.1 Estación Valle Nevado

La zona de estudio corresponde al emplazamiento de la estación nivométrica y meteorológica Valle Nevado, operada por el departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Se ubica en los $33^{\circ} 21'$ Sur y $70^{\circ} 14'$ Oeste, su altitud es de 3036 (m.s.n.m) y se emplaza en el centro de ski Valle Nevado. Se encuentra operativa desde el año 2013; sin embargo, hay períodos en que los datos no son constantes.



Figura 3.1 Estación Valle Nevado, abril 2019

La estación cuenta con instrumentos especialmente diseñados para el monitoreo de la nieve y condiciones meteorológicas en forma constante, contribuyendo al estudio de la hidrología en condiciones de alta montaña. A continuación, se presenta una tabla con los sensores que posee la estación de monitoreo.

Tabla 3.1. Equipos estación Valle Nevado. Fuente: Comte (2017)

Sensor	Variable Medida	Intervalo de registro (min)
Sonda Campbell HMP60	Temperatura	15
	Humedad relativa	
Anemómetro Young Company	Velocidad de viento	
	Dirección del viento	
Barómetro Campbell CS106	Presión atmosférica	
Piranómetros Li-Cor Li200	Onda corta incidente	
	Onda corta reflejada	
Pluviómetro OTT Pluvio2	Intensidad precipitación	
	Precipitación acumulada	
	Temperatura	
Sonda Temperatura Campbell 109	Temperatura del suelo	
Radiómetro Kipp and Zonen CNR2	Radiación neta de onda corta	
	Radiación neta de onda larga	
	Radiación neta	
Snow Pack Analyser Sommer (inclinado y a 10-30-50 cm del suelo)	Fracción agua	
	Fracción hielo	
	Densidad nieve	
	SWE	
Snow Scale Sommer SSG200	SWE	
Sensor ultrasónico Sommer USH-8	Profundidad nieve	
Sonda temperatura Sommer	Temperatura aire	
	Temperatura nieve	

3.2 Cuenca experimental Piuquenes

La cuenca experimental Piuquenes se ubica en la zona cordillerana de la región Metropolitana, en la comuna de Lo Barnechea. Su área es de aproximadamente 2,6 km² y el rango de altitud es de 3348 a 4029 (m.s.n.m).

En la cuenca Piuquenes se origina el Estero Las Bayas. Se encuentra aproximadamente a 3,5 km de la estación Valle Nevado. A continuación, se presenta un mapa con la ubicación y delimitación de la zona de estudio.

Zona de estudio: Valle Nevado y Cuenca Experimental Piuquenes

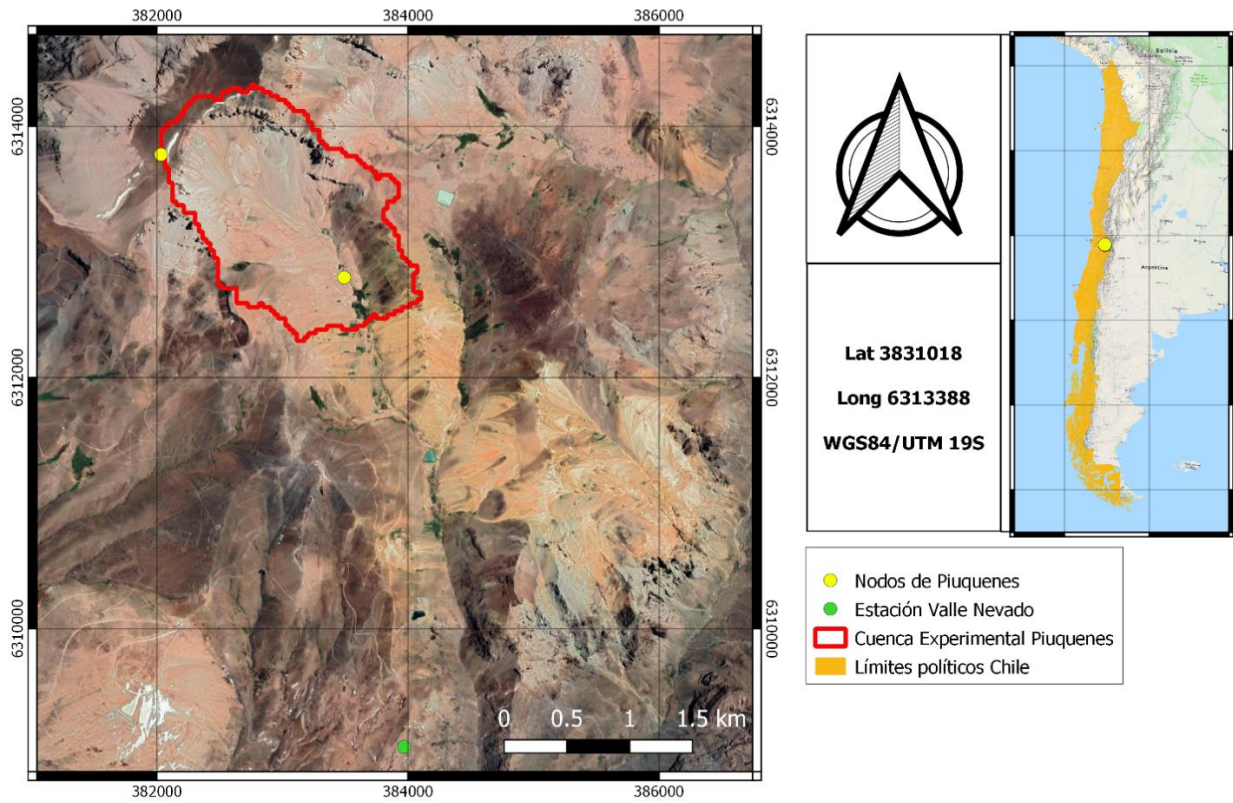


Figura 3.2 Mapa de zona de estudio: Estación Valle Nevado y Cuenca Experimental Piuquenes. Fuente: Elaboración propia

3.3 Sistema físico natural

3.3.1 Topografía

Tanto la cuenca experimental Piuquenes como la estación Valle Nevado, se encuentran sobre los 3000 (m.s.n.m). Esta información se obtiene utilizando el *Modelo de Elevación Digital* (DEM) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), el que se trabaja en GRASS y posteriormente en QGIS. Las pendientes en la cuenca experimental Piuquenes poseen valores de 0 a 60 grados aproximadamente, con algunos puntos con pendientes mayores hacia la zona norte de la zona. La estación Valle Nevado se ubica en un lugar con pendiente de aproximadamente 40 grados. La estación Valle Nevado posee orientación Oeste, al igual que el nodo 1 y 14 de la cuenca del Estero Las Bayas.

3.3.2 Geología

La composición y estructura, tanto interna como superficial de la tierra son relevantes para conocer el comportamiento ante agentes externos que afecten la zona de estudio. A continuación, se describe qué tipo de materiales y características posee la corteza en el territorio que se analiza.

En la zona donde se ubica la estación Valle Nevado se distinguen secuencias Volcánicas, cuya edad se remonta al Mioceno Superior (8-5 millones de años). Los tipos de roca presentes son Pórfidos andesíticos, dacíticos y graniodoríticos de hornblenda, portadores de mineralización de tipo “Pórfido cuprífero gigante” y chimeneas de brechas.

Por otro lado, la zona más al norte de la cuenca experimental Piuquenes, presenta el mismo tipo de suelo que la estación Valle Nevado, mientras que la gran mayoría, tanto de la cuenca, como la parte cordillera de la región Metropolitana se presentan secuencias Volcano-sedimentarias, cuya edad es del Mioceno Inferior-Medio. El tipo de rocas presentes son lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. Estas formaciones reciben el nombre de complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas (SERNAGEOMIN, 2003).

3.3.3 Clima

El clima presente en la zona de estudio corresponde a Clima Frío de Altura, el que se localiza en la Cordillera de los Andes por sobre los 3000 metros de altura. Las bajas temperaturas y precipitaciones sólidas caracterizan este tipo de clima, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo permanentes en cumbres y quebradas de la alta Cordillera.

Los valores que se registran de precipitación, son mayores durante las temporadas invernales, especialmente durante los meses de mayo, junio, julio y agosto (DGA, 2004).

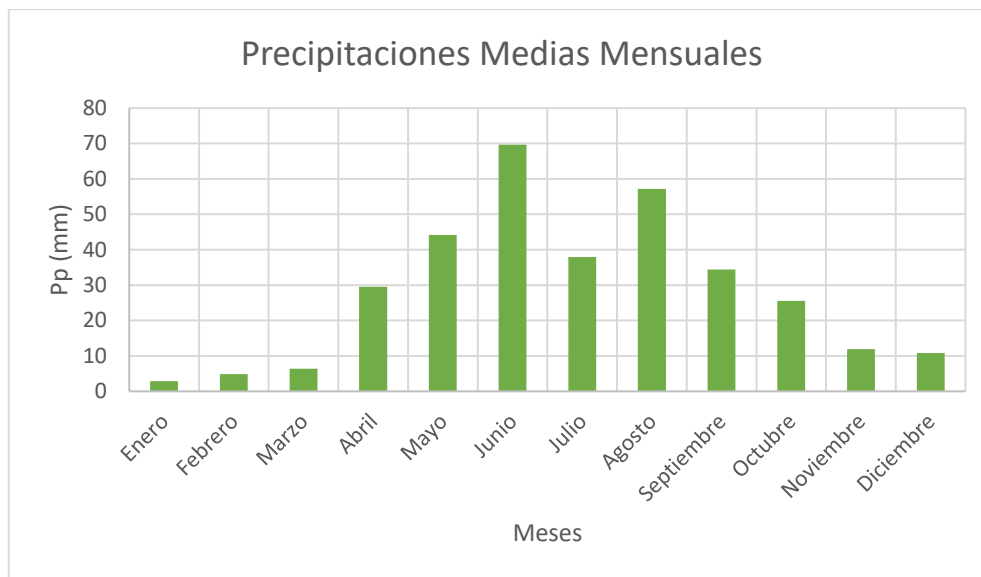


Figura 3.3 Precipitaciones Medias Mensuales en Estación Estero Yerba Loca antes de junta San Francisco

3.3.4 Vegetación

En la zona de estudio hay escasa superficie urbanizada, por lo que se conserva la mayor parte de las condiciones naturales. La cobertura vegetal se compone principalmente de matorral esclerófilo andino y estepa altoandina, la que se considera característica de la Región de la Estepa Altoandina, extendiéndose desde el límite con Perú y Bolivia, hasta las zonas montañosas de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins (Fernández, 2016).

Las siguientes imágenes grafican algunas características de la zona de estudio como vegetación y topografía en distintas épocas del año.



Figura 3.4 Cuenca experimental Piuquenes, abril y junio 2019. Fotógrafo: Alonso Mejías

3.4 Datos disponibles

3.4.1 Datos meteorológicos observados

Los datos meteorológicos que se requieren para este estudio corresponden a la temporada de mayo a diciembre del 2018. Esta información se recopila de la estación de monitoreo Valle Nevado. Sin embargo, debido a la disponibilidad de datos, la modelación se inicia desde el 8 de mayo del 2018.

Las variables necesarias y que se registran en la estación, corresponden a precipitación, temperatura del aire y humedad relativa, valores que se miden cada 15 minutos. Por otro lado, para la velocidad de viento, es necesario construir una serie de valores, ya que el sensor que mide esta variable no se encuentra operativo en el período de estudio. Por lo tanto, se utilizan las mediciones registradas en nodos de la cuenca experimental Piuquenes la que se encuentra a 3 km de distancia, aproximadamente. Para realizar este proceso se utilizan 2 de los 14 nodos en los que hay herramientas de medición, esto se debe a que presentan sensor de medición de viento y la orientación del punto de registro es similar a la que posee la estación Valle Nevado. Otro aspecto que se considera para la construcción de la serie de viento son las alturas de cada punto que se utiliza, las que se observan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Altitud de nodos cuenca Piuquenes y estación Valle Nevado

Nodo	H(m.s.n.m)
PQN1	3556
PQN14	3390
VN	3036

Las condiciones de vegetación son similares en los puntos involucrados, por lo que no crea condiciones diferentes que puedan afectar en la velocidad de viento.

3.4.2 Datos provenientes de pronósticos meteorológicos

Los valores de pronósticos meteorológicos de *Forecast Global System* (GFS) se descargan del *Research Data Archive* (RDA), administrado por la Sección de Ingeniería de Datos del laboratorio de Sistemas de Información y computación (CISL) en NCAR (<https://rda.ucar.edu/>).

El formato de los datos consiste en una malla global, en este caso, de 0,25 grados, la que contiene diversas variables meteorológicas en diferentes escalas. En cuanto al espacio temporal, los pronósticos tienen un alcance de hasta 384 horas. Sin embargo, en este trabajo se utiliza horizontes de tiempo desde 6 a 168 horas, con intervalos de 6 horas. Se escoge que la actualización se realice cada 168 horas para que el análisis no se realice constantemente.

Para acotar la malla a la zona de estudio, se escoge la celda en la que se ubica la estación Valle Nevado. Por otro lado, GFS posee diversas variantes de cada variable, por lo que se debe escoger la que mejor represente la zona de estudio, de acuerdo a su altitud y características generales. En la Tabla 3.3, se detallan las opciones posibles de cada forzante.

Tabla 3.3 Opciones para forzantes meteorológicas de GFS: Fuente: Adaptado desde <https://rda.ucar.edu/>

Temperatura	Velocidad de viento	Humedad Relativa	Precipitación total
Superficie de agua o suelo	Superficie de agua o suelo	Atmosfera completa	Superficie de agua o suelo
Superficie isobárica (desde 1 a 1000mbar)	Superficie isobárica (desde 1 a 1000mbar)	Nivel de congelación troposférica más alto	
Máximo nivel de viento	Máximo nivel de viento	Superficie isobárica (desde 1 a 1000mbar)	
Capa entre diferencia de presión, 0 y 30mbar	Capa entre diferencia de presión, 0 y 30mbar	Capa entre diferencia de presión, 0 y 30mbar	
Superficie de vorticidad potencial	Superficie de vorticidad potencial	Nivel de isoterma 0 °C	
Altura sobre el suelo (2, 80 y 100m)	Altura sobre el suelo (2, 80 y 100m)	Altura sobre el suelo 2m	
Altura m.s.n.m (1829, 2743 y 3658m)	Altura m.s.n.m (1829, 2743 y 3658m)		
Altura superior de nube (alto, medio y bajo)	Altura superior de nube (alto, medio y bajo)		

Capítulo 4: Metodología

4.1 Recopilación de información y preparación de datos

Los datos que se obtienen de la estación meteorológica y nivométrica Valle Nevado se registran en intervalos de tiempo de 15 minutos. Es por esta razón, que es necesario promediar valores, en el caso de la humedad relativa y temperatura, para obtener vectores horarios. En cambio, para la precipitación, se obtiene la cantidad acumulada cara hora.

Para trabajar con los datos de velocidad de viento es necesario rellenar valores faltantes en la serie, lo que se realiza de forma lineal. Posteriormente, para utilizar la velocidad de viento en el modelo se realiza una extrapolación de los datos, debido a la carencia de ellos en la estación Valle Nevado.

4.2 Evaluación de pronósticos meteorológicos

El procedimiento para evaluar los pronósticos meteorológicos para diferentes horizontes de tiempo consiste en agrupar los pronósticos en los intervalos horarios correspondientes y calcular diferentes métricas de evaluación con el objetivo de obtener el sesgo correspondiente en cada horizonte de tiempo, con respecto a las mediciones observadas.

La evaluación de los pronósticos meteorológicos de *Global Forecast System* (GFS) se realiza en intervalos de 6 horas, ya que es la disposición en que se entregan los datos desde la plataforma de descarga. De esta manera, se evita añadir más fuentes de incertidumbre al interpolar los valores.

El objetivo de este procedimiento es identificar la variación de sesgo a través del tiempo y distinguir la forma en que se comportan las variables meteorológicas que entregan los pronósticos. Para esto, se utilizan las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7, además del indicador R^2 . Como resultado de este proceso, se tiene un valor para cada métrica de evaluación en cada horizonte de tiempo, es decir de 6 horas hasta 168 horas, para los que se utilizan los valores de las 34 semanas que se analizan divididas en período cálido y frío.

4.3 Corrección simulaciones pronóstico meteorológico

El objetivo de realizar una corrección a los valores que entrega el pronóstico meteorológico GFS es disminuir el sesgo presente al comparar las variables con los registros de la estación meteorológica Valle Nevado. Para realizar este proceso se utiliza la metodología *Quantile Mapping*, la que emplea una función de distribución acumulada (CDF) de los pronósticos crudos y de valores observados.

En el caso de la precipitación, humedad relativa y viento se utiliza la función de distribución Gamma, la que se presenta en la Ecuación 4.1.

$$pdf(x) = \frac{e^{-\frac{x}{\vartheta}} \cdot x^{(k-1)}}{\Gamma(k)\vartheta^k} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

ϑ : Parámetro de escala

k : Parámetro de forma

x : Variable meteorológica

$\Gamma(k)$: Función gamma

Los parámetros de escala y forma se explican en Thom (1958), donde se señala que la forma para calcularlos es la siguiente:

$$k = \frac{1}{4 \cdot A} \left[1 + \sqrt{\frac{1+4 \cdot A}{3}} \right] \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$\vartheta = \frac{\bar{x}}{k} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

donde:

x : Variable meteorológica

n : Número de mediciones

Como se explica en Piani et al. (2010), en el caso de la precipitación se utiliza una función mixta, con el objetivo de identificar los períodos secos y obtener su probabilidad. Por lo tanto, la función se compone de la distribución de Bernoulli y Gamma. La función de distribución acumulada (CDF) se expresa de la siguiente forma:

$$\int_0^x \frac{e^{-\frac{x'}{\vartheta}} \cdot x'^{(k-1)}}{\Gamma(k)\vartheta^k} dx' + cdf(0) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

donde:

ϑ : Parámetro de escala

k : Parámetro de forma

x' : Variable meteorológica

$\Gamma(k)$: Función gamma

$cdf(0)$: Fracción de tiempo sin precipitación

Al igual que en el caso de la precipitación, para la humedad relativa y velocidad de viento se utiliza la distribución Gamma, pero no Bernoulli, por lo que en el caso de la Ecuación 4.5 no se presenta la probabilidad de los valores iguales a 0. En Safari (2011) se concluye que una de las distribuciones más adecuadas para la velocidad de viento es la distribución Gamma.

Para realizar la corrección se utilizan las funciones de distribución acumuladas (CDFs) de pronósticos meteorológicos y datos observados, de modo que los valores que se desean obtener en el post procesamiento se calculan de la siguiente manera:

$$x' = F_o^{-1}[F_x(x)] \quad \text{Ecuación 4.6}$$

donde:

F_o :CDF observaciones estación

F_x :CDF simulaciones de pronósticos

x : Variable meteorológica de pronóstico

x' : Variable meteorológica post procesada

Para la corrección de la temperatura se utiliza la distribución de probabilidad Normal, ya que esta forzante posee valores positivos y negativos. Para esto, se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$PDF = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

$$CDF = \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad \text{Ecuación 4.8}$$

donde:

σ : Desviación estándar de la serie de temperatura (°C)

μ : Promedio de los valores de la serie de temperatura (°C)

x : Temperatura simulada por pronóstico u observada

Al obtener las distribuciones acumuladas de las variables observadas en la zona de estudio y simuladas por el pronóstico meteorológico se procede a obtener la función de transferencia, que relaciona las probabilidades de los pronósticos con los valores observados. A continuación, se observa la relación que presenta lo descrito anteriormente.

$$cdf_{obs}(y) = cdf_{sim}(x) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$y = f(x) \quad \text{Ecuación 4.10}$$

donde:

x: Valor de variable simulada

y: Valor de variable post procesada

La Ecuación 4.10 presenta la función de transferencia, donde el valor de “y” se obtiene la intersección de la probabilidad de un valor simulado, con el valor observado corresponde a esa misma probabilidad.

Algunos factores que influyen en el resultado de la corrección de pronósticos y que difieren con estudios realizados anteriormente son la zona de estudio, la que en este caso es puntual, por lo que se escoge solo una celda de la grilla del pronóstico meteorológico. Además, la temporada con la que se realiza la corrección es de 8 meses. Otro factor diferente a las investigaciones previas que se presentan en la revisión bibliográfica es que en estas últimas, se trabaja con pronósticos probabilísticos, es decir, un conjunto de datos, mientras que en este informe se presentan pronósticos determinísticos. La causa de esta situación es por el limitado tiempo de procesamiento de los datos.

4.4 Modelación puntual en Valle Nevado

Para modelar el Equivalente en Agua de Nieve utilizando pronósticos meteorológicos y datos observados de la estación Valle Nevado, se trabaja con el modelo SNOBAL CHRM, el que presenta los algoritmos para los cálculos del balance de masa y energía en la nieve.

El modelo se compone de dos capas de nieve, una en contacto con la atmósfera y una capa inferior en contacto con el suelo. El balance de energía se resuelve utilizando la ecuación 2.1. Las variables de estado predichas por el modelo corresponden a profundidad de nieve, densidad de nieve, temperatura de las capas de nieve, temperatura promedio del manto nival y contenido de agua líquida promedio en la nieve. Por otro lado, las forzantes que necesita el modelo son radiación solar neta, radiación termal entrante, temperatura del aire, presión de vapor, velocidad del viento y temperatura del suelo (Marks et al. 1998). En la Figura 4.1, se presenta un esquema de la modelación con SNOBAL CRHM del manto nival.

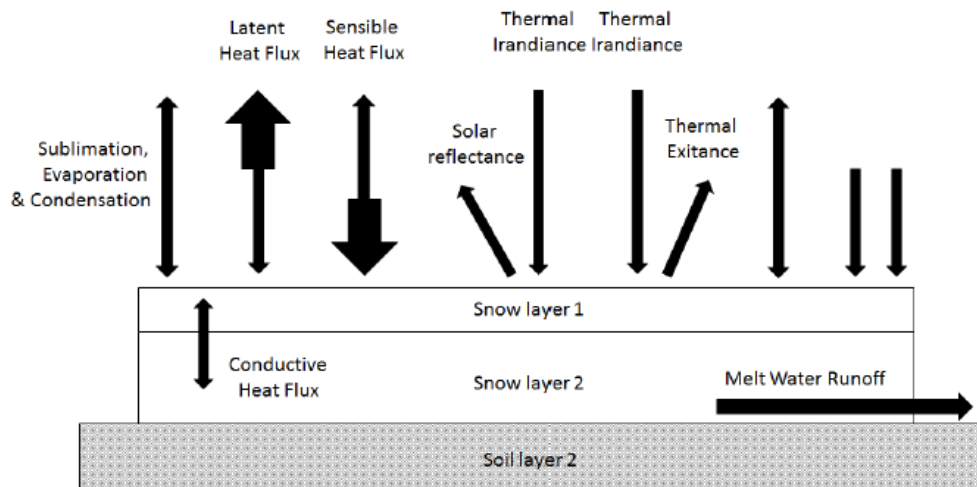


Figura 4.1 Esquema de balance de energía. Fuente: Marks et al., 1998

Al no utilizar forzantes radiativas es necesario incorporar módulos que posean algoritmos capaces de calcular las variables requeridas por el modelo. Cada módulo que se incorpora posee parámetros que permiten caracterizar la zona de estudio de mejor forma y obtener simulaciones más acertadas. La razón por la que no se utilizan forzantes radiativas es para tener las mismas condiciones empleando valores observados y pronósticos meteorológicos.

4.4.1 Construcción modelo

Para representar las características de la zona de estudio y los procesos que se desean representar, es necesario utilizar los módulos adecuados con valores de parámetros que indiquen de manera acertada el comportamiento del sitio que se analiza. Los módulos que se utilizan son los siguientes:

- **Basin:** Entrega las características morfológicas y su caracterización espacial, como por ejemplo, elevación, pendiente, aspecto, entre otros.
- **Obs:** Procesa la información que se entrega por medio del archivo con las observaciones de datos meteorológicos y la distribuye a los demás módulos.
- **SWESlope:** Calcula el transporte de nieve por gravedad e inestabilidad de ladera.
- **PbsmSnobal:** Estima el transporte de nieve por viento y sublimación. Utiliza en cada intervalo la velocidad de viento, temperatura del aire y humedad relativa.
- **SnobalCRHM:** Calcula el balance de masa y energía mediante un modelo que posee dos capas de nieve. En este caso se utiliza la variación SnobalCHRM#1 que utiliza variables radiativas provenientes del módulo CanopyClearing.

- **Global:** Estima la radiación neta teórica y componentes directas y difusas de la radiación solar incidente y las horas de sol diarias. Utiliza el método propuesto en Garnier & Ohmura (1970).
- **Annandale:** Se utiliza la variación Annandale#1, ya que estima las variables QsiA_Var, QsiD_Var y QsiS_Var utilizando las horas de sol diarias.
- **LongVt:** Calcula el flujo de radiación de onda larga variable entrante, utilizando la variable QsiD_Var del módulo Annandale, ya que se utiliza la variante LongVt#2.
- **CanopyClearing:** Define clases de vegetación para el modelo de radiación neta en la superficie de la nieve calculando la intercepción de la vegetación en el manto nival (CanopyClearing#3). Obtiene las variables necesarias desde Annandale.
- **Evap:** Estima tasas de evaporación utilizando las metodologías de Granger, Priestley-Taylor o Pennan-Monteith.
- **FrozenAyers:** Calcula la infiltración de suelo congelado utilizando la metodología de Zhao & Gray (1999) y de Ayers (1959) para suelo no congelado.
- **Albedo:** Estima el albedo de la nieve durante el invierno y el período de fusión.
- **K_Estimate:** Estima la velocidad de flujo lateral.
- **Soil:** Simula la humedad sub-superficial utilizando dos capas de suelo.

En el siguiente esquema se presenta la relación que existe entre los diferentes módulos que se utilizan en el modelo.

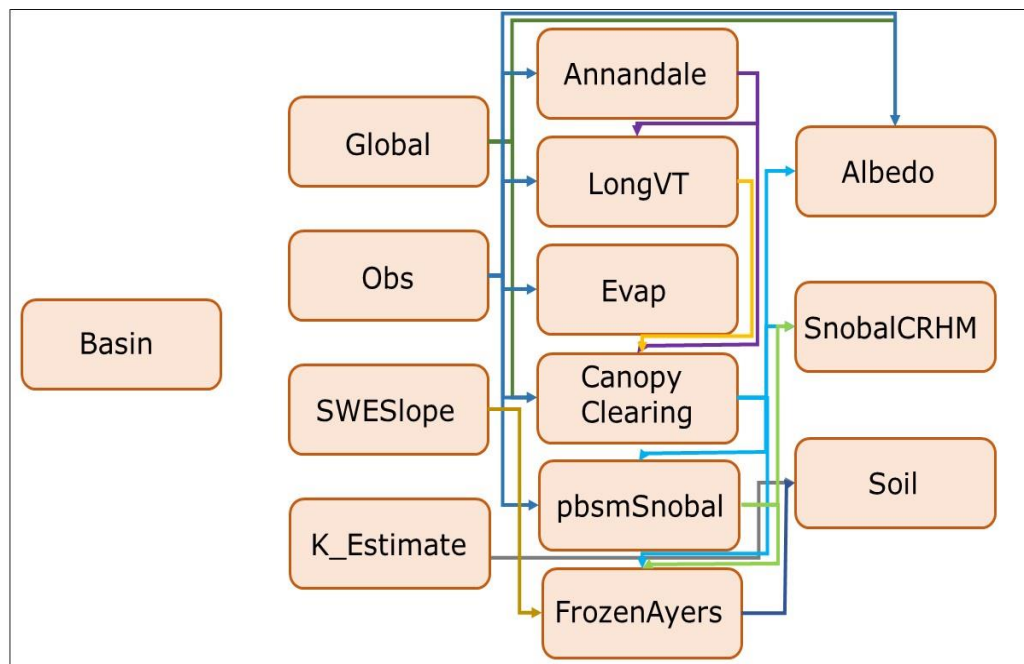


Figura 4.2 Relación entre módulos utilizados. Elaboración propia con información del diagrama de flujo del modelo

Para realizar una modelación puntual en el sitio donde se emplaza la estación Valle Nevado se debe considerar el área mínima posible. El modelo CRHM posee un límite inferior igual a 1 m^2 , por lo que se utiliza este valor. En cuanto a los parámetros que describen la vegetación del lugar, se colocan los valores mínimos, ya que no hay presencia de vegetación que afecte los resultados del modelo.

El pluviómetro presente en la estación corresponde a uno del tipo Smith-Alter, por lo que se debe colocar esta información en el parámetro correspondiente, lo que provoca la modificación de la serie de precipitación.

Al ajustar los parámetros se realiza la calibración del modelo, para lo que se utiliza la altura del manto nival registrada en la estación Valle Nevado y la simulada con forzantes meteorológicas del mismo lugar. La calibración se realiza de manera manual desde el 27 de junio al 4 de septiembre del año 2018, ya que en este período de tiempo hay datos disponible de altura de nieve y SWE registrados en la estación.

Posteriormente, se procede a modelar utilizando las forzantes registradas en la estación en la temporada completa y las variables corregidas de pronóstico. Para este último caso se realizan dos opciones, la primera consta de 34 simulaciones, una cada 168 horas, en la que se incorpora una condición inicial cada semana. Para esto, se simula con los valores observados hasta la semana de interés, donde esta última posee las forzantes predichas por el pronóstico meteorológico. Luego, para construir la serie final de SWE y las demás variables que intervienen en el manto nival, se toman los valores de la última semana de cada una de las 34 simulaciones.

En el otro caso en que se modela con variables de pronóstico, es solo una simulación, ya que no se considera una condición inicial al inicio de cada semana, para analizar de qué forma se comporta la serie sin la influencia de las observaciones. En la Figura 4.3 se presenta un esquema de la metodología adoptada.

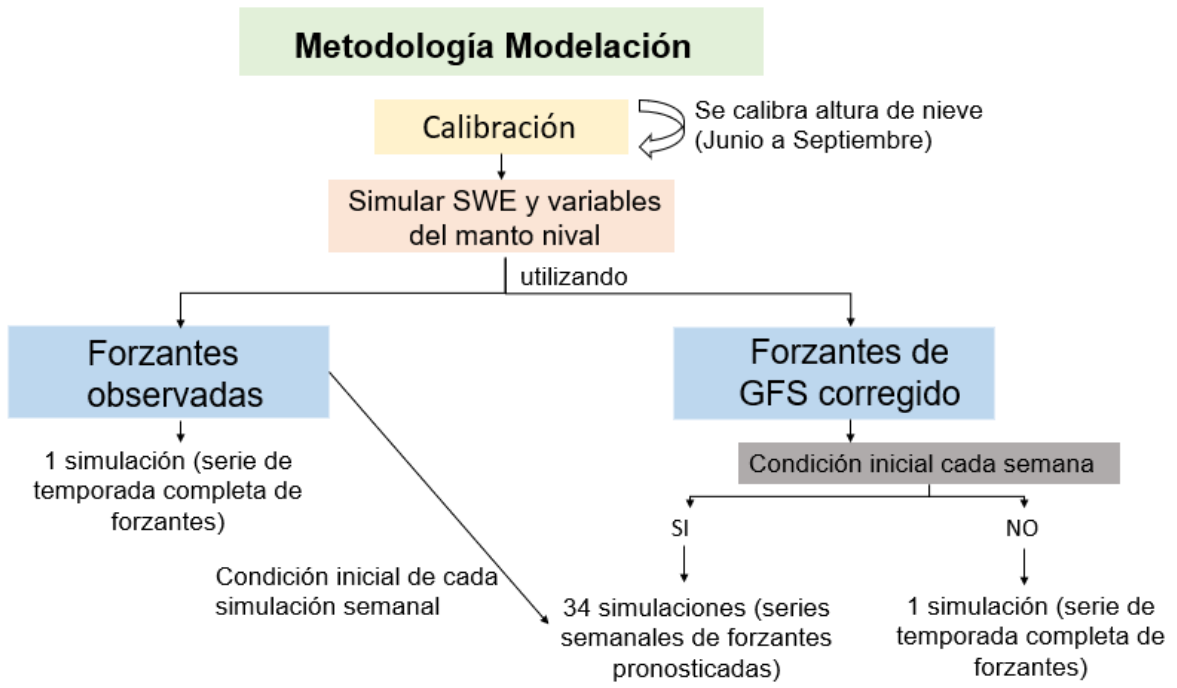


Figura 4.3 Esquema de metodología de modelación

Capítulo 5: Resultados

5.1 Datos observados de entrada al modelo

Los datos de entrada al modelo corresponden a los registros observados en la Estación Valle Nevado en el período de mayo a diciembre del año 2018 y a los valores de pronósticos meteorológicos corregidos. Estos últimos, se presentan de manera semanal.

En el caso del viento, los datos en los nodos de Piuquenes se registran cada una hora, por lo que no es necesario interpolar o realizar otras operaciones. Sin embargo, se requiere rellenar la serie datos, por lo que se hace una interpolación lineal en el tiempo. Finalmente, se realiza el proceso descrito en la sección de Metodología para construir la serie de velocidad de viento en la zona donde se emplaza la Estación meteorológica. A continuación, se presentan las series de cada forzante observada.

En la Figura 5.1 se presenta la temperatura del aire que se mide a 2 m sobre el nivel del terreno. Se observa que se registran temperaturas menores a 0 °C durante casi todo el período de estudio, sin embargo, las temperaturas inferiores se tienen entre los meses de junio y agosto.

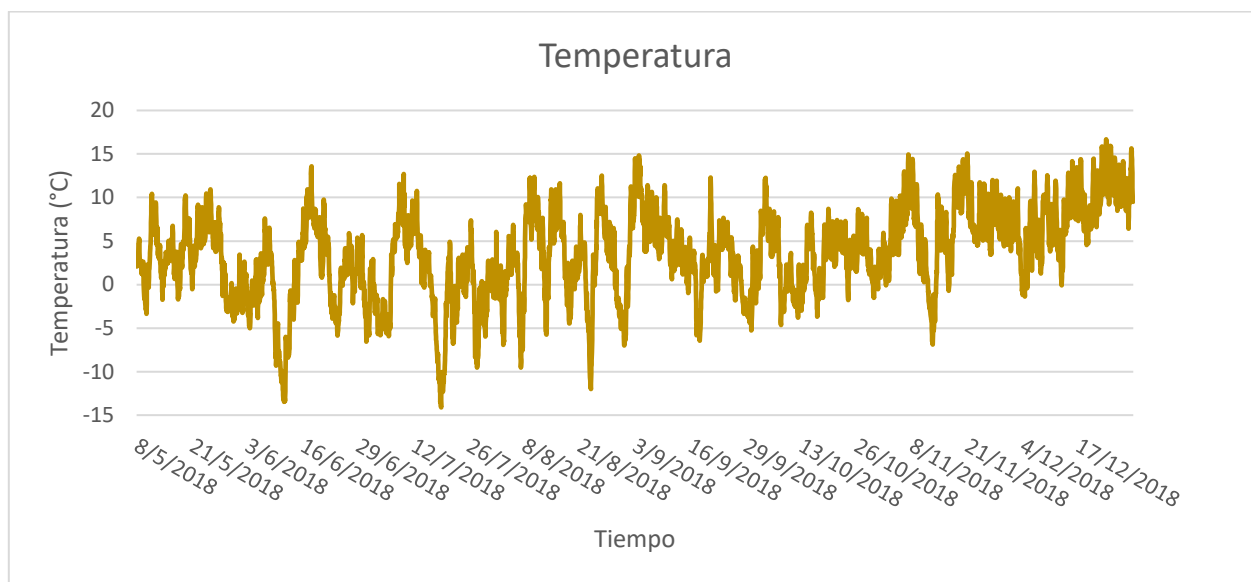


Figura 5.1 Temperatura del aire registrada en la estación Valle Nevado entre mayo y diciembre de 2018

En la Figura 5.2, se presentan los eventos de precipitación en la temporada de mayo a diciembre de 2018, los que se concentran entre los meses de mayo a septiembre, coincidiendo con el período de invierno principalmente. El evento de mayor magnitud ocurre en el mes de Septiembre.

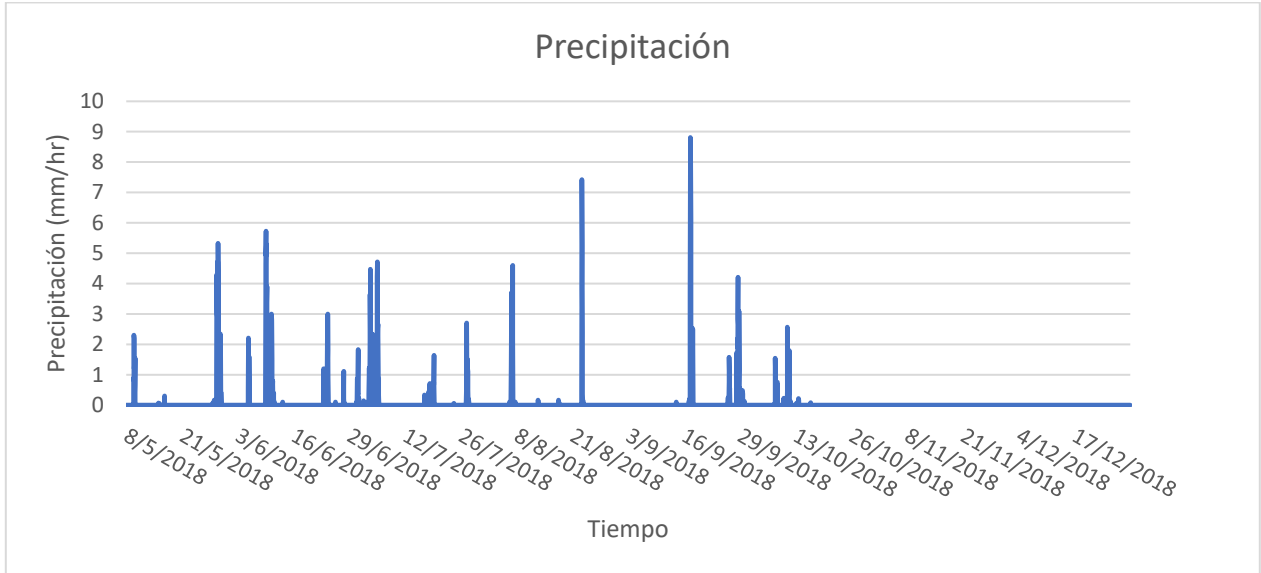


Figura 5.2 Precipitación total del aire registrada en la estación Valle Nevado entre mayo y diciembre de 2018

En la Figura 5.3 y Figura 5.4 se presenta la Humedad Relativa registrada y la velocidad de Viento, respectivamente. La primera, presenta porcentajes menores entre los meses de mayo a agosto. Por otro lado, como se menciona con anterioridad, la velocidad de viento es una construcción que se realiza a partir de los valores de nodos de la cuenca experimental Piuquenes. Los valores negativos resultantes son reemplazados por 0.

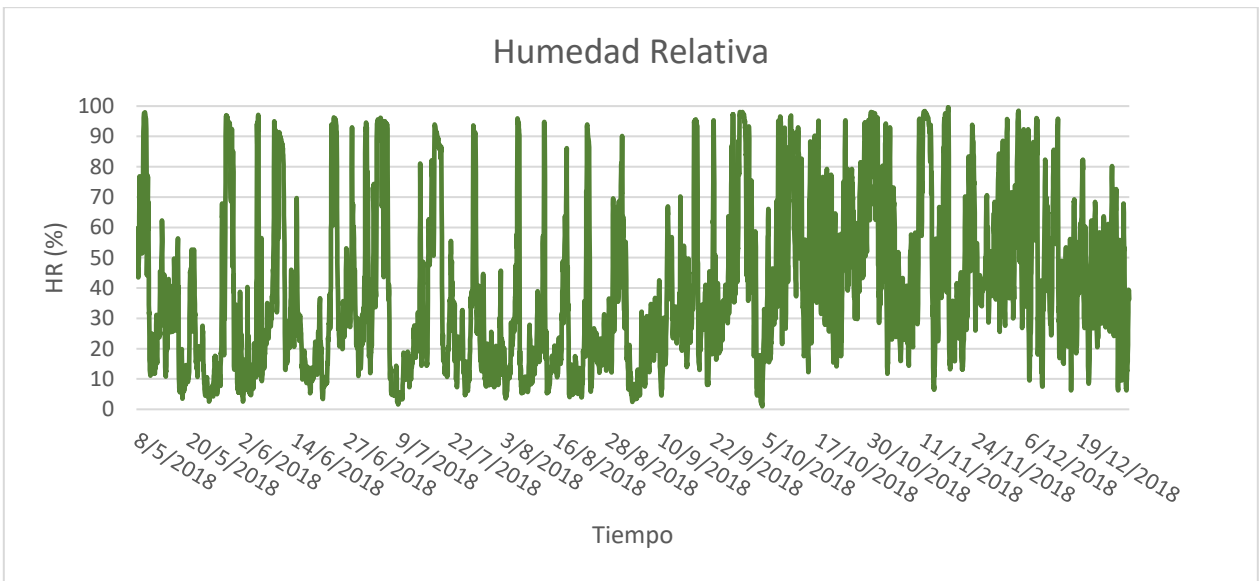


Figura 5.3 Humedad Relativa del aire registrada en la estación Valle Nevado entre mayo y diciembre de 2018

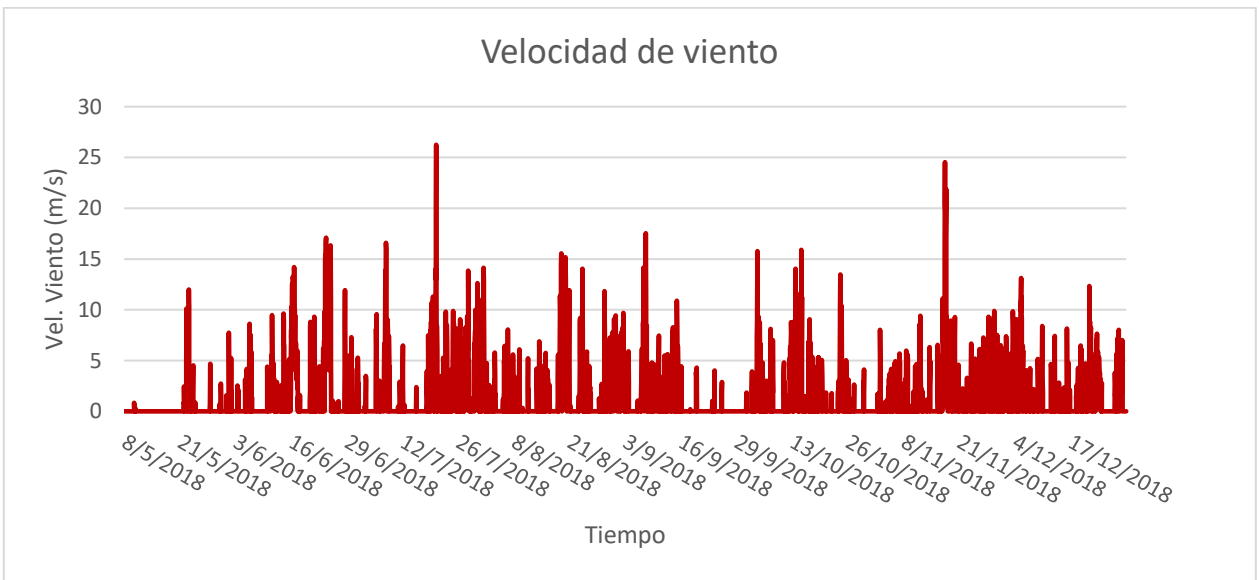


Figura 5.4 Velocidad de viento del viento construida a partir de los datos de nodos de cuenca Piuquenes entre mayo y diciembre de 2018

5.2 Pronósticos meteorológicos

5.2.1 Evaluación y corrección de forzantes

Para evaluar y corregir los pronósticos meteorológicos se sigue la metodología descrita anteriormente en las secciones 4.2 y 4.3. A continuación, se presentan las métricas RMSE Y *Percent Bias* (PB) de cada variable de pronóstico meteorológico y posteriormente corregida utilizando *Quantile Mapping*. También, se utiliza el índice R^2 y NSE para cada forzante, los que se presentan en el Anexo B. Para la evaluación, tanto de pronósticos meteorológicos crudos, como corregidos, se analizan los casos en período frío, cálido y temporada completa. El primero corresponde a las 17 primeras semanas, las que se encuentran en los meses de mayo a agosto, mientras que el período cálido es hasta diciembre.

El pronóstico meteorológico se actualiza cada 168 horas, con intervalos de 6 horas. La evaluación se realiza por cada paso temporal, es decir, 6h, 12h, hasta 168h, utilizando los valores de las 34 semanas que se analizan. Mientras que la corrección se ejecuta utilizando la serie completa de cada forzante para poseer mayor cantidad de datos y así, obtener probabilidades y valores que tengan mayor representatividad.

Los pronósticos meteorológicos se emiten con horario UTC, por lo que para corregir las forzantes se consideran los valores de las observaciones correspondientes a ese horario.

- **Temperatura**

La temperatura que se utiliza proveniente del pronóstico meteorológico corresponde a la simulada a 2743 (m.s.n.m), por lo que se utiliza un gradiente de temperatura para ajustarla a la real de la estación. Se escoge esta variable desde el pronóstico, ya que otras opciones posibles como “2 m sobre el nivel del suelo” no consideran la altura a la que se ubica el punto en estudio, por lo que la temperatura simulada es mayor. En otros casos, el pronóstico carece de series completas en diversos intervalos, por lo que corregir y rellenar estos valores incrementaría aún más la incertidumbre.

En la Figura 5.5 se observa que el RMSE presenta una forma cíclica que depende de la hora del día del registro. En horas de la tarde el sesgo es mayor, mientras que en horas de la noche la diferencia disminuye entre la temperatura observada y la de Pronóstico.

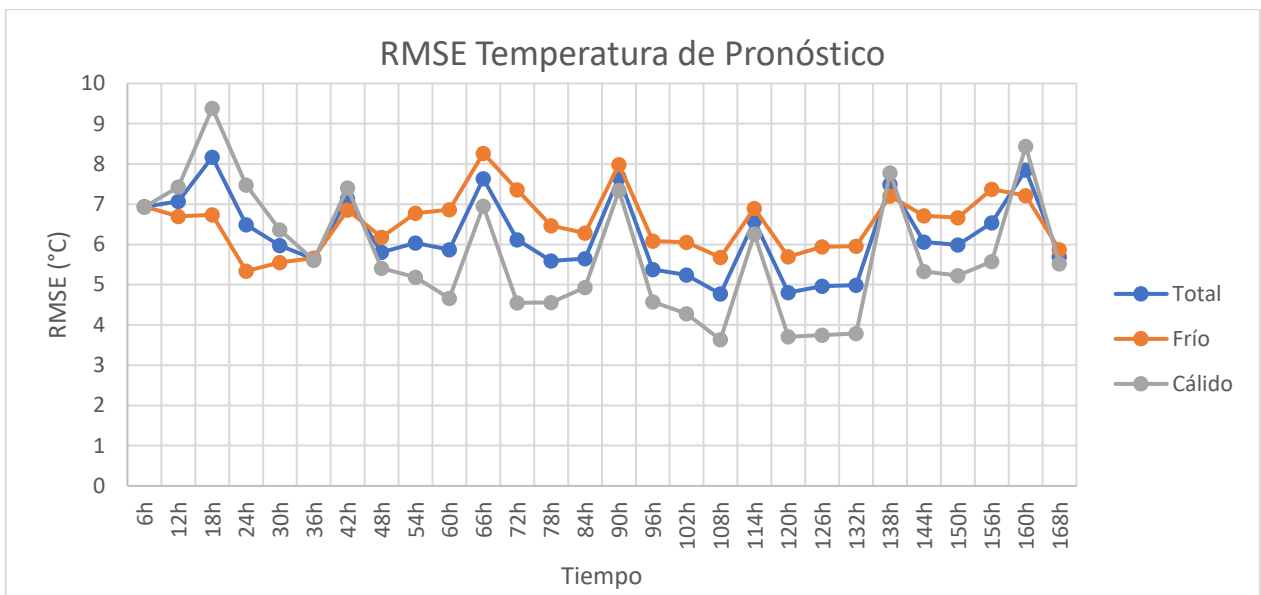


Figura 5.5 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura de GFS

Al contrastar el comportamiento de la Figura 5.5 y la Figura 5.6 se tiene que el conducta cíclica no se encuentra representada de la misma manera en esta última. En el horizonte de tiempo de 6 horas, se observa que el RMSE aumenta y los valores de los períodos no coinciden, como en el caso sin corregir. Esto probablemente sucede, debido a que la probabilidad en cada temporada no es la misma.

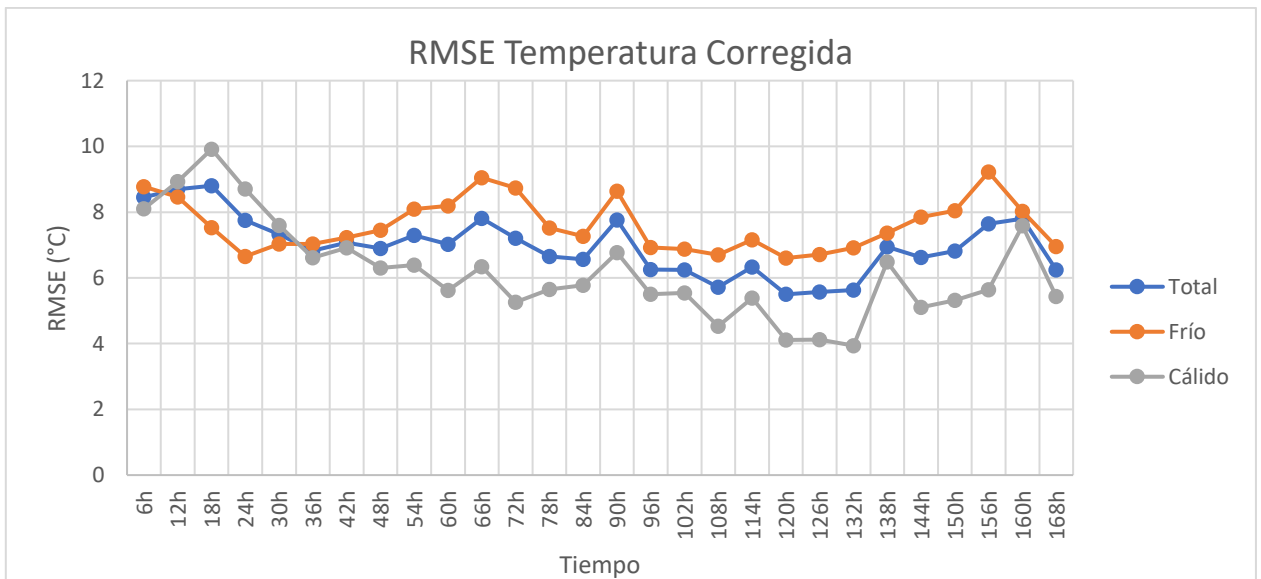


Figura 5.6 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura Corregida

En la Figura 5.7, se presenta el PB de la temperatura de pronóstico que muestra que estas simulaciones presentan porcentajes de sesgos negativos, por lo que la temperatura simulada por en el pronóstico meteorológico GFS subestima la temperatura real observada en la Estación Valle Nevado. En cambio, en la Figura 5.8 esta situación cambia considerablemente, al presentar valores positivos en la mayoría de los horizontes de tiempo. Sin embargo, en los intervalos de 60h, 72h y 156h los porcentajes de sesgos aumentan notoriamente con porcentajes por sobre los 400 hasta -1600.

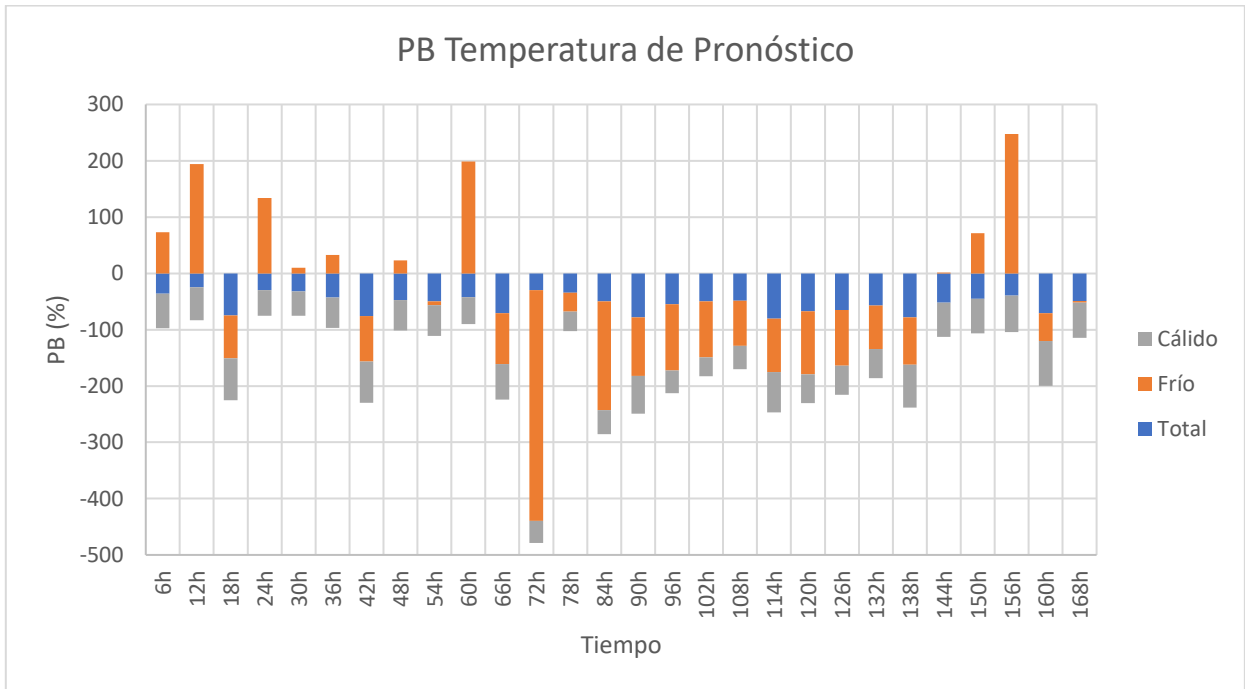


Figura 5.7 PB en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura de GFS

El aumento de sesgo que ocurre en algunos casos se debe a que el método de corrección utiliza las probabilidades de la función de distribución acumulada de la forzante simulada y las relaciona con los valores de la variable observada, por lo que no necesariamente el valor en un tiempo determinado posea una probabilidad similar a la del valor simulado.

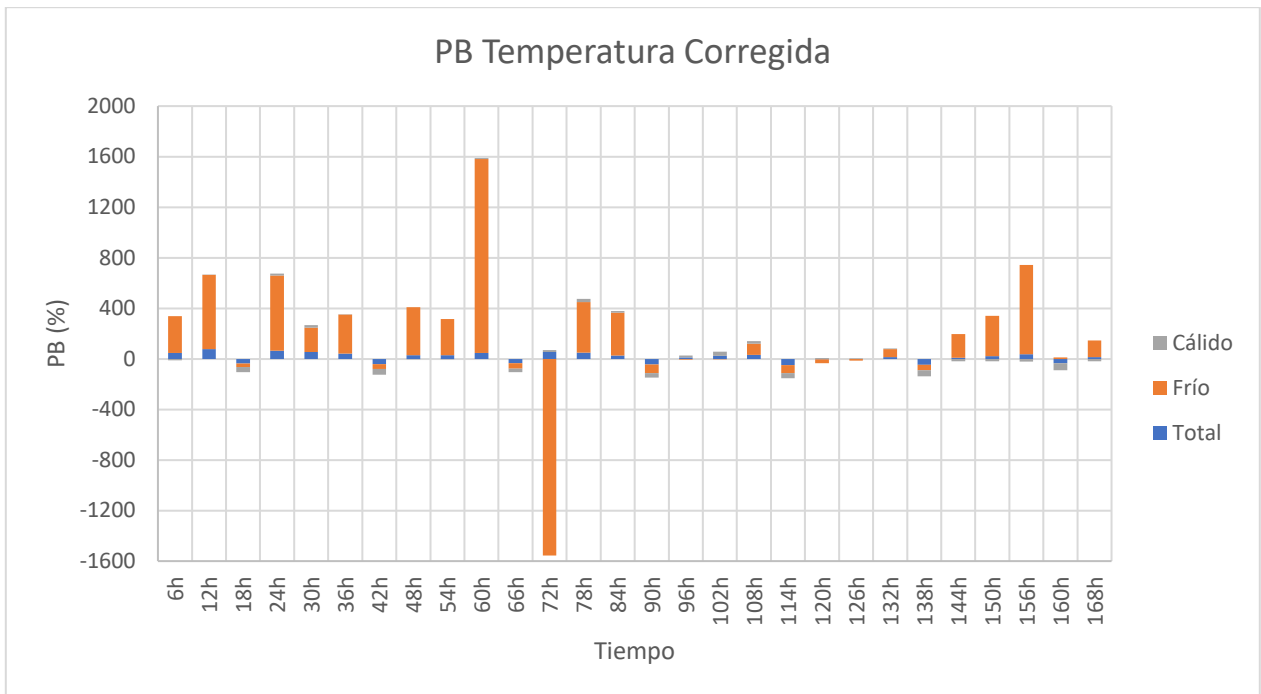


Figura 5.8 PB en época cálida, fría y temporada completa de Temperatura Corregida

- Precipitación

Para realizar la evaluación y corrección de la precipitación se procede a acumular los valores, por lo que la evaluación se realiza en intervalos de 12 horas y no 6 como con las otras variables. Esto se realiza para trabajar con forzantes con menor grado de incertidumbre. El RMSE se expresa en unidades de milímetro por intervalo de tiempo, el que corresponde a 12 horas.

En la Figura 5.9 se presenta el RMSE de la precipitación del pronóstico meteorológico y se observa que el error incrementa su valor en los horizontes de tiempo mayores. Al realizar la corrección, se presenta la misma tendencia, pero con valores menores en cada caso. Este comportamiento, confirma la hipótesis que señala que a mayor horizonte de tiempo, el pronóstico disminuye su capacidad de predicción, aumentando el error asociado.

En la Figura 5.10 se observa que la diferencia entre cada período disminuye, es decir, el error entre los valores simulados por el pronóstico y observado es similar con climas cálidos y fríos.

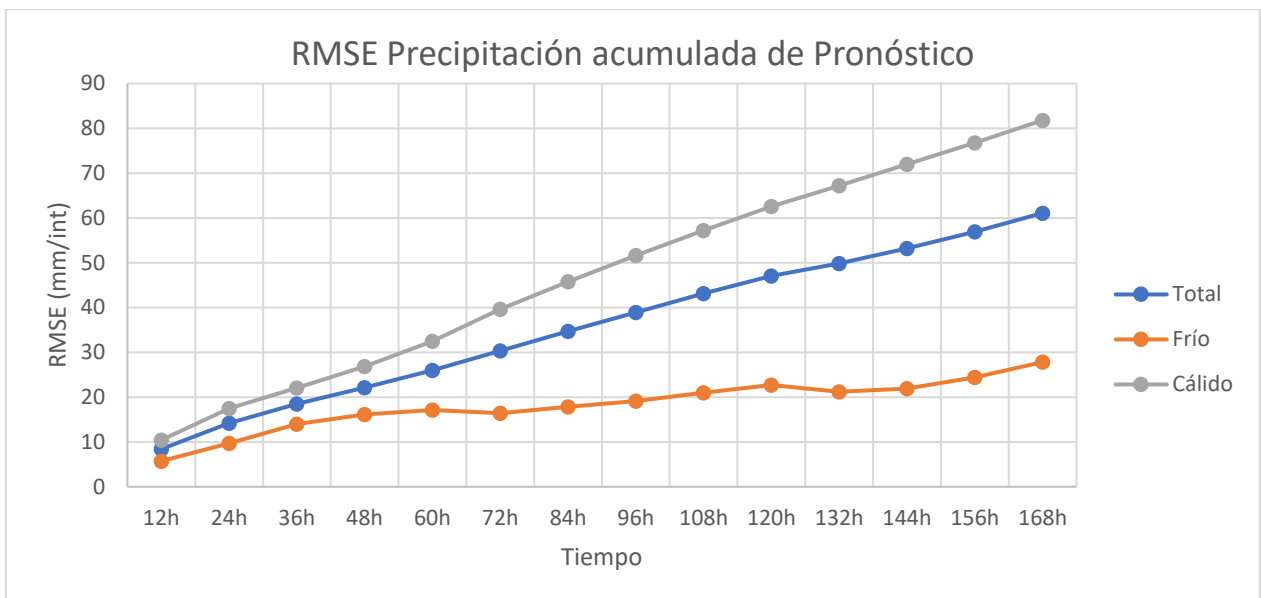


Figura 5.9 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada de GFS

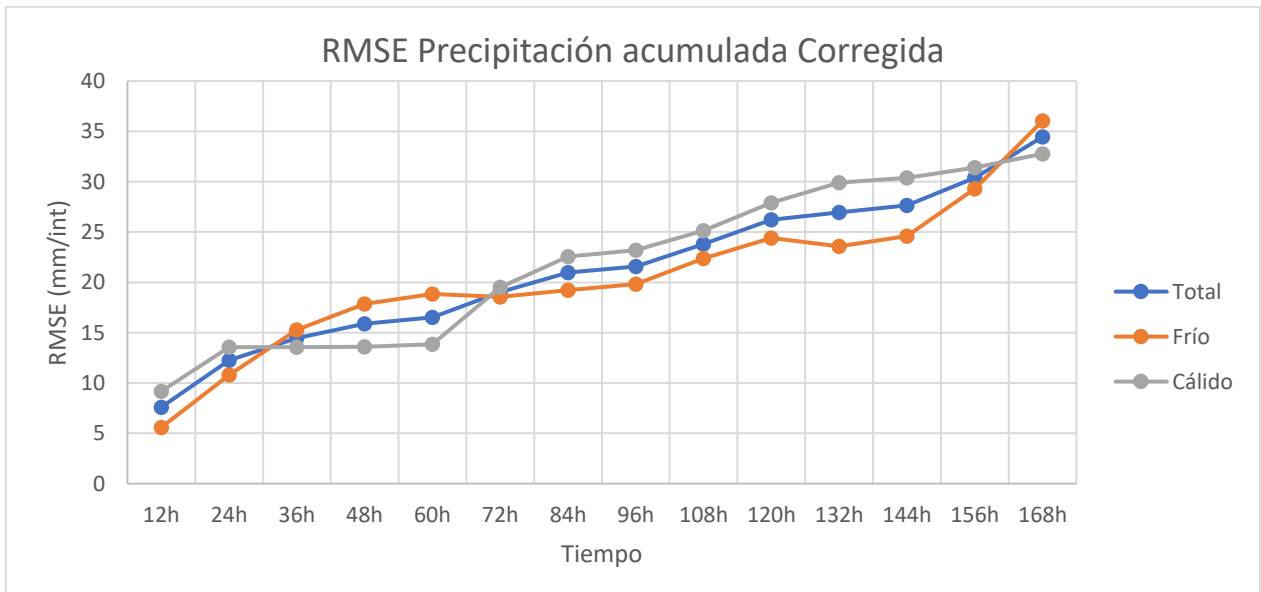


Figura 5.10 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada Corregida

En la Figura 5.11 y Figura 5.12 se observa que el PB disminuye. Sin embargo, al corregir se produce un punto de inflexión en el horizonte de 72 hrs, por lo que en los 3 primeros días se subestiman los valores observados.

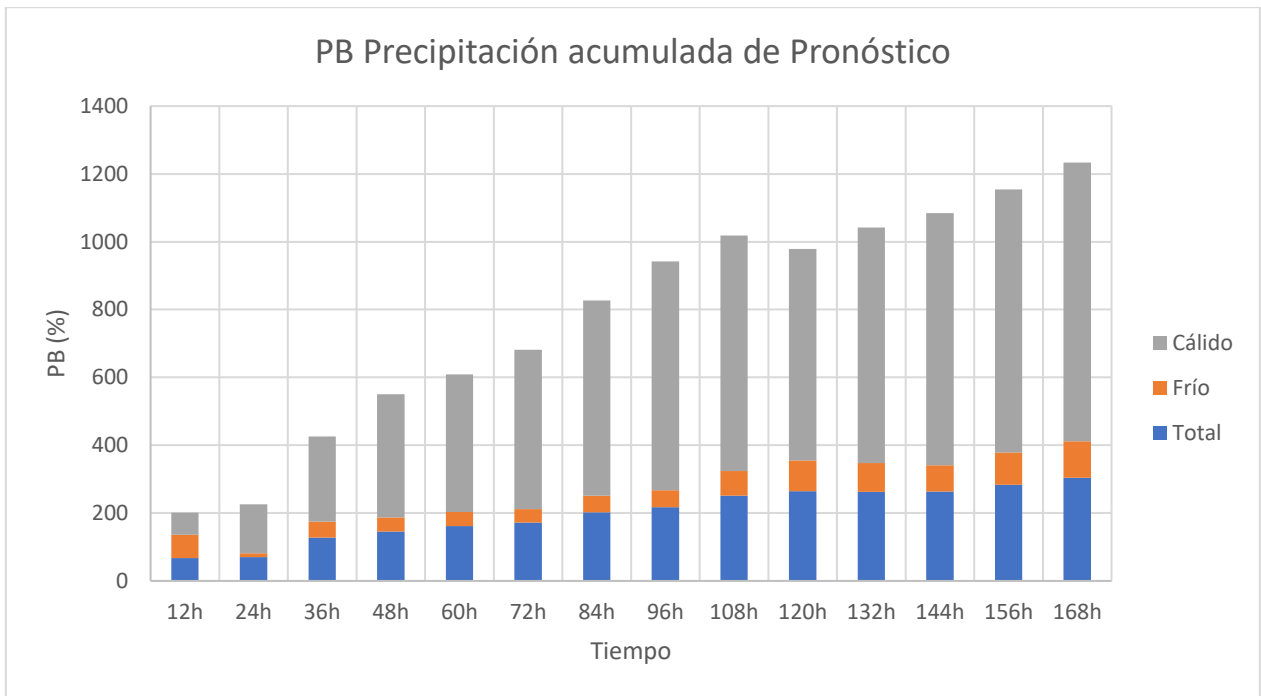


Figura 5.11 PB en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada de GFS

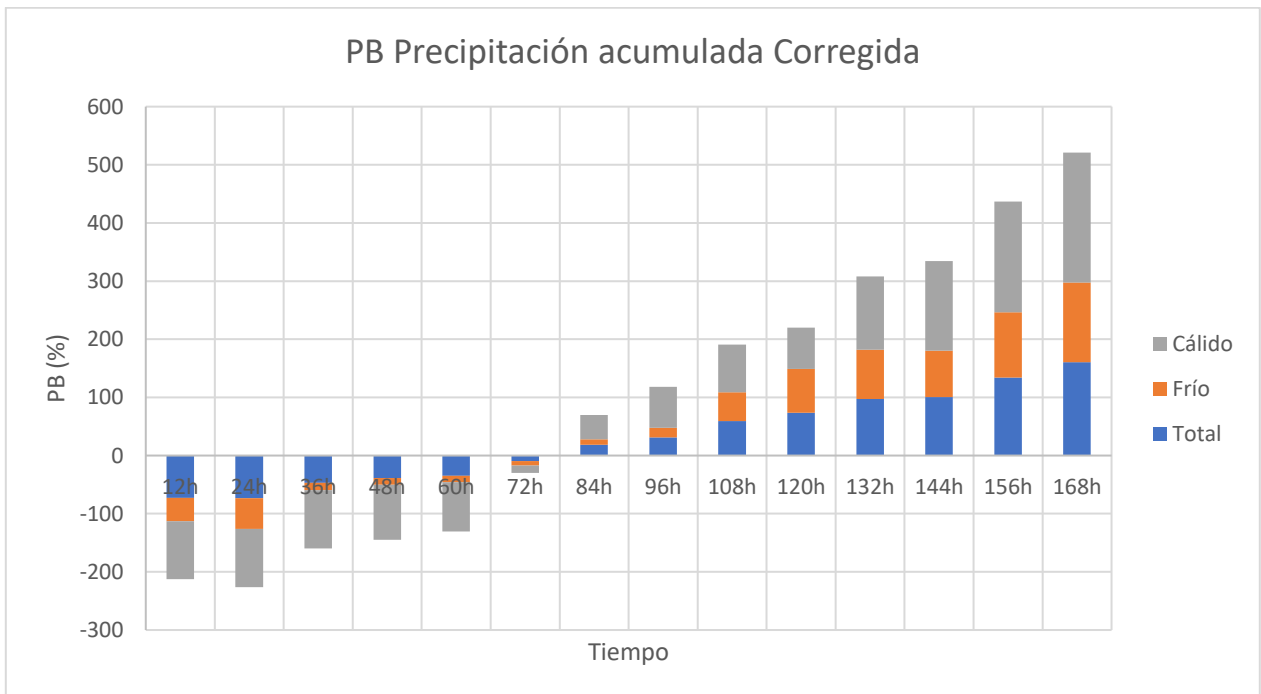


Figura 5.12 PB en época cálida, fría y temporada completa de Precipitación acumulada Corregida

- Humedad Relativa

La Humedad Relativa que se escoge del pronóstico meteorológico es atmósfera completa. Tanto en el caso del RMSE, como en PB, no se observa una diferencia notoria entre las métricas de la forzante cruda y corregida. En cuanto al comportamiento en el tiempo de las métricas de evaluación, no se presentan tendencias que permitan asumir que la capacidad de predicción del pronóstico meteorológico presente cambios en su eficiencia, como en el caso de la precipitación.

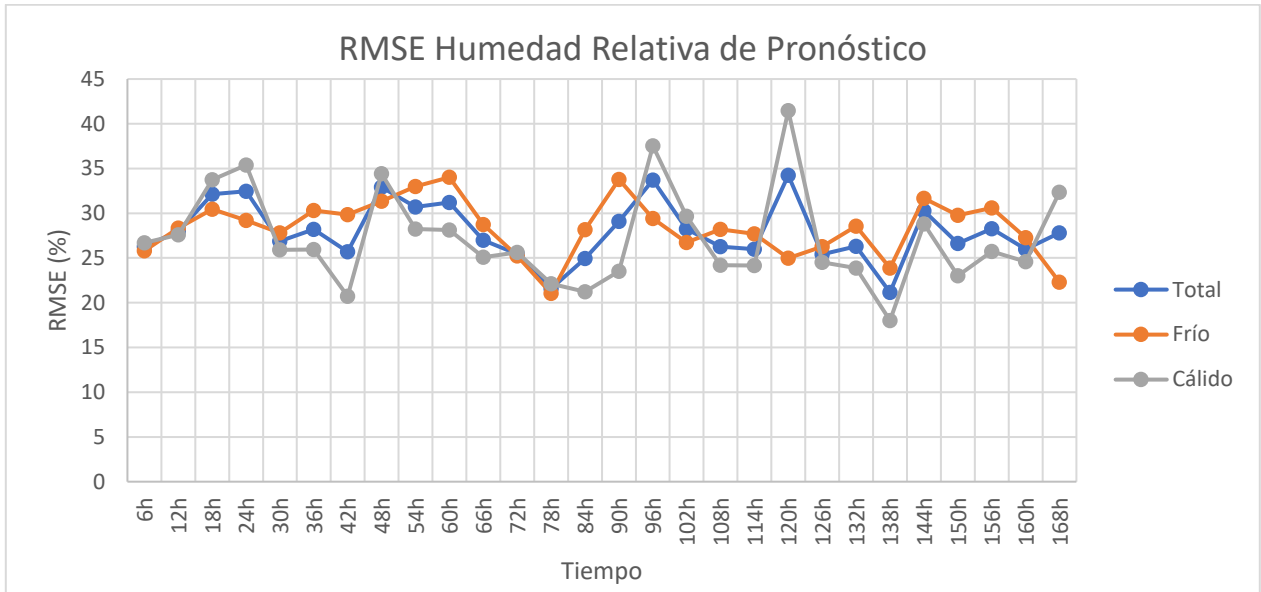


Figura 5.13 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa de GFS

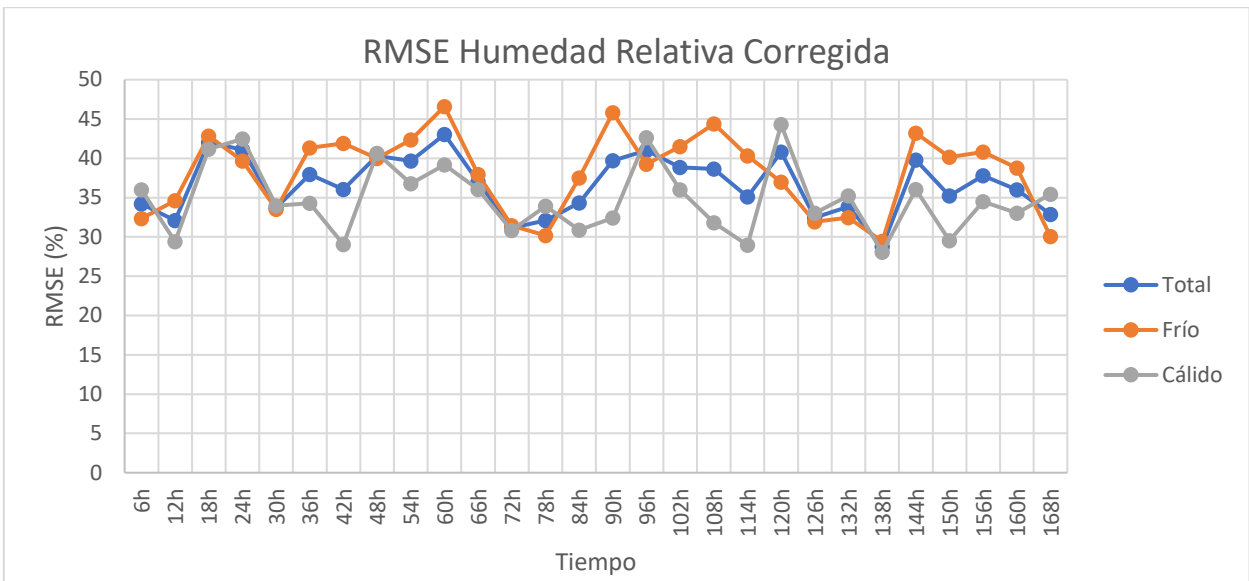


Figura 5.14 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa Corregida

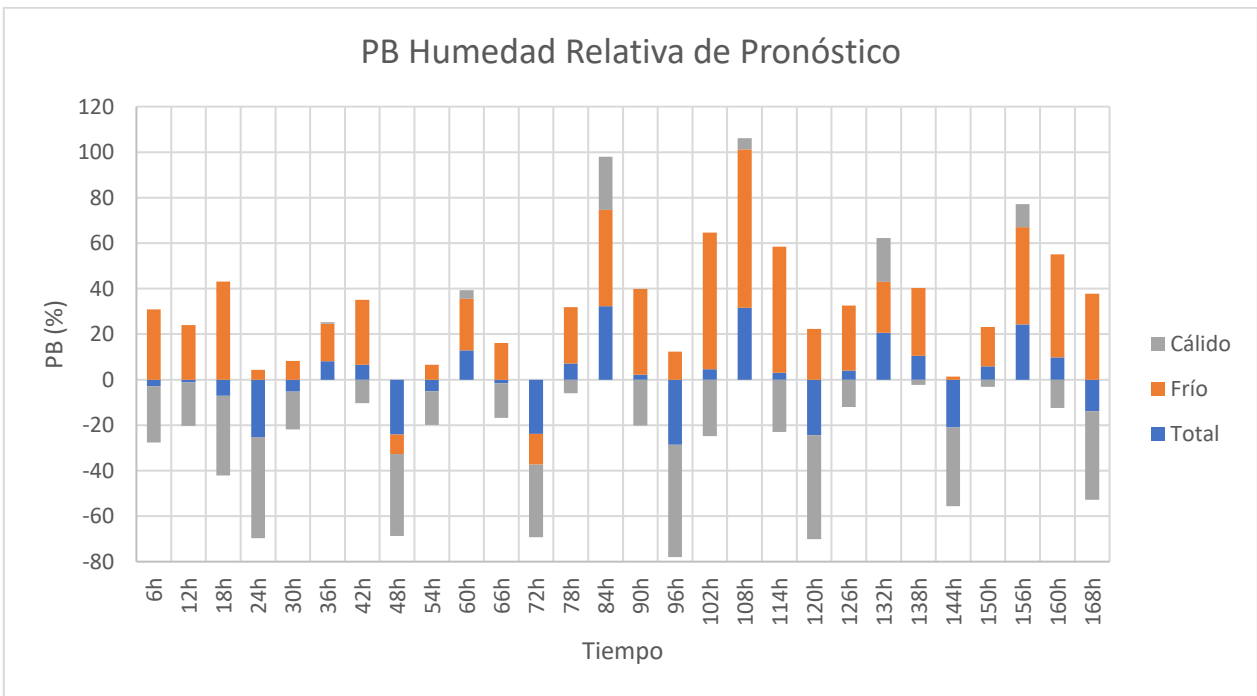


Figura 5.15 PB en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa de GFS

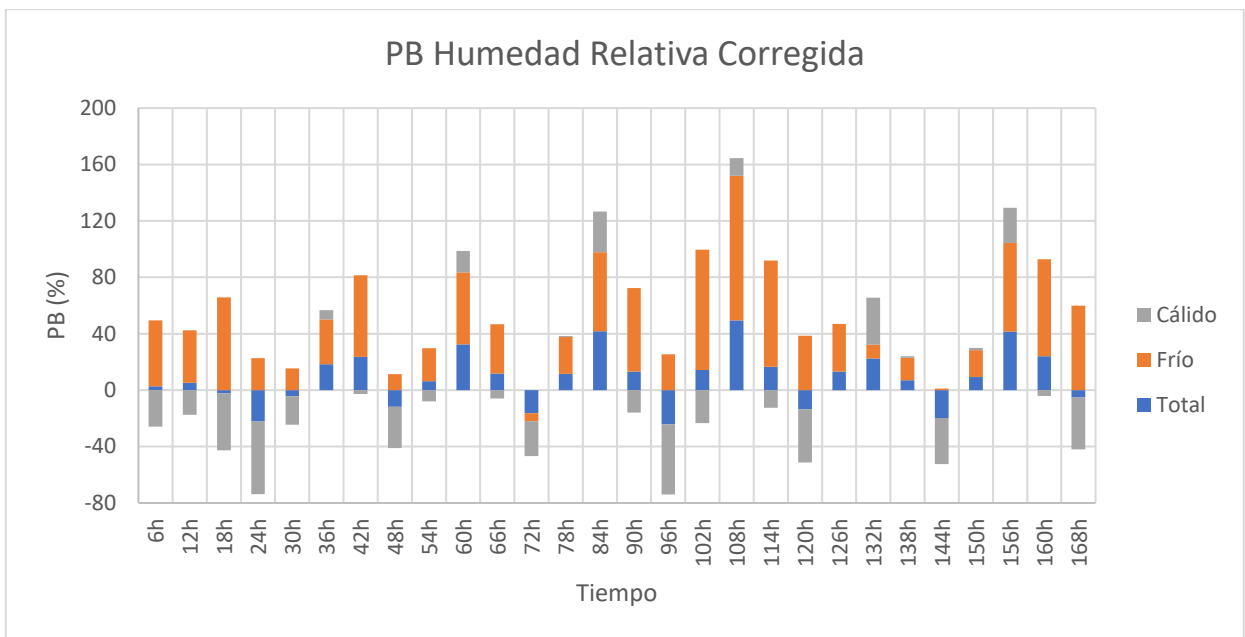


Figura 5.16 PB en época cálida, fría y temporada completa de Humedad Relativa Corregida

- Velocidad de Viento

Se escoge la velocidad de viento que corresponde a de 2 m sobre el nivel del terreno. Al igual que en el caso de la humedad relativa, al observar RMSE y PB no hay una tendencia clara en el tiempo. Sin embargo, el RMSE disminuye al realizar la corrección.

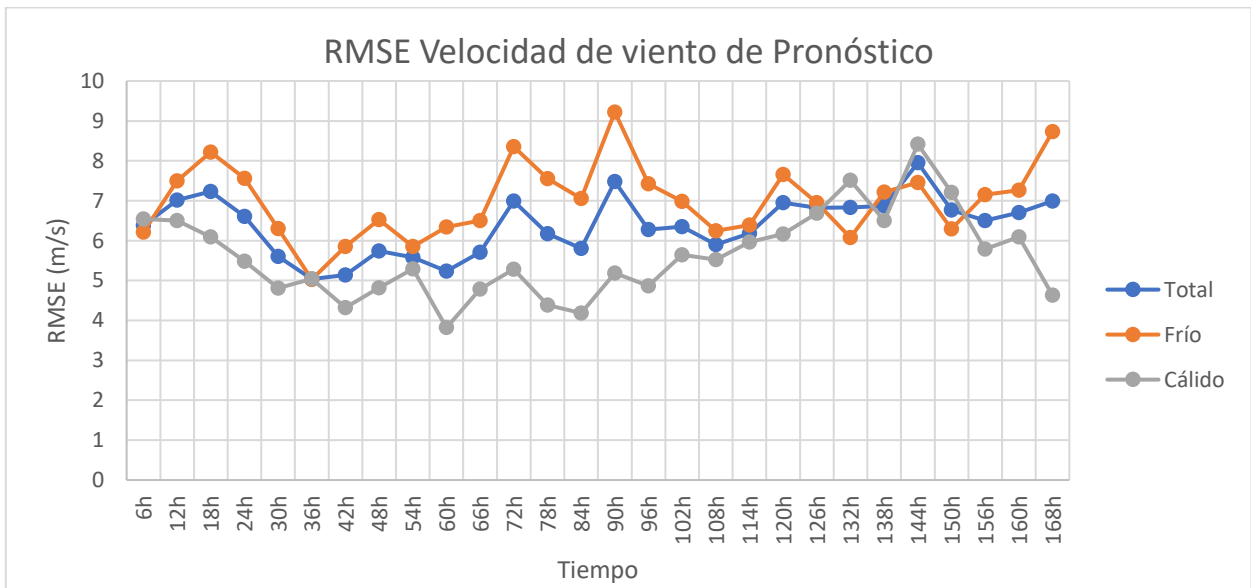


Figura 5.17 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento de GFS

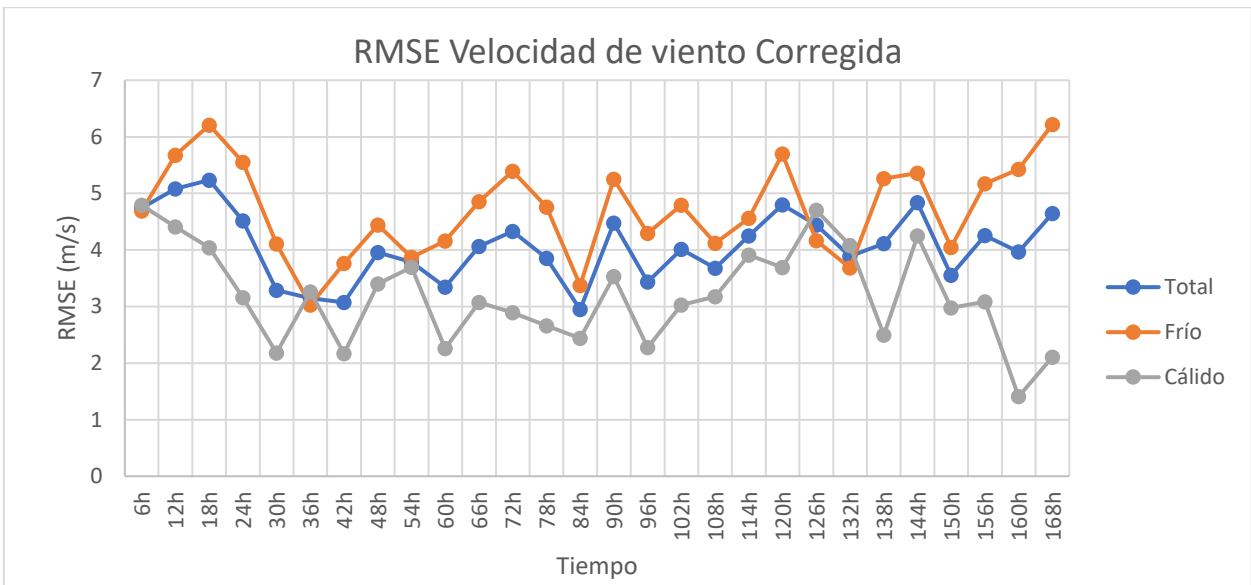


Figura 5.18 RMSE en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento Corregida

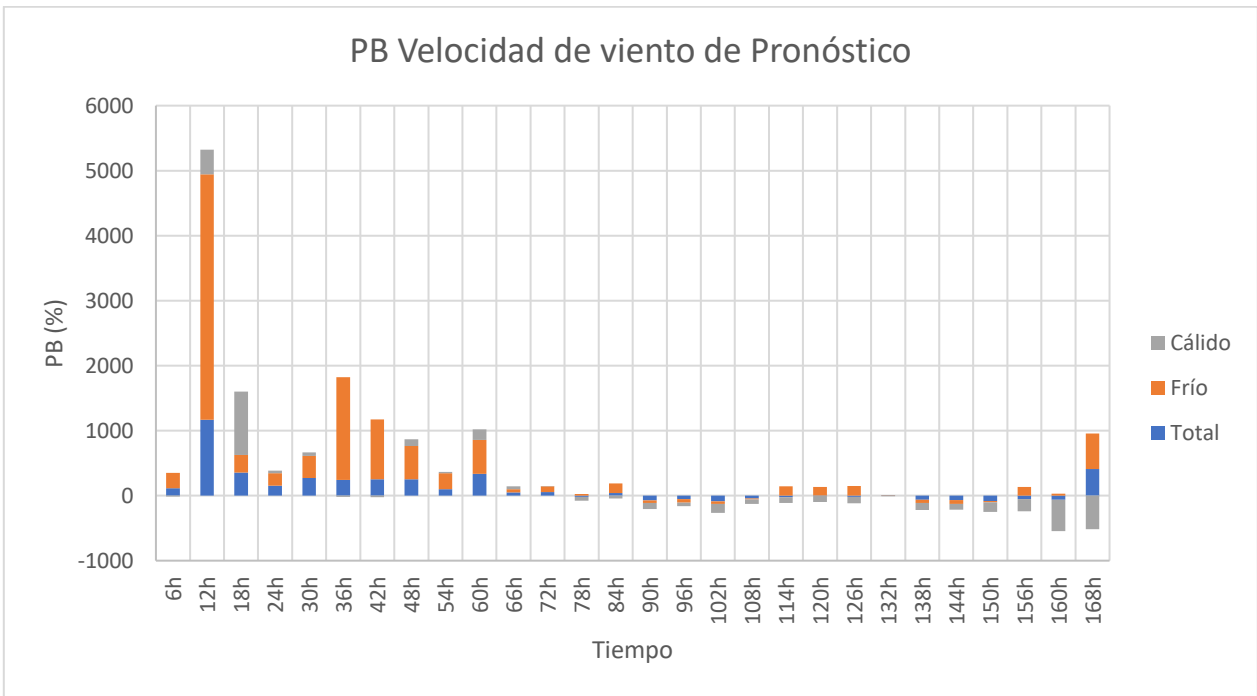


Figura 5.19 PB en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento de GFS

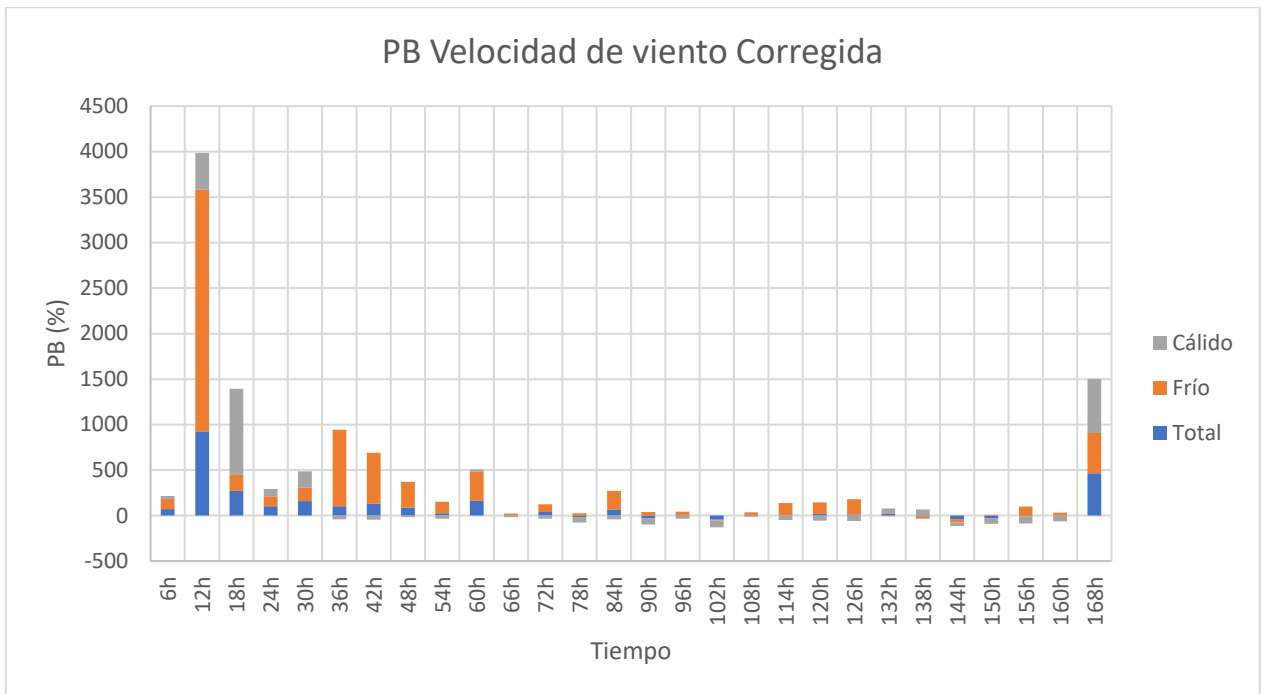


Figura 5.20 PB en época cálida, fría y temporada completa de Velocidad de viento Corregida

El proceso de corrección mediante Quantile Mapping entrega resultados en el que las métricas de evaluación, en el mayor de los casos, no presentan disminución de sus valores, es decir, no es posible notar que la eficiencia de los pronósticos meteorológicos varíe. Solo al analizar la precipitación acumulada, se observa claramente la disminución del valor del RMSE, el que se reduce en más de 40 mm por intervalo de tiempo. Es posible mejorar estos resultados al aumentar la zona de estudio y por tanto, las celdas con información.

Al aumentar el horizonte de tiempo desde la actualización del pronóstico meteorológico, no hay una correlación con la eficiencia de las predicciones en el caso de la húmedas relativa y velocidad de viento. En cambio, al analizar la temporalidad en la temperatura, se presentan ciclos dependientes de la hora del día y en los resultados de precipitación acumulada se observa que mientras mayor es el horizonte, mayor es el error asociado.

5.2.2 Series de datos observados, pronósticos meteorológicos y corregidos

A continuación, se presentan las forzantes que se obtienen de manera observada, simulada de pronóstico meteorológico y corregida. Es posible notar, que al realizar la corrección, las variables conservan la distribución de los valores, sin embargo, el valor varía su magnitud en función de las observaciones. La actualización de los pronósticos se realiza cada una semana, por lo que el máximo período de adelanto es una semana.

En el caso de la temperatura, en la Figura 5.21 se observa que la temperatura observada posee menores valores en la época de invierno y mayores en verano, en comparación con el pronóstico y los datos corregidos.

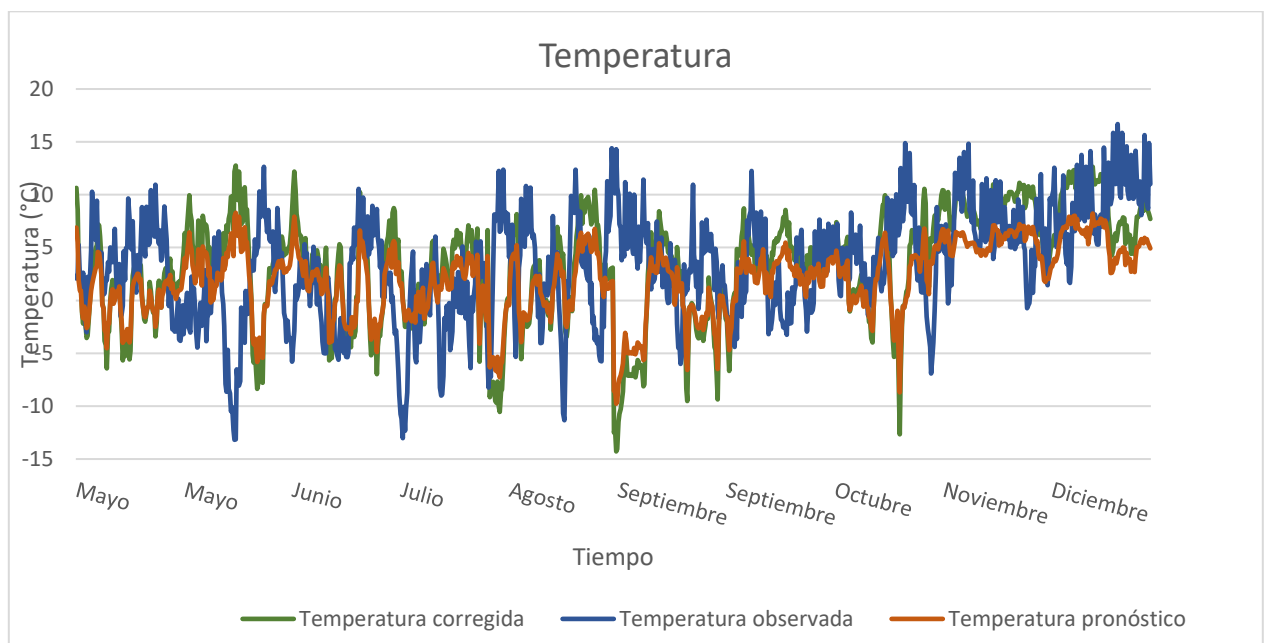


Figura 5.21 Temperatura observada, pronosticada con GFS y Corregida

En la Figura 5.22 se observa que el pronóstico simula más eventos de precipitación y de menor magnitud. A pesar de realizar la corrección, estos nuevos valores conservan la cantidad de eventos que presenta el pronóstico, aunque de mayor tamaño.

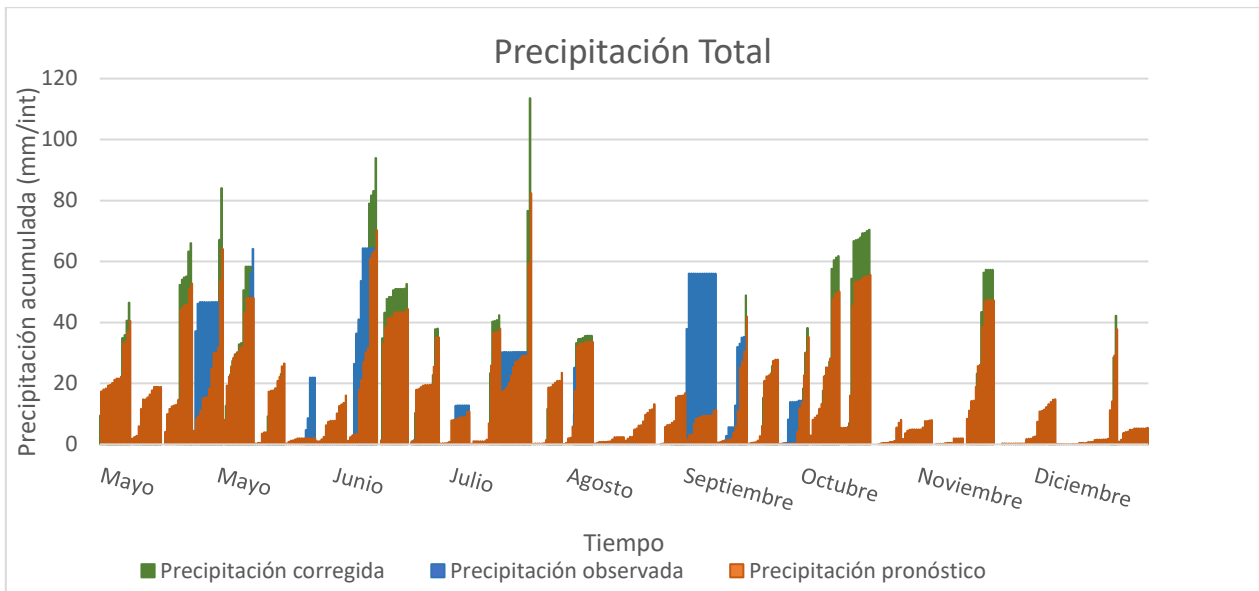


Figura 5.22 Precipitación total observada, pronosticada con GFS y Corregida

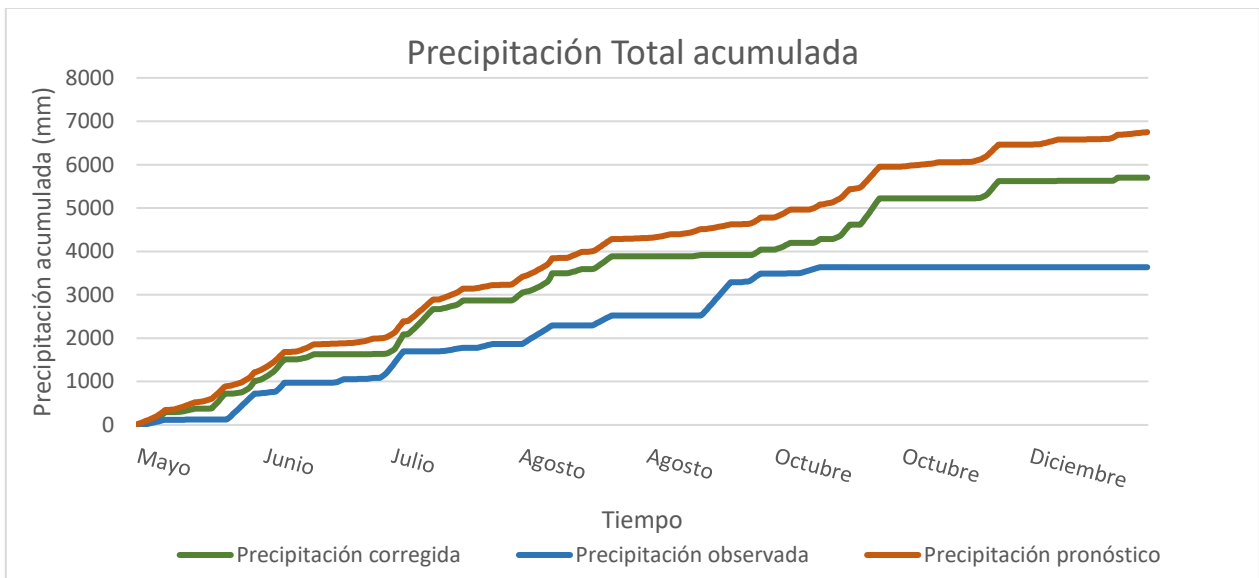


Figura 5.23 Precipitación total acumulada, pronosticada con GFS y corregida

En Figura 5.24 se observa claramente el cambio entre la Humedad Relativa del pronóstico meteorológico crudo y corregido, ya que la oscilación de los valores aumenta considerablemente, debido a la influencia de los registros observados en la estación meteorológica. En la Figura 5.25 se presenta la velocidad de viento, la que experimenta disminuciones de sus valores al realizar la corrección.

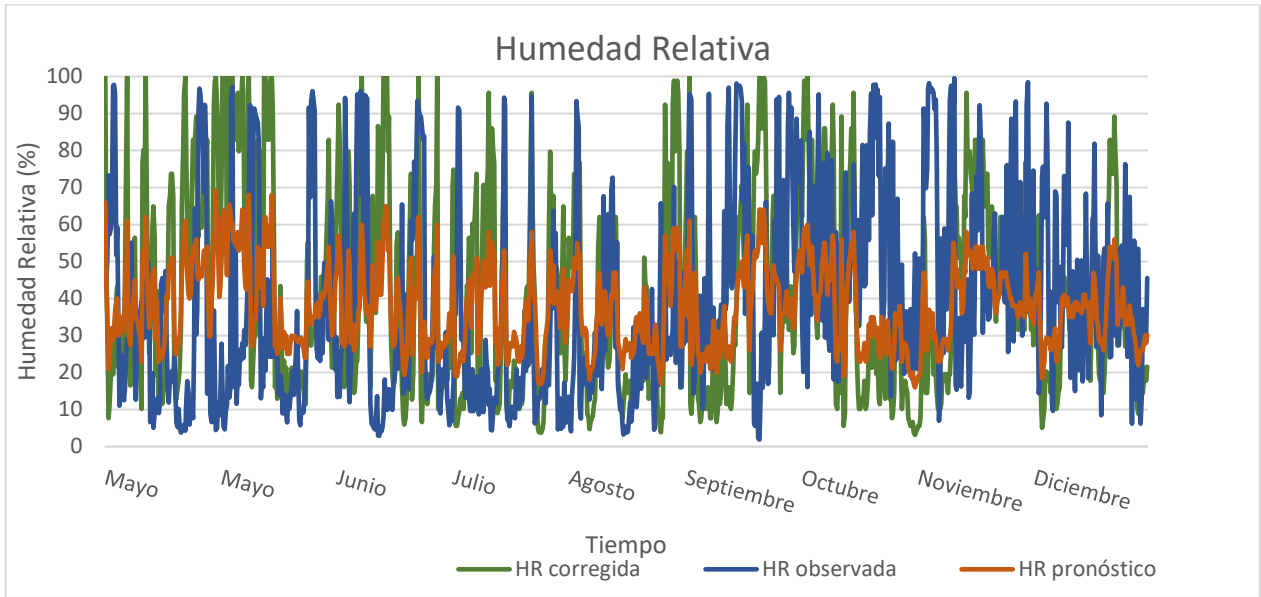


Figura 5.24 Humedad Relativa observada, pronosticada con GFS y Corregida

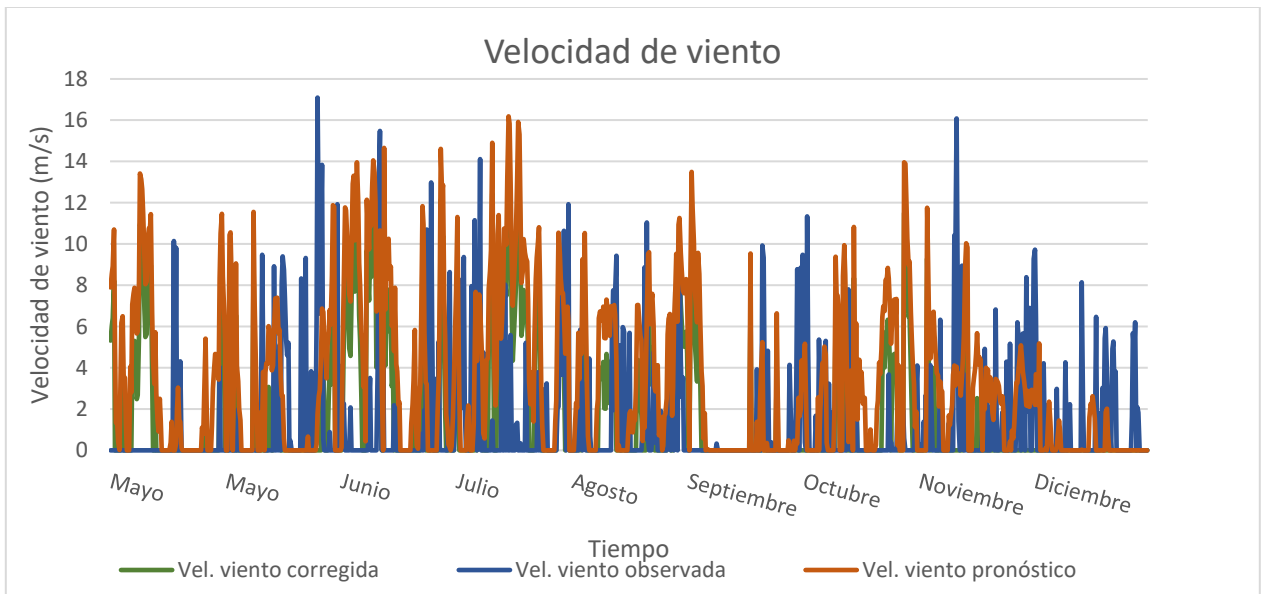


Figura 5.25 Velocidad de viento observada, pronosticada con GFS y Corregida

5.3 Modelación puntual en Estación Valle Nevado

Para realizar la modelación puntual en la Estación Valle Nevado es necesario calibrar el modelo. Luego, al modelar utilizando datos observados y de pronóstico meteorológico se extraen los resultados de SWE y las componentes del balance de masa en el manto nival.

5.3.1 Calibración del modelo

La calibración del modelo se realiza de forma manual, variando los parámetros que involucran las características de la zona de estudio y los instrumentos de medición. Los parámetros que se cambian al calibrar son principalmente: el correspondiente al tipo de evaporación, determinación del estado de la precipitación y el método para la obtención de la densidad de la nieve.

Los parámetros que tienen relación con características de la zona de estudio, como por ejemplo, área, latitud, orientación, entre otros, no son modificados al calibrar, ya que se cambiarían las condiciones reales del lugar. En la tabla Tabla 5.1 se presentan los parámetros y sus respectivos valores.

Tabla 5.1 Parámetros de la modelación

Parámetro	Valor	Observación
basin_area	1 (m2)	Área mínima, ya que es puntual
hru_area	1 (m2)	Área mínima, ya que es puntual
hru_ASL	270	Orientación (Oeste)
hru_elev	3036 (m)	Elevación de la estación
hru_GSL	40	Pendiente
hru_lat	-33.32	Latitud
Ht	0.001	Altura vegetación, se escoge la mínima
Zwind	2.4	Altura a la que se mide la velocidad de viento
krs	0.16	Locación (interior)
CanopyClearing	1	Presencia de vegetación (claro)
LAI	0.1	Índice de área foliar, se escoge el menor valor
evap_type	0	Se utiliza el método de Granger
groundcover	1	Valor correspondiente a suelo desnudo
hru_tsoil	269.1 °K	Temperatura en que comienza la infiltración

Parámetro	Valor	Observación
Si	0(mm3/mm3)	Saturación inicial del suelo
catchadjust	3	Tipo de pluviómetro (Smith-Alter)
obs_elev[1]	3038 (m)	Altura de observación de temperatura y HR
obs_elev[2]	3038 (m)	Altura de observación de precipitación
snow_rain_determination	0	Determinación de lluvia o nieve por temperatura del aire
snow_density	275 (kg/m3)	Densidad de la nieve
use_rho	1	Obtención de la densidad de la nieve. Se calcula con Snobal

Como se aprecia en la Figura 5.26 y en la Tabla 5.2 el comportamiento de la altura del manto nival simulada se ajusta bastante a la registrada en la estación. La simulación que se realiza con el modelo sobreestima los valores observados con un PB de 1,5%. Sin embargo, a pesar que los valores de las métricas son razonables, el período de calibración no es completamente representativo de la temporada completa.

En los meses de junio y julio, el modelo presenta derretimientos mayores a los observados en la estación, mientras que en el mes de agosto, la altura de nieve es sobreestimada.

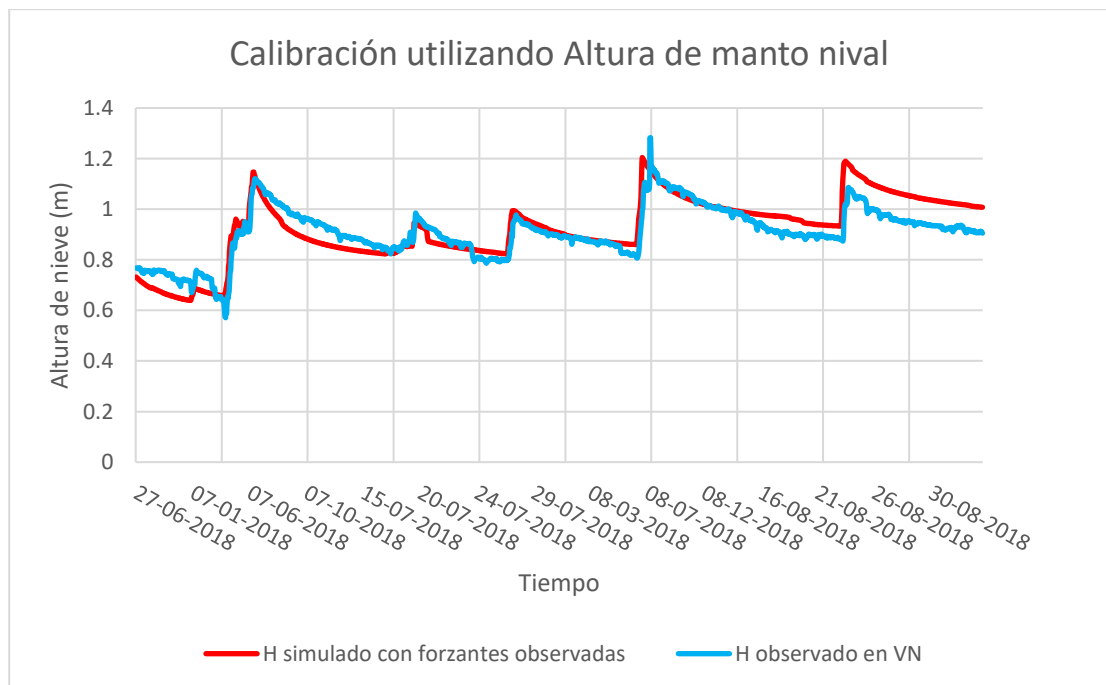


Figura 5.26 Resultado calibración modelo utilizando altura del manto nival

Tabla 5.2 Métricas de evaluación para comportamiento del modelo utilizando altura de nieve

Métricas de evaluación	Simulación
R2	0,782
KGE	0,672
PB (%)	1,503

En la Figura 5.27 se presenta la relación entre la altura simulada y la observada en la estación. Los valores resultantes de la modelación poseen mayor magnitud que los registrados en la estación.

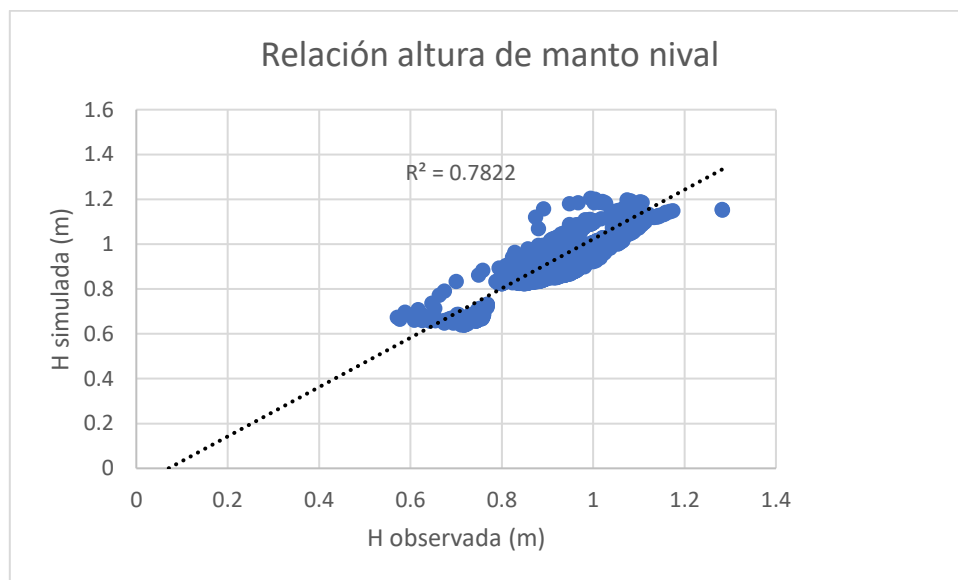


Figura 5.27 Relación de altura de manto nival observada y simulada

El período corresponde solo entre fin de junio y principio de septiembre, debido que a no se cuentan datos registrados de Equivalente en Agua de Nieve ni Altura del manto nival.

5.3.2 Modelación del comportamiento del manto nival

- Equivalente en Agua de Nieve

La modelación del Equivalente en Agua de Nieve se realiza para todo el período de estudio, es decir, la temporada de mayo a diciembre del 2018, sin embargo, la validación con registros de la estación meteorológica y nivométrica se desarrolla desde el 27 de junio hasta el 4 de septiembre del 2018, ya que los equipos solo registran mediciones en este intervalo de tiempo.

El *Snow Water Equivalent* (SWE) observado en la estación se mide mediante el equipo SnowScale, el que registra los datos cada 10 minutos. Por otro lado, se encuentra el Snow Pack Analyser, el que mide densidad de la nieve y altura del manto nival. Para obtener el SWE de este último instrumento se promedia de la densidad de cada intervalo y se utiliza la Ecuación 2.4. Se emplea el SWE obtenido de estas dos formas, ya que no está comprobado la veracidad de estos valores.

En la Figura 5.28 se presenta el SWE del período de validación de las simulaciones con forzantes observadas, forzantes de pronóstico y simulación con variables de pronóstico corregido, pero utilizando condiciones iniciales cada 168 horas, es decir, cada semana, de la simulación con datos observados en la estación Valle Nevado.

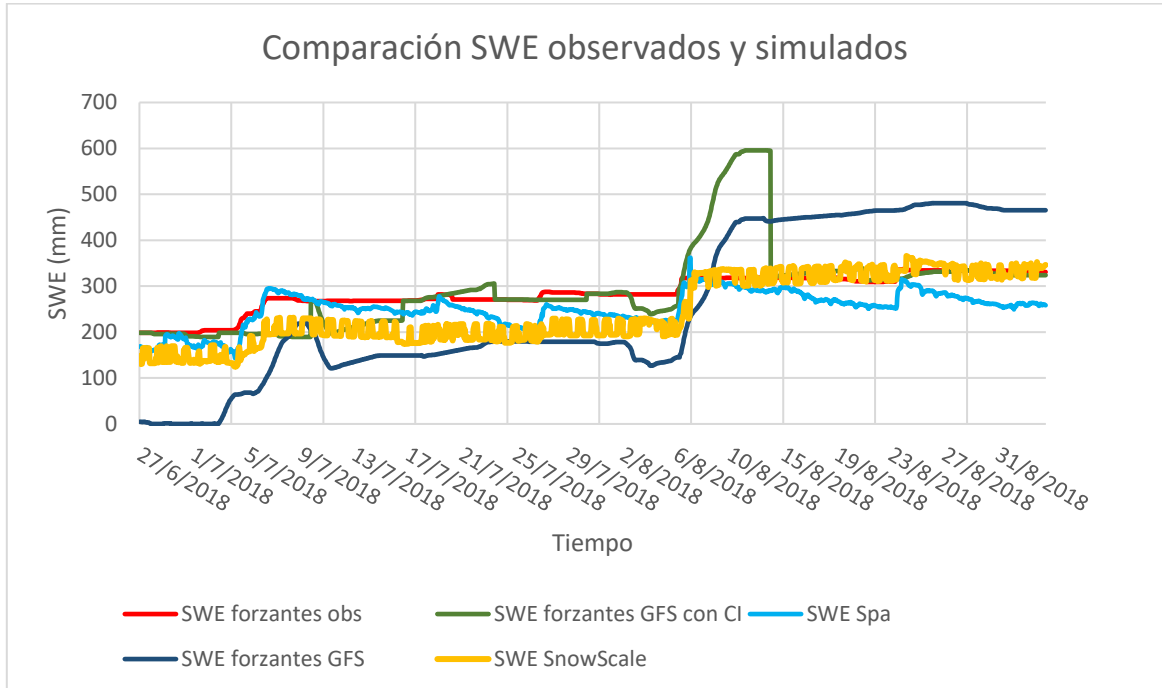


Figura 5.28 Validación SWE de simulaciones con forzantes observadas y de pronóstico

En Tabla 5.3 se observa que la simulación con variables registradas en la estación y la resultante de la modelación con pronósticos meteorológicos corregidos, pero sin condición inicial cada semana, presentan un mejor ajuste. Sin embargo, este período de alrededor de 10 semanas no es completamente representativo, ya que solo considera la etapa fría de la temporada y además, como se presenta en la Figura 5.29, en el inicio del período el Equivalente en Agua de Nieve es bastante diferente entre las simulaciones, por lo que no se puede asegurar la eficacia en la utilización de los pronósticos meteorológicos.

Tabla 5.3 Coeficiente R² y RMSE, Validación SWE obtenido de forzantes observadas y pronóstico

Simulación	R2		RMSE	
	SWE Spa	SWE SnowScale	SWE Spa	SWE SnowScale
Forzantes observadas	0,684	0,811	41,108	98,479
Forzantes GFS con CI	0,371	0,470	86,210	82,497
Forzantes GFS	0,481	0,915	141,520	56,861

A pesar de lo anterior, el ajuste obtenido por la forzante observada confirma que la calibración realizada utilizando la altura del manto nival representa correctamente la zona de estudio.

En la Figura 5.29 se presenta el SWE de la temporada completa, modelado con CHRM, con forzantes observadas y de pronóstico. Las fechas y las divisiones verticales indican el momento de actualización de los pronósticos meteorológicos. Este proceso ocurre cada 168 horas, es decir, una semana. Además, en el caso del SWE utilizando pronósticos meteorológicos y condición inicial semanalmente empleando valores observados (SWE_{fp_ci}, como se nombra en el gráfico) cada división vertical indica el momento en el que se impone la condición inicial, por lo que en estos puntos el SWE es igual al obtenido con la simulación del que utiliza como forzantes valores observados. Debido a lo anterior, se producen grandes diferencias en la simulación de SWE en intervalos de tiempo nulos, lo que se podría traducir en derretimiento, si es que ocurriera a medida que las horas avanzan. Sin embargo, como sucede en puntos entre simulaciones, no corresponde nombrar a este fenómeno como derretimiento.

Además, en la Figura 5.29 se presentan dos puntos en que el SWE de las dos modelaciones que incorporan pronósticos meteorológicos aumentan considerablemente, más de 200 mm, en intervalos menores a una semana. Esta situación se debe, en parte, a dos eventos de precipitación que el pronóstico meteorológico indica que suceden, pero que en los registros de precipitación de la estación Valle Nevado, se miden con menor magnitud. Estos eventos se presentan en la Figura 5.22, donde se observa que a principios del mes de agosto existen valores sobre 100 mm, mientras que los datos

observados poseen valores cercanos a 30 mm. En los siguientes gráficos, “fo” se refiere a forzantes observadas, “fp” a forzantes de pronóstico y “fp_fi” a forzantes de pronóstico y la utilización de condiciones iniciales semanalmente.

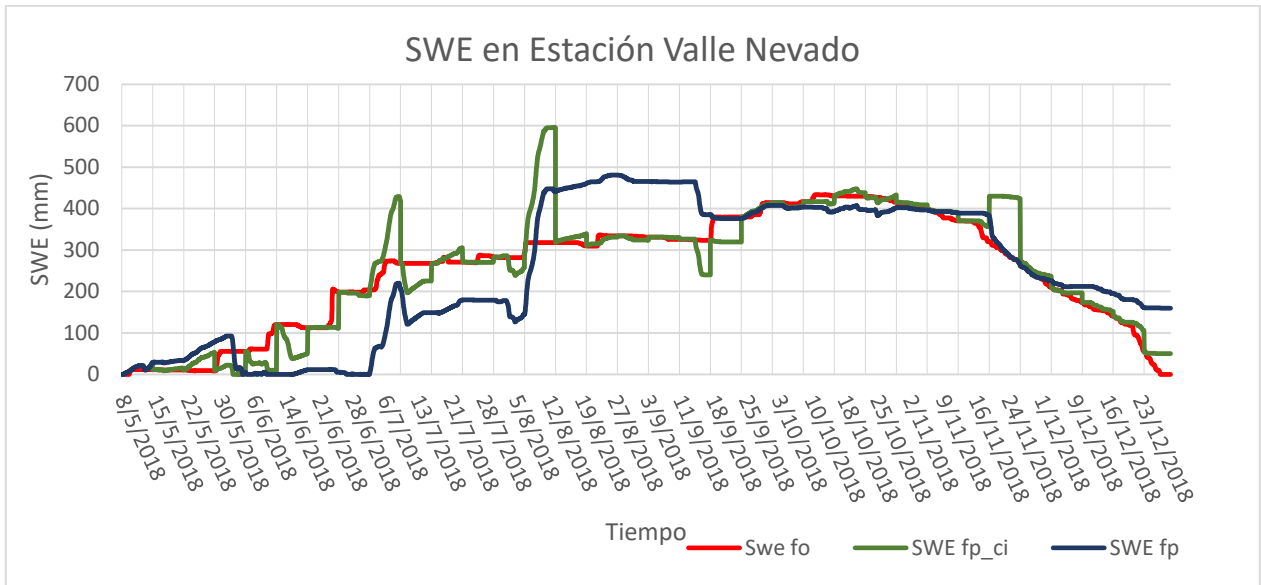


Figura 5.29 Equivalente en Agua de Nieve temporada completa utilizando CHRM

Para analizar con mayor profundidad la situación que se describe anteriormente, se realiza un análisis de sensibilidad, el que se presenta en Figura 5.30, donde se presentan diferentes simulaciones de SWE de la semana 14 (semana donde se produce el mayor aumento de SWE) de la temporada que se estudia, resultante de la modelación con variables de pronóstico corregidas y no corregidas, con condiciones iniciales resultantes de la simulación con variables observadas.

En rojo, se presenta el SWE al utilizar variables observadas en la estación Valle Nevado. Es posible notar que todas las simulaciones se inician en un mismo punto, lo que se debe a que la condición inicial de todas es la misma, la que corresponde al valor del SWE con forzantes observadas.

Al corregir todas las variables se obtiene un resultado en que su valor máximo es 500 mm. Por lo tanto, posee una diferencia de 50 mm con la simulación en que solo se corrige la precipitación y la velocidad de viento. En cambio, al corregir solo la precipitación con la temperatura o humedad relativa, se alcanzan resultados con diferencias por sobre los 100 mm. Por otro lado, al corregir solamente la precipitación, el SWE aumenta en 200 mm aproximadamente, lo que sugiere que las demás variables también son un factor relevante. Finalmente, al corregir la precipitación y la velocidad de viento se obtienen valores similares a la situación en que se corrigen todas las forzantes, por lo tanto, esta

variable influye en gran medida en la modelación, disminuyendo el proceso de acumulación de nieve.

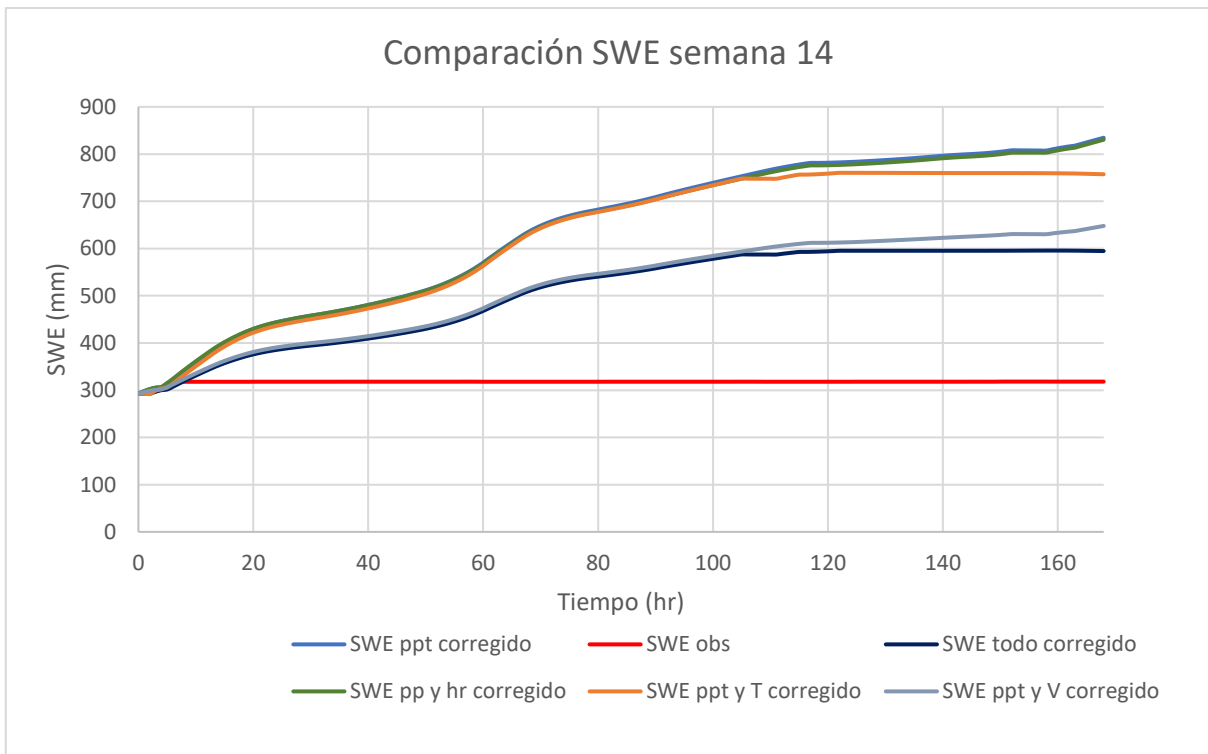


Figura 5.30 Simulaciones de SWE utilizando forzantes observadas y de pronóstico corregidas y no corregidas

En la Figura 5.31 se observa que el Equivalente en Agua de Nieve simulado con variables corregidas del pronóstico meteorológico GFS (Global Forecast System) y con condiciones iniciales en cada semana provenientes de la simulación con forzantes observadas, posee un coeficiente R^2 de 0,87, lo que indica que las simulaciones entregan resultados similares entre sí. Esta situación se produce, debido a la imposición de la condición inicial en cada semana, lo que provoca que cada 168 horas, el SWE de las dos simulaciones que se estudian, sean iguales.

Por otro lado, en la Figura 5.32 se presenta la relación entre el SWE simulado con forzantes observadas y el SWE modelado con variables de pronóstico meteorológico corregido. El coeficiente R^2 es 0,69, lo que indica un resultado aceptable, a pesar de no contar con condiciones iniciales o algún proceso de asimilación de datos.

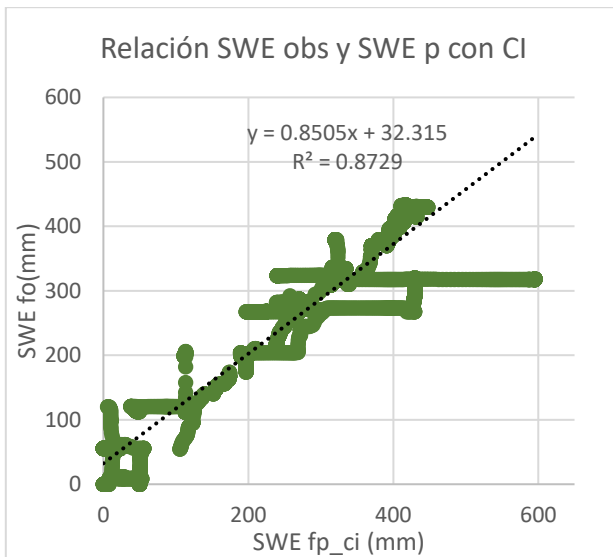


Figura 5.31 Relación entre SWE simulado con forzantes observadas y de pronósticos aplicando condición inicial semanalmente

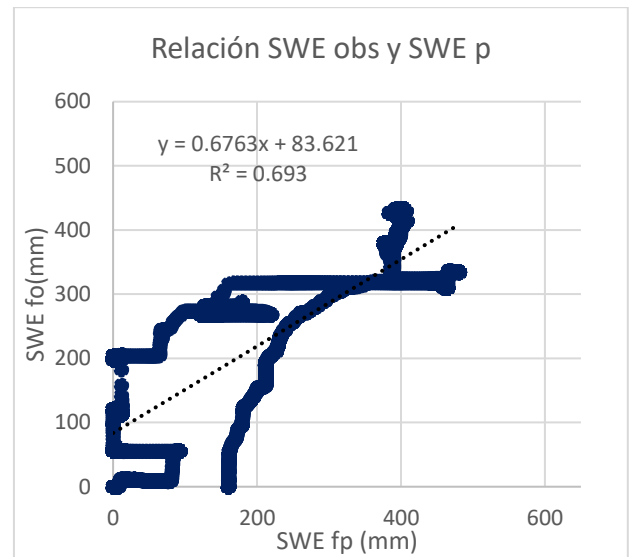


Figura 5.32 Relación entre SWE simulado con forzantes observadas y de pronósticos

Las variables que intervienen en el balance de masa del manto nival son la precipitación, derretimiento, sublimación y transporte de nieve a causa del viento. El primero se calcula mediante el módulo de CHRM “SNOBALCHRM”, al igual que el SWE. Por otro lado, la sublimación y transporte por viento se obtiene a través del módulo “PBSMSNOBAL”, como se menciona en la sección de construcción del modelo puntual.

A pesar que la evaporación también interviene en el balance de masa, no se considera en este análisis, ya que las simulaciones realizadas solo entregan valores de evaporación en algunos intervalos horarios del mes de diciembre, con valores no superiores a 1 mm. Esta situación se presenta tanto en el caso de la utilización de forzantes observadas, como al emplear forzantes de pronóstico meteorológico. Una posible explicación es que al no ingresar al modelo datos registrados de radiación se utilizan más algoritmos para su cálculo, los que pueden incrementar los errores.

- Determinación de precipitación sólida y líquida

La precipitación total está compuesta por la lluvia y la nieve, al ser una zona con una altura de 3036 (m.s.n.m) la precipitación sólida es predominante. En CRHM se ingresa la precipitación total registrada y al estar entre las forzantes la temperatura, el modelo identifica qué tipo de precipitación se registra en cada intervalo de tiempo.

En la Figura 5.33 se observa que al integrar al modelo las variables de pronóstico meteorológico, la precipitación líquida es bastante elevada, alcanzando un valor acumulado cercano a los 600 mm. En cambio, al utilizar forzantes registradas en la estación Valle Nevado, el total de lluvia es 2,8 mm. Esta situación se explica debido a la diferencia de temperatura entre la de pronóstico meteorológico y observada.

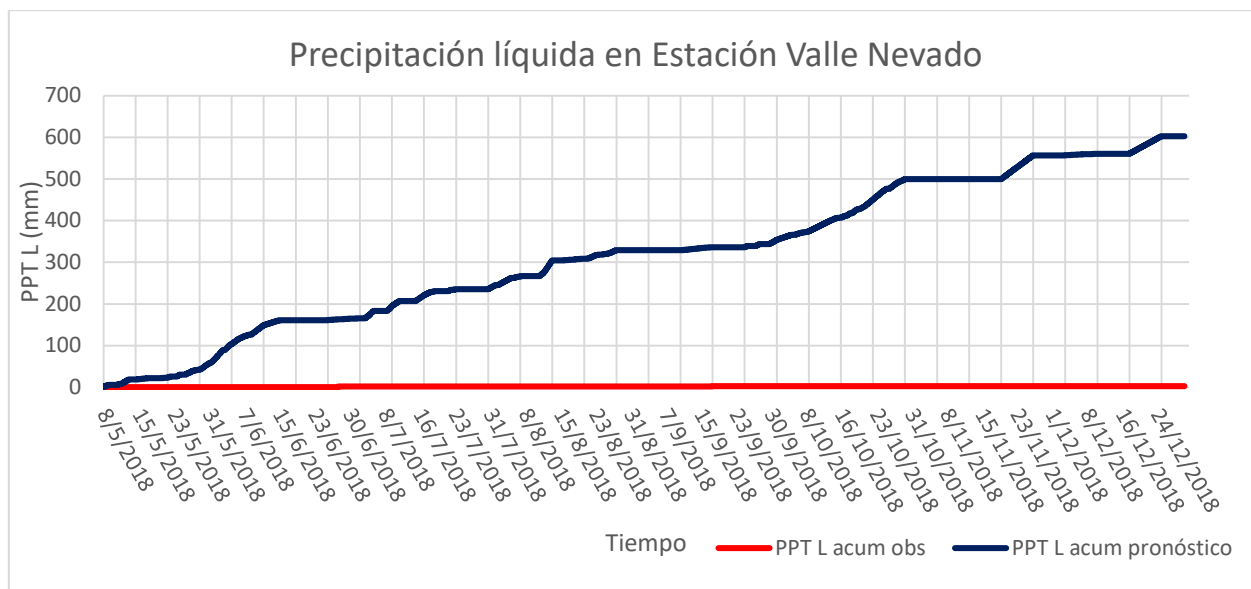


Figura 5.33 Precipitación líquida acumulada observada y de pronóstico meteorológico

A pesar que la temperatura promedio del pronóstico meteorológico es menor que la registrada en la estación, en la Figura A.21 del Anexo C se observa que cuando hay una tormenta la temperatura disminuye considerablemente. Además, en la Figura A.22 del Anexo C es posible notar que la precipitación que se obtiene del pronóstico posee mayor distribución en el tiempo, pero menores magnitudes.

En la Figura 5.34 se observa que la precipitación sólida de pronóstico meteorológico alcanza un valor cercano a los 1000 mm, en cambio, al utilizar forzantes observadas su valor es 500 mm, aproximadamente.

Al analizar estos resultados se obtiene que el porcentaje de lluvia considerando la precipitación total, aumenta de un 0,6%, al emplear forzantes observadas, a un 38,1%, utilizando pronósticos meteorológicos. Además la precipitación total es 505 mm y 1580 mm, con valores predichos y registrados en la estación, respectivamente. Lo anterior indica, que tanto la precipitación, como la temperatura son afectadas por la sobre estimación que realiza el pronóstico sobre estas variables.

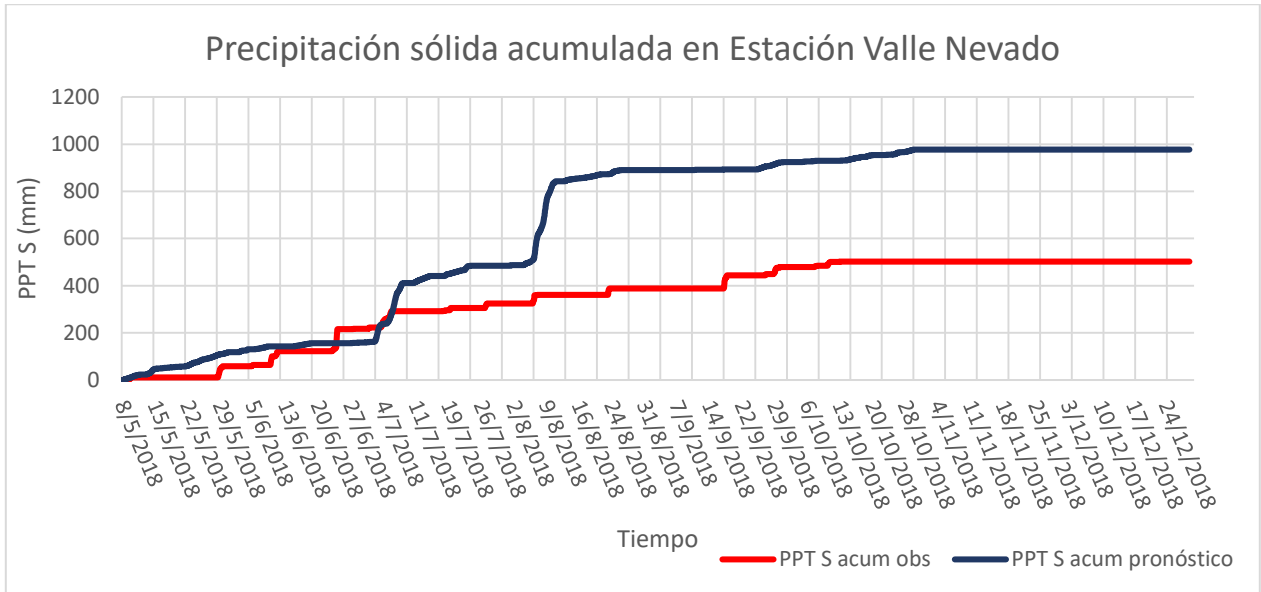


Figura 5.34 Precipitación sólida acumulada observada y de pronóstico meteorológico

- Derretimiento

En la Figura 5.35 y Figura 5.36 se presenta el derretimiento horario y derretimiento acumulado en la temporada de mayo a diciembre del 2018, simulado mediante la plataforma CHR.M.

En la Figura 5.35 se observa que el derretimiento simulado con forzantes observadas se concentra en los meses de octubre, noviembre y diciembre, mientras que los que utilizan variables de pronóstico se presentan durante toda la temporada, en intervalos menores, pero con mayor magnitud, alcanzando los 5 mm/hr en algunos casos. Un factor que afecta al derretimiento del manto nival es la precipitación, ya que si ocurre en forma líquida acelera el derretimiento, lo que se ve reflejado en esta ocasión, ya que se presenta en épocas del año no recurrentes y en gran cantidad.

En la Figura 5.36 se presenta el derretimiento acumulado, es posible notar que la mayor acumulación, en el caso de la simulación con forzantes observadas, se produce desde fin de octubre, hasta el fin de la temporada, mientras que el resto del tiempo se mantiene aproximadamente en 0. Por otro lado, las simulaciones que se realizan con variables de pronósticos mantienen comportamientos muy similares, a pesar de la diferencia de SWE que presentan. Esto se debe a que en cada intervalo de tiempo poseen las mismas forzantes, cambiando solo la condición inicial.

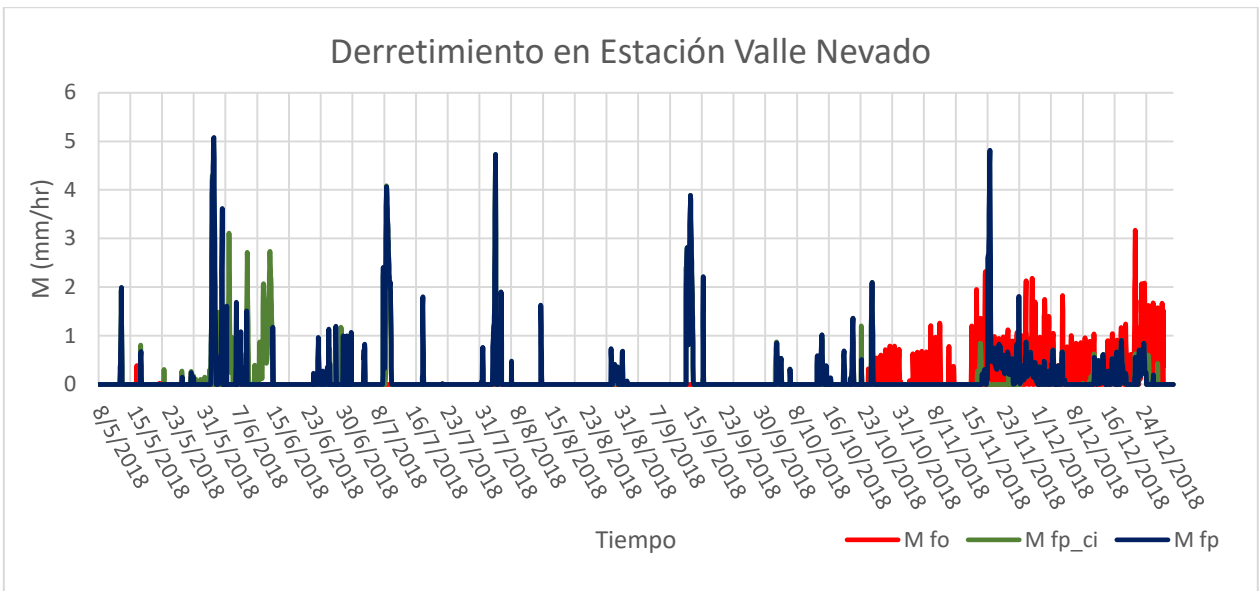


Figura 5.35 Derretimiento por intervalo simulado con forzantes observadas y de pronóstico

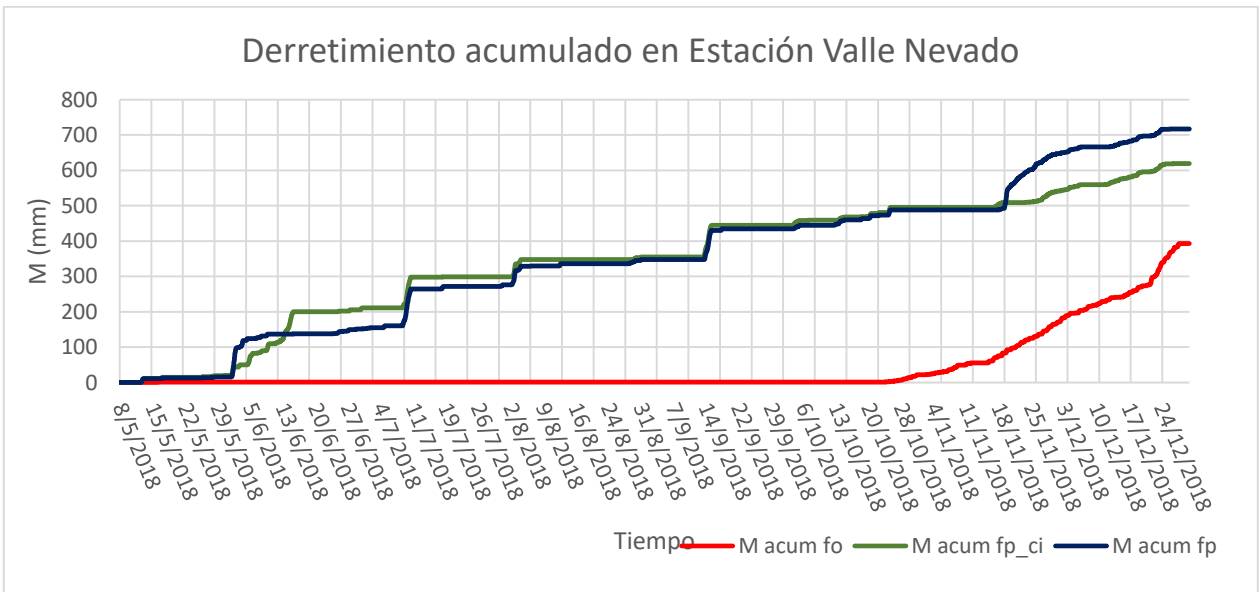


Figura 5.36 Derretimiento acumulado simulado con forzantes observadas y de pronóstico

- Transporte por viento

Otro factor que interviene en el balance de masa, corresponde al transporte por viento se presenta en los gráficos presentados en la Figura 5.37 y Figura 5.38, transporte por intervalo horario y acumulado, respectivamente.

En la Figura 5.37 se observa que los valores simulados con forzantes de pronóstico son iguales, por lo que no se logra apreciar la línea verde que representa el transporte por viento. Los valores que se obtienen de la simulación con variables observadas poseen mayor magnitud, alcanzando resultados superiores a 2 mm/hr, en cambio, al emplear predicciones meteorológicas, al modelar los valores se encuentran por debajo de 1 mm/hr durante toda la temporada.

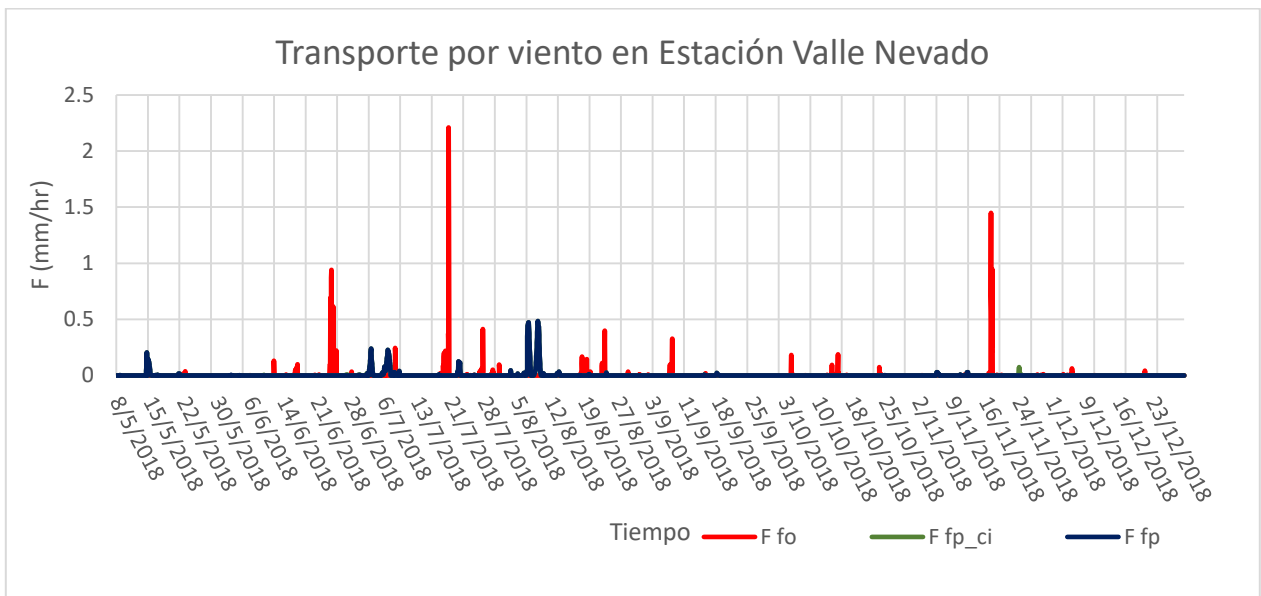


Figura 5.37 Transporte por viento por intervalo simulado con forzantes observadas y de pronóstico

En la Figura 5.38 se grafica el mismo comportamiento anterior, sin embargo, es posible apreciar que el transporte por viento acumulado al término de la temporada es bastante similar, 24 mm al utilizar forzantes observadas, 25,7 mm al emplear pronósticos y condición inicial en cada semana y 25,2 mm con variables de pronósticos. Lo anterior se produce, debido a que a pesar de poseer magnitudes menores, se produce este fenómeno en mayor cantidad de intervalos. El resultado de la modelación de esta variable refleja el comportamiento del viento de pronóstico meteorológico y construido con los datos de la cuenca experimental Piuquenes.

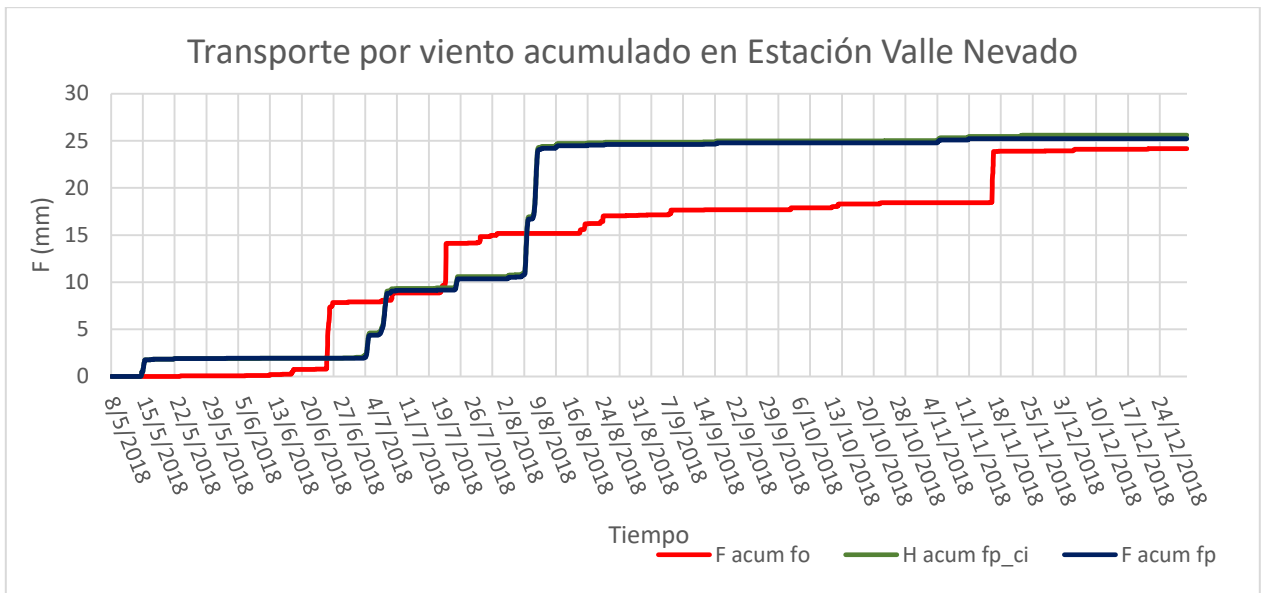


Figura 5.38 Transporte por viento acumulado simulado con forzantes observadas y de pronóstico

- Sublimación

La sublimación posee un comportamiento similar al transporte por viento. Al igual que en el caso anterior, las simulaciones con variables de pronóstico se poseen los mismos valores, a pesar de incluir condiciones iniciales.

En la Figura 5.39 se observa que los valores simulados con forzantes de pronóstico son iguales, por lo que no se logra apreciar la línea verde que representa la sublimación con forzantes de pronóstico y condición inicial en cada semana. Los valores que se obtienen de la simulación con variables observadas poseen mayor magnitud, alcanzo resultados superiores a 4 mm/hr, en cambio, al emplear predicciones meteorológicas, al modelar los valores se encuentran por debajo de 1 mm/hr durante toda la temporada.

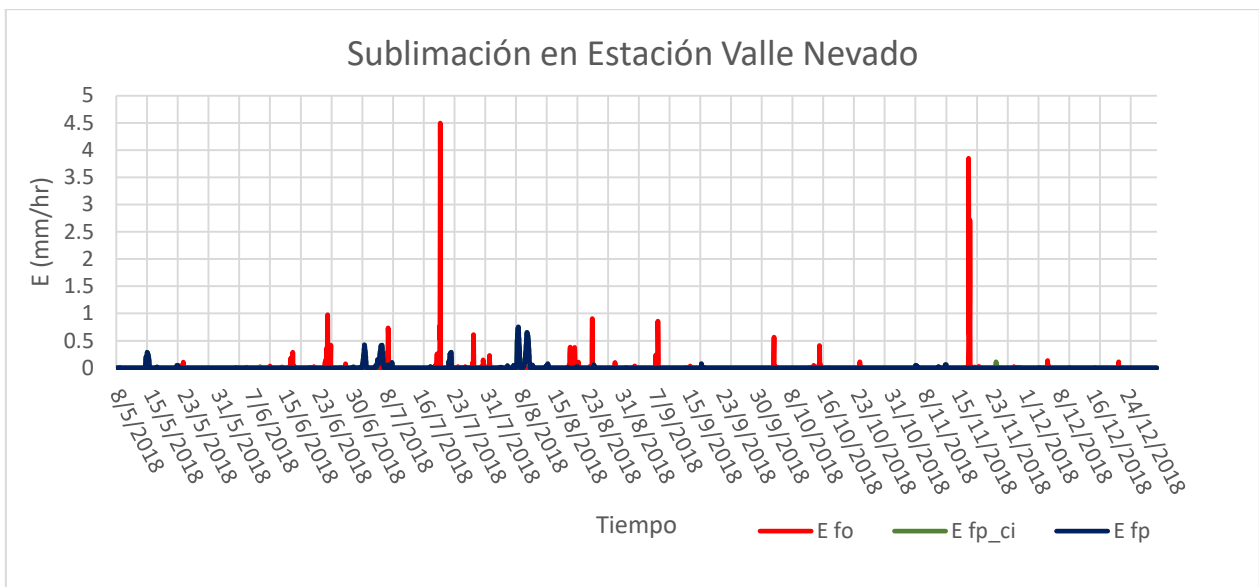


Figura 5.39 Sublimación por intervalo simulado con forzantes observadas y de pronóstico

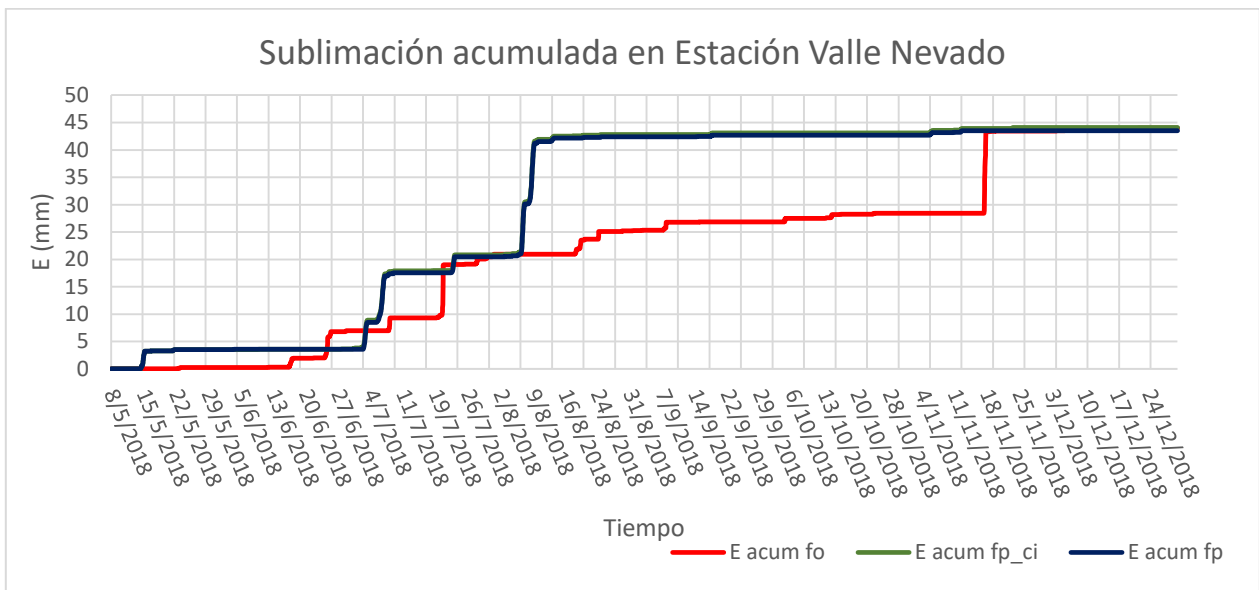


Figura 5.40 Sublimación acumulado simulado con forzantes observadas y de pronóstico

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un resumen con los principales valores resultantes del balance de masa. En ambas modelaciones existe masa que entra al sistema, pero que al analizar los valores del balance, no salen. Al ocupar variables meteorológicas observadas, el total de los flujos que salen son un 91,3% del total de la precipitación, mientras que en el segundo caso, tan solo un 49,7%.

Uno de los factores que influye en la situación que se describe anteriormente es el derretimiento. En el caso de la modelación utilizando forzantes observadas, el 77,8% del total de la precipitación corresponde a derretimiento, mientras que al emplear forzantes de pronóstico el 45% del total es derretimiento. Sin embargo, equivale al 73% de nieve caída. Por lo tanto, la simulación de este proceso es similar en ambos casos, pero en el segundo la precipitación líquida posee valores con grandes magnitudes, lo que afecta en el proceso de acumulación y derretimiento. Además, la cantidad de precipitación al ocupar variables de pronóstico es mucho mayor, por lo que no toda la nieve se derrite durante el período de estudio.

Otro factor que influye, es la sublimación por transporte de nieve. El valor que posee esta variable es el 4,8% y 2,6% de la precipitación sólida, con forzantes observadas y de pronóstico, respectivamente. Sin embargo, en DeWalle & Rango (2008) se señala que el rango que posee esta variable es de 10 a 40% de la precipitación sólida anual, dependiendo de las características de viento de la zona. Este error puede suceder a causa de la velocidad del viento, ya que en ambos casos no se utiliza esta forzante registrada directamente en la estación.

Tabla 5.4 Resumen Balance de masa en estación Valle Nevado

Forzantes	Observaciones		Pronósticos	
	mm	%	mm	%
Lluvia	2,78	0,55	602,55	38,13
Nieve	502,32	99,45	977,78	61,87
Derretimiento	393,15	-77,84	716,62	-45,35
Transporte	24,15	-4,78	25,22	-1,60
Sublimación	44,00	-8,71	43,53	-2,75

Capítulo 6: Discusión y conclusiones

6.1 Discusión

6.1.1 Evaluación y corrección de pronósticos meteorológicos

Los resultados de la evaluación de las variables del pronóstico meteorológico *Global Forecast System* (GFS) se obtienen al utilizar 4 métricas de evaluación, correspondientes al coeficiente R^2 , RMSE, PB y NSE. Al emplear la primera, en ninguna variable se observa una tendencia que indique que mientras mayor sea el horizonte de tiempo, el comportamiento del pronóstico es peor, gráficos que se presentan en el Anexo B.

Por otro lado, al analizar los resultados de la evaluación que se obtiene utilizando RMSE, se observa que en el caso de la temperatura, se produce un comportamiento que depende de la hora del día en que se realiza el análisis. Sin embargo, no existe una relación entre el desfase a la predicción que posee el punto en que se encuentra cada horizonte de tiempo. Esta situación si ocurre en Werth & Garret (2011) en el caso de la temperatura y velocidad de viento. No obstante, en aquel estudio se utiliza un pronóstico de conjuntos, es decir, probabilístico. Esto permite cuantificar la incertidumbre. Además el área que se emplea para ese trabajo es bastante más extensa, con zonas del hemisferio norte. Al contemplar un área de trabajo mayor, se utilizan más estaciones meteorológicas para evaluar.

Al observar la evaluación con RMSE en el caso de la velocidad de viento y humedad relativa, no se presenta ninguna relación con el horizonte de tiempo u hora del día. En cambio, en el caso de la precipitación total acumulada en intervalos de 12 horas sí se presenta una correspondencia entre el tiempo que transcurre entre la predicción y el sesgo asociado, el que a las 6 horas posee valores cercanos a 10 mm, mientras que en el último horizonte de tiempo es 80 mm, 60 mm y 30 mm, en las temporadas cálida, total y fría, respectivamente. En Whitaker et al. (2007), se analizan datos reales con un sistema de asimilación de datos de conjunto usando el Pronóstico Global NCEP, este modelo se realiza y se compara con el Sistema de Asimilación de Datos Global NCEP (GDAS), en ambos casos, al evaluar la precipitación total utilizando RMSE, este último aumenta al aumentar la lejanía con el punto de actualización.

Al evaluar empleando *Percent bias* (PB), solo en el caso de la precipitación acumulada hay una correlación con el horizonte de tiempo, mientras que al utilizar NSE, en ningún caso se encuentra esta relación. Sin embargo, la temperatura y humedad relativa presentan un comportamiento cíclico relacionado a las horas del día.

Para la corrección de las variables de pronósticos meteorológicos se utiliza *Quantile Mapping* (QM). Al analizar la precipitación acumulada, se observa un descenso

del RMSE, cuya disminución en el valor máximo en el caso del período cálido va de 80 mm a 35 mm, aproximadamente. En Piani et al. (2010) se realiza este procedimiento y sus resultados muestran que los modelos son mejorados de manera significativa y consistente, al realizar la corrección de la precipitación. Sin embargo, los datos utilizados para la función de transferencia corresponden a un período de tiempo de 9 años y el área analizada es bastante extensa. Por otro lado, en Zhao et al. (2017) se indica que QM no es un método totalmente satisfactorio, ya que ignora la correlación entre los pronósticos sin procesar y las observaciones. Además, no puede garantizar que las variables posprocesadas sean coherentes.

Las demás variables que se utilizan, también son corregidas utilizando QM. No obstante, en las métricas de evaluación no se observa un cambio satisfactorio. Sin embargo, al comparar los resultados de la modelación con variables de pronóstico corregidas y no corregidas, si se presenta una diferencia notoria. Un ejemplo de esta situación, es la simulación que se realiza en la semana 14, donde al variar los valores de la velocidad de viento y precipitación, el SWE varía en 200 mm, aproximadamente. Esto sucede, debido a que las magnitudes de las forzantes pronosticadas se acercan a las de las mediciones en Valle Nevado.

6.1.2 Modelo puntual en CRHM

El balance energético que se realiza al modelar con CRHM es de carácter físico, por lo que al ingresar en los parámetros las características del lugar que se estudia es posible simular las propiedades fundamentales de la zona y así, determinar las propiedades del manto nival. Por esta razón, se realiza una calibración manual.

Al comparar los resultados de la simulación de altura de nieve con forzantes medidas en la estación Valle Nevado y la altura observada en la estación, se obtiene un buen ajuste. Esta situación se refleja por un coeficiente de determinación de 0,78, KGE de 0,67 y un Porcentaje de sesgo igual a 1,5%, por lo que el modelo sobreestima la altura del manto nival. Por otro lado, al comparar el Equivalente en Agua de Nieve que se obtiene de la simulación con las mismas características anteriores, se obtiene una buena correlación, la que se refleja en un R^2 igual a 0,81. Se debe señalar que las mediciones nivométricas solo se encuentran disponibles entre el 27 de junio al 4 de septiembre de 2018, por lo que no es posible saber si la relación entre los valores observados y simulados con variables registradas en la estación, se mantienen de esa manera o si se produce algún cambio en la etapa de derretimiento.

En trabajos anteriores en la zona donde se emplaza Valle Nevado y se utilizan los registros de esta estación, como Fernández (2016), también obtienen correlaciones con buenos resultados al estimar el SWE. El coeficiente NSE muestra un valor de 0,24, lo que indica que el ajuste es aceptable. No obstante, el PB de -1.06%, por lo que el modelo

subestima las observaciones. Estas comparaciones se realizan con los valores del instrumento SnowScale.

Al incluir al modelo las forzantes obtenidas de pronósticos meteorológicos y analizar los resultados de las simulaciones, se obtiene que en las 10 semanas con que se cuentan datos observados del manto nival, el SWE que se obtiene con variables de pronóstico meteorológico corregidas, sin aplicar condición inicial semanalmente, se comporta de mejor forma que al simular con las mismas forzantes, pero con condición inicial cada 168 horas. Sin embargo, al ser un período de un poco más de dos meses en la temporada fría, no es completamente representativo del comportamiento de todo el tiempo de estudio.

Al comparar el SWE simulado con forzantes observadas y en el que se utilizan variables de pronóstico meteorológico corregidas se obtiene que R^2 es 0,87 y 0,69, respectivamente. Este resultado se debe a que al imponer la condición inicial, el SWE al inicio de cada semana es igual al de la simulación con forzantes observadas. Sin embargo, la simulación en la que solo se utilizan predicciones posee una buena correlación, la que se es disminuida por períodos en que las variables de pronósticos meteorológicos tiene valores que no se relacionan con los registros.

Esto último sucede, debido a que cada celda de las predicciones poseen una dimensión de 25 km x 25 km y no se considera la altura de la zona de estudio. Por lo tanto, las forzantes no tienen valores característicos de zonas montañosas. Esta situación también influye en la simulación del derretimiento, sublimación y transporte por viento, ya que la velocidad de viento y humedad relativa son relevantes para su cálculo. Además, involucra directamente la relación que posee la precipitación sólida y líquida, aumentando la lluvia hasta alcanzar un 38,1% del total de la precipitación simulada.

6.2 Conclusiones

Estudiar la hidrología en zonas montañosas requiere levantamiento de información y observaciones en el lugar. Para esto, es necesario realizar campañas en terreno y contar con una red de estaciones nivométricas y meteorológicas. De esta forma, se obtiene un mayor conocimiento y seguimiento de las variables que afectan en el ciclo hidrológico. Contar con una metodología que permita el uso de pronósticos meteorológicos ayudaría al análisis del comportamiento del manto nival de forma actualizada.

Para utilizar pronósticos meteorológicos es necesario aplicarlos en la zona de estudio. En este caso, las propiedades de las variables del pronóstico no coincidían con las características del lugar en que se realiza la modelación, principalmente por factores topográficos. Esta situación se podría mejorar al emplear pronósticos meteorológicos con mayor resolución o abarcar áreas mayores de estudio.

Evaluando los errores de las variables de las predicciones, es posible notar que en la velocidad de viento, temperatura y humedad relativa no se presenta el comportamiento esperado, ya que el sesgo es de mayor magnitud al aumentar el horizonte de tiempo en que se encuentra. No obstante, la precipitación total acumulada sí posee esta correspondencia y además, al corregir las forzantes, solo esta última muestra una correlación en sus métricas de evaluación. Además, al corregir las variables de interés su comportamiento es el mismo. Sin embargo, la magnitud varía, acercándose a los valores observados. Por lo tanto, sí se logra evaluar y corregir los datos de pronósticos meteorológicos, pero es posible mejorar este procedimiento utilizando otro método de corrección que tome en cuenta la correlación entre pronósticos sin procesar y observaciones.

Al realizar la modelación puntual en la estación Valle Nevado se puede concluir que el SWE simulado con variables de pronósticos meteorológicos posee una buena correlación con el simulado utilizando forzantes registradas en la zona. No obstante, las razones no son completamente correctas. El Equivalente en Agua de Nieve tiene magnitudes similares a causa de la excesiva precipitación que arroja el pronóstico meteorológico. Si no fuera así, la acumulación sería considerablemente mayor, debido al gran porcentaje de lluvia presente en la simulación. Los componentes del balance de masa no poseen una buena correspondencia, a causa de la poca precisión de los pronósticos en zonas montañosas y la limitada área que se emplea en este trabajo.

Para trabajos futuros se recomienda utilizar mayor cantidad de datos, ya que en este caso, al emplear solo una temporada la corrección de los pronósticos meteorológicos no posee resultados completamente satisfactorios, como los que se obtienen en investigaciones que poseen registros de varios años. De esta forma, es posible analizar el comportamiento a través de las distintas temporadas y disminuir la incertidumbre. También, al realizar la modelación es posible utilizar algún método de asimilación de datos, como por ejemplo Filtro de Kalman y así, ajustar los valores de mejor forma.

Por otro lado, a futuro se espera realizar una evaluación del comportamiento de predicciones meteorológicas a nivel de cuenca y así, encontrar maneras para distribuir los valores espacialmente y lograr actualizar los resultados de Equivalente en Agua de Nieve y otras variables del balance de masa del manto nival de forma constante y en un área específica.

Bibliografía

- Anthes R. & Rieckh T. (2018). Estimating observation and model error variances using multiple data sets. *Atmospheric Measurement Techniques*; 11: 4239-4260.
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Maragunic, C., Salazar, C., Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. In *Proceedings of the XIV Congreso Geológico Chileno*, La Serena, Chile, 4–8 octubre 2015.
- Cornwell, E., Molotch, N. P., & McPhee, J. (2016). Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical Andes Cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), 411-430.
- Clark M., Hendrikx J., Slater A., Kavetski D., Anderson B., Cullen N., Kerr T., Hreinsson E., Woods R. (2011). Representing spatial variability of snow water equivalent in hydrologic and land-surface models: A review. *Water Resources Research*. 47: W07539.
- Comte, Michelle. 2017. Modelación hidrológica de la cuenca del río Mapocho en los Almendros usando el modelo Cold Regions Hydrological Model.
- Cornwell E., Molotch N. & McPhee J. (2016). Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical Andes Cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. *Hydrol. Earth. Syst. Sci*; 20: 411-430.
- DeWalle, D. R., & Rango, A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press.
- Fernández, Sebastián. 2016. Respuesta hidrológica de la cuenca Mapocho en los Almendros y su relación con variables de almacenamiento.
- Freudiger, D. , Kohn, I. , Seibert, J. , Stahl, K. and Weiler, M. (2017). Snow redistribution for the hydrological modeling of alpine catchments. *WIREs Water*; 4: e1232.
- Garnier B. & Ohmura A. (1970). The evaluation of Surface variations in solar radiation income. *Solar Energy*; 13: 21-34.
- Hreinsson, Einar Ö. 2008. Assimilation of a snow covered area into a hydrologic model. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Geography. University of Canterbury. New Zealand.
- Hamill T., Hagedorn R., Whitaker J. (2007). Probabilistic Forecast Calibration Using ECMWF and GFS Ensemble Re-forecasts. Part II: Precipitation. *Monthly Weather Review*; 136: 2620-2632.
- Hamill T., Whitaker J. (2006). Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts Based on Re-forecast Analogs: Theory and Application. *Monthly Weather Review*; 134: 3209-3229.

Hamlet A., Mote P., Clark M., Lettermaier D. (2005). Effects of Temperature and Precipitation Variability on Snowpack Trends in the Western United States. *Journal of Climate*; 18: 4545-4561.

Jonas T, Marty C. and Magnusson J. (2009). Estimating the snow water equivalent from snow Depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hidrology*; 378:161-167.

Mabel L, Gironás J. and Fernández B.(2014) Spatial estimation of daily precipitation in regions with complex relief and scarce data using terrain orientation. *Journal of Hidrology*; 517:481-492.

Magnusson J, Gustafsson D, Hüsler F. and Jonas T.(2014) Assimilation of point SWE data into a distributed snow cover model comparing two contrasting methods. *Water Resour*; 50:7816-7835.

Marks D., Domingo J., Susong D., Link T. & Garen D. (1999). A spatially distributed energy balance snowmelt model for application in mountain basins. *Hydrol. Process.*; 13: 1935-1959.

Marshall S., Roads J., Glatzmaier G. (1993). Snow hydrology in general circulation model. *Journal of Climate*; 7:1251-1269.

Mendoza, Pablo. 2010. Pronóstico de caudales de crecida mediante un modelo hidrológico distribuido y la asimilación de datos observados.

Morss R., Demuth J., Lazo J. (2008). Communicating Uncertainty in Weather Forecasts: A Survey of the U.S. Public. *Weather and forecasting*; 23: 974-991.

Mullen S. & Buizza R. (2000). Quantitative Precipitation Forecasts over the United States by the ECMWF Ensemble Prediction System. *Monthly Weather Review*. 129: 638-662.

Nash J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* 27(3): 282–290.

Piani C., Haerter O. & Coppola E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitación in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol*; 99: 187-192.

Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., & Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*; 21(19), 2650-2667.

Safari B. (2011). Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 15: 925-935.

SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital.

Sharma S., Siddique R., Reed S., Ahnert P., Mendoza P. & Mejia A. (2018). Relative effects of statistical preprocessing and postprocessing on a regional hydrological ensemble prediction system. *Hydrol. Earth. Syst. Sci*; 22: 1831-1849.

Thom H. (1958). A note on the Gamma distribution. *Monthly Weather Review*; 86.

Van Liew M., Arnold J. & Bosch D. (2005) Problems and potential of autocalibrating a Hydrologic model. *American Society of Agricultural Engineers*; 48(3): 1025-1040.

Werth D. & Garret. A. (2011). Patterns of Land Surface Errors and Biases in the Global Forecast System. *Mon. Wea. Rev*; 139: 1569-1582.

Winstral A., Elder K., Davis R. (2002). Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. *Journal of Hydrometeorology*. 3: 524-538.

Zhao T., Bennett J. & Wang Q. (2017). How Suitable is Quantile Mapping for Postprocessing GCM Precipitation Forecast?. *J. Climate*; 30: 3185-3196.

Zhou J., Pomeroy J., Zhang W., Cheng G., Wang G. & Chen C. (2014). Simulating cold regions hydrological processes using a modular model in west of China. *Journal of Hydrology*; 13-24.

Anexos

Anexo A: Funciones de distribución acumuladas de cada forzante

Para realizar la corrección de las forzantes de pronósticos meteorológicos se utiliza la metodología *Quantile Mapping* (QM), la que requiere de funciones de distribución (PDF) y su respectiva función de distribución acumulada (CDF). Como se señala en la Metodología, la probabilidad que se obtiene con la CDF de las variables predichas se relaciona con el valor de la forzante observada, este proceso se realiza utilizando el software MATLAB.

En la Figura A.1 se presentan las Funciones de Distribución Acumuladas de la temperatura observada en la Estación Valle Nevado y la temperatura obtenida de pronóstico meteorológico. Para esta variable se utiliza la función de distribución Normal. Tanto las series observadas, como pronosticadas corresponden al período de mayo a diciembre del 2018, en intervalos de 6 horas.

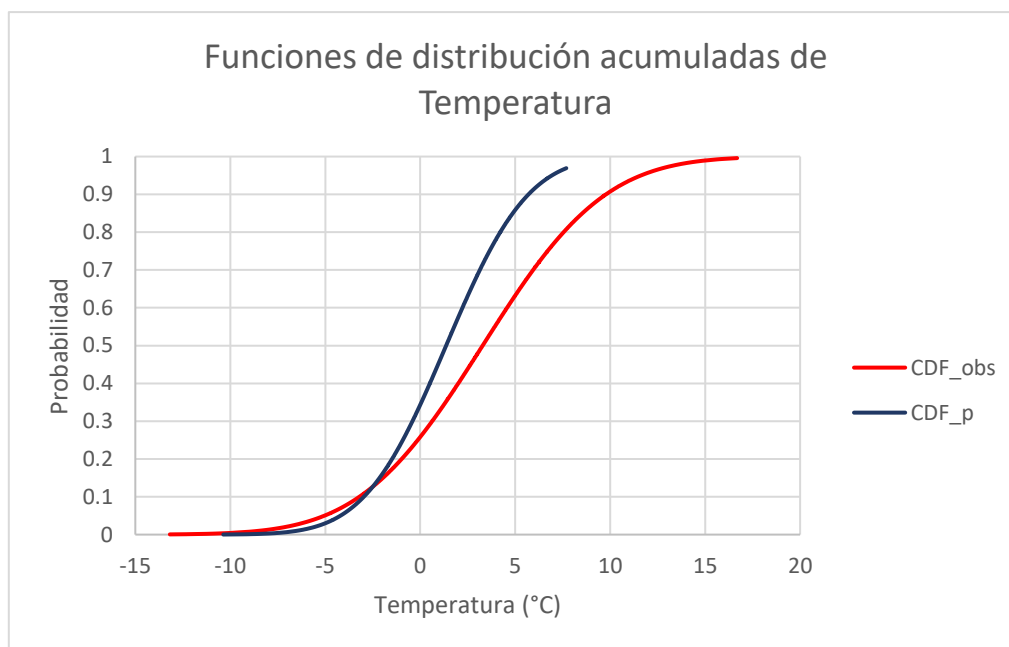


Figura A.1 CDFs de temperatura observada y de pronóstico meteorológico

En el caso de la precipitación acumulada, velocidad de viento y humedad relativa, se utiliza la función de distribución Gamma, como se observa en las siguientes imágenes. En el caso de la precipitación y viento las probabilidades no comienzan en 0, ya que se

utiliza una función mixta, la que distingue si en el intervalo de tiempo hay presencia o no de la variable.

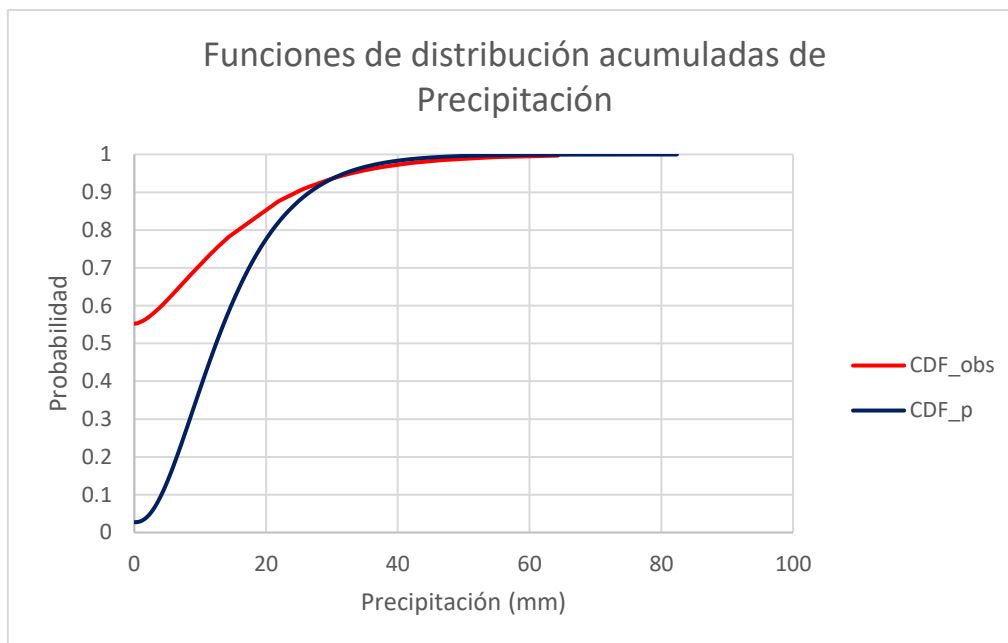


Figura A.2 CDFs de precipitación acumulada observada y de pronóstico meteorológico

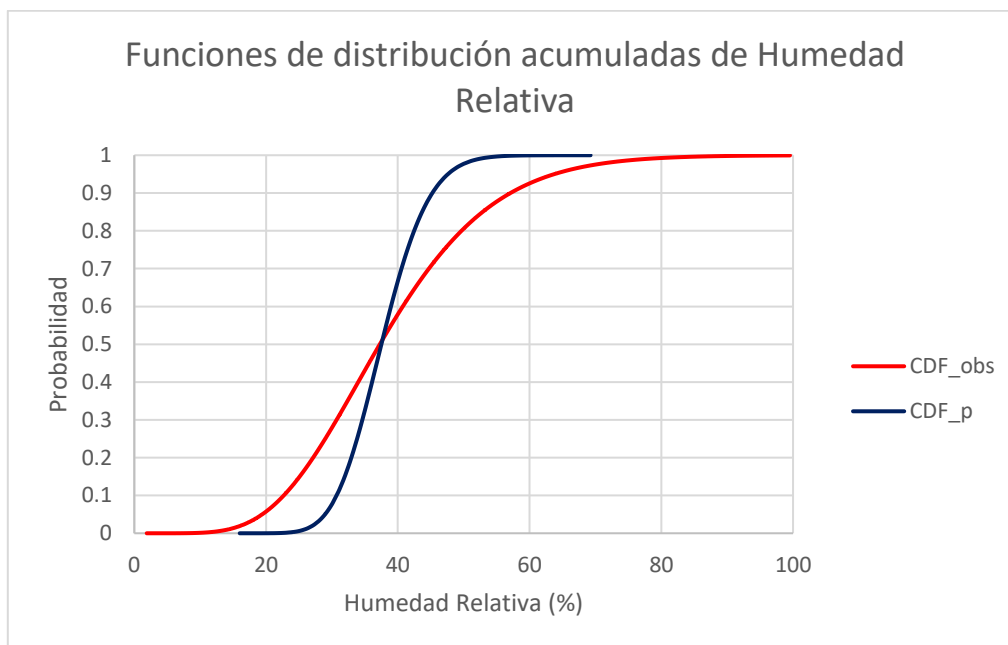


Figura A.3 CDFs de Humedad Relativa observada y de pronóstico meteorológico

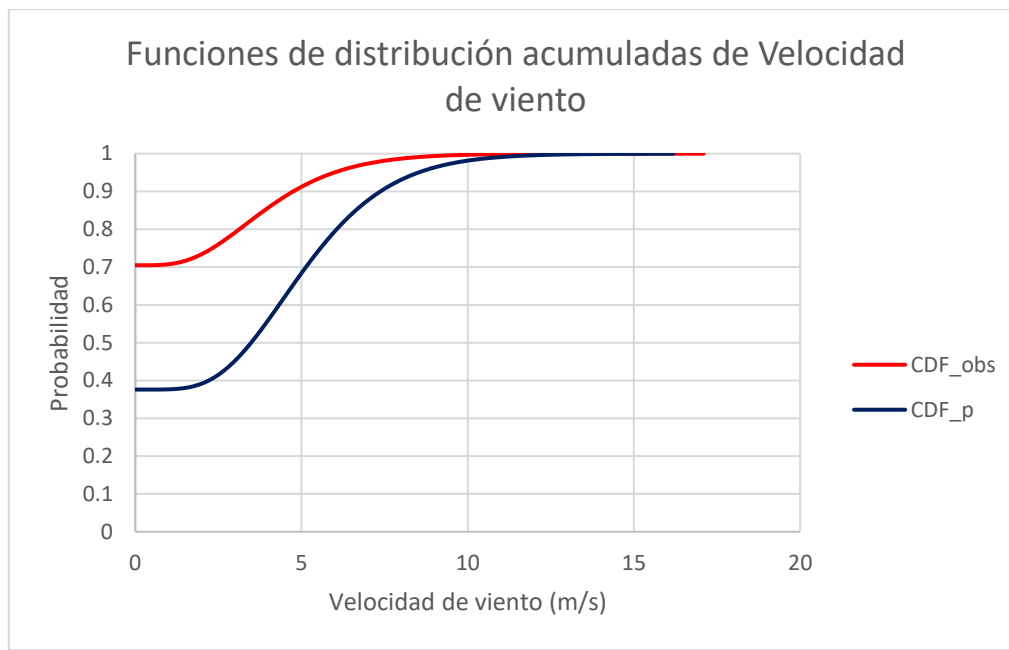


Figura A.4 CDFs de velocidad de viento observada y de pronóstico meteorológico

Anexo B: Evaluación de pronósticos meteorológicos: R² y NSE

Para la evaluación de pronósticos meteorológicos crudos y corregidos, se utilizan 4 métricas de evaluación: RMSE, PB, R² Y NSE. El Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) indica si es que los flujos simulados se ajustan a las observaciones. Al analizar el coeficiente de determinación de cada variable, no se observan correlaciones con la lejanía del horizonte de tiempo que se analiza o alguna otra relación con otro factor. Las evaluaciones se realizan en intervalos de 6 horas.

- Temperatura

En Figura A.7 y Figura A.8 se observa que en el caso de la temperatura, de pronóstico meteorológico, tanto crudo como corregido, el índice NSE es positivo, por lo tanto el ajuste es aceptable.

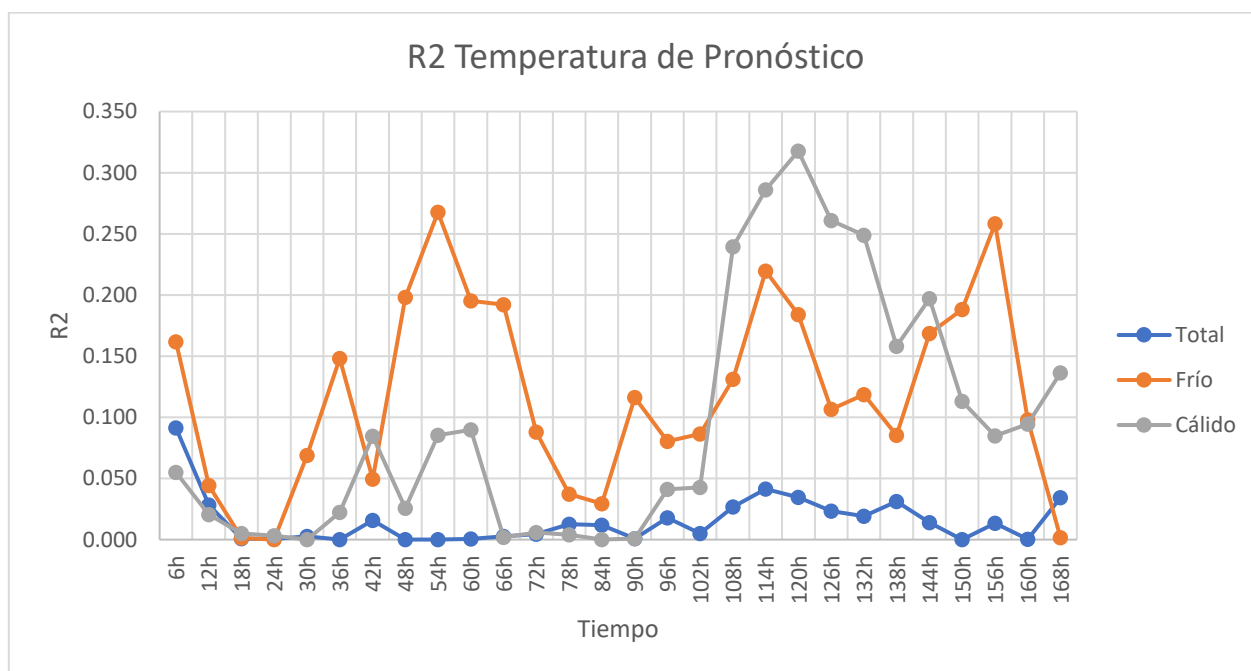


Figura A.5 Coeficiente de determinación de temperatura de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

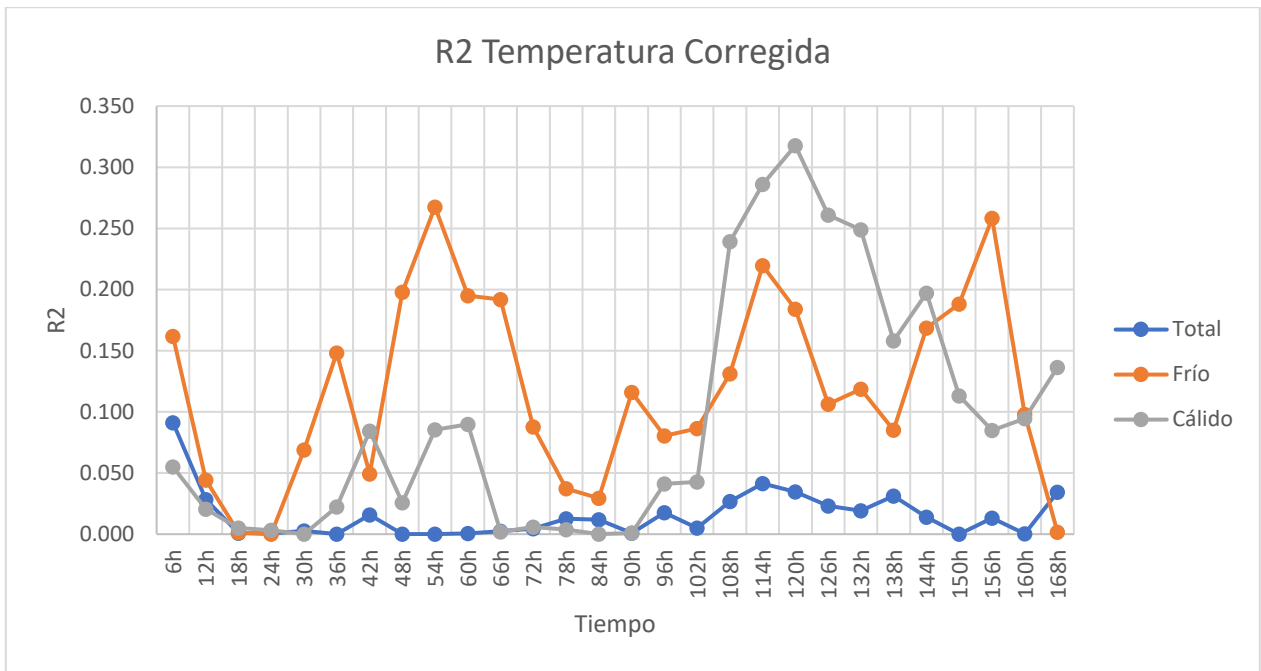


Figura A.6 Coeficiente de determinación de temperatura de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa

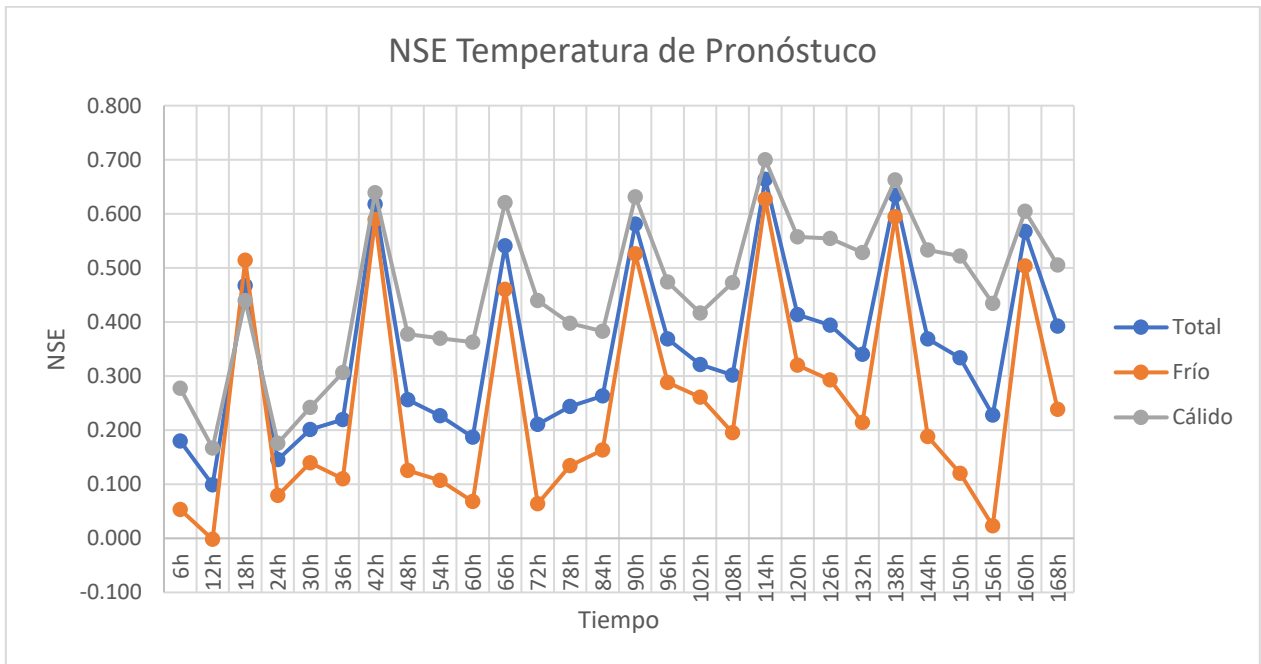


Figura A.7 NSE de temperatura de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

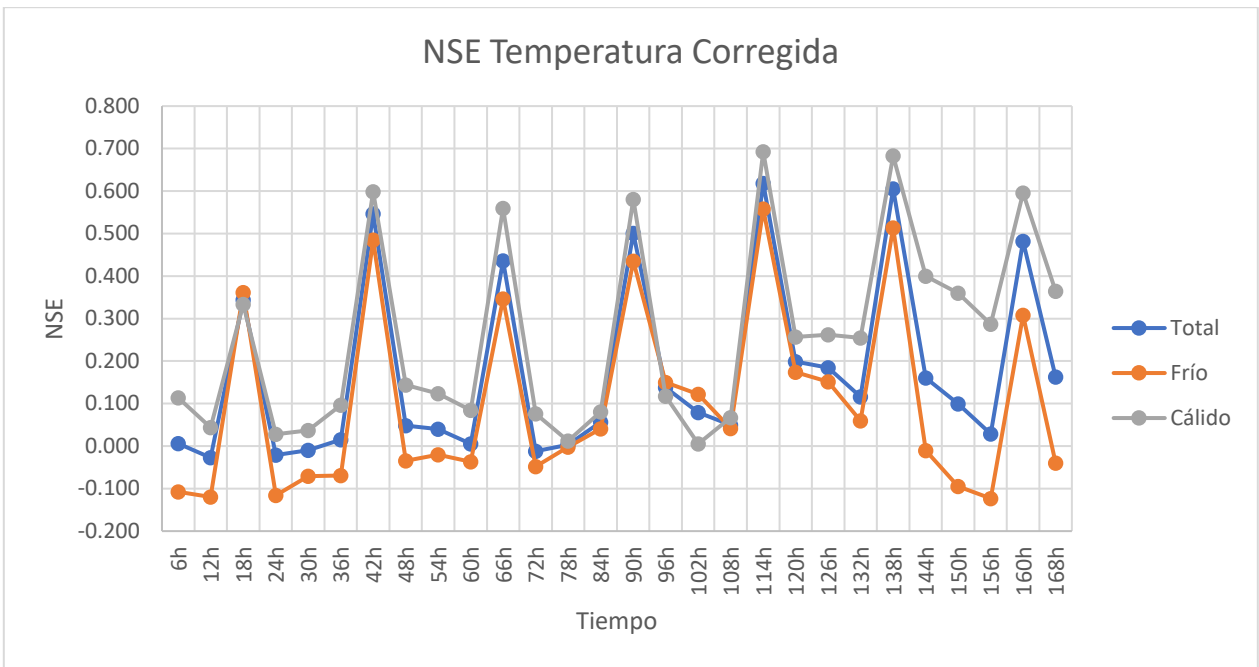


Figura A.8 NSE de temperatura de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa

- Precipitación total

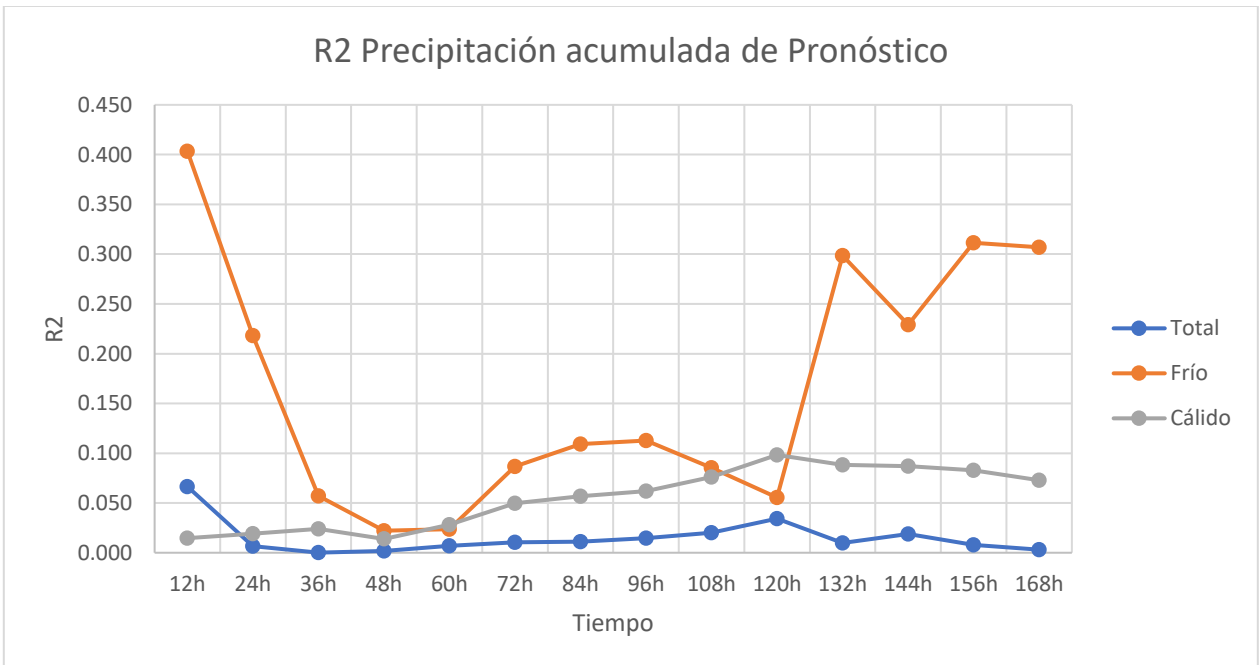


Figura A.9 Coeficiente de determinación de precipitación total acumulada de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

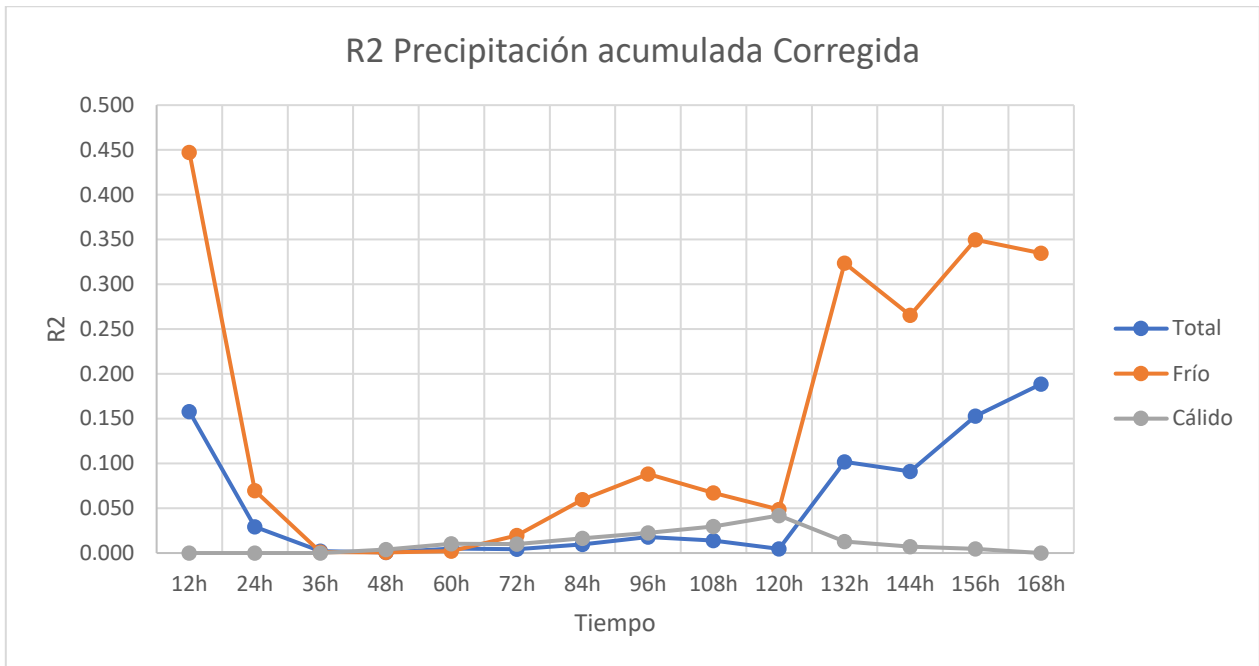


Figura A.10 Coeficiente de determinación de precipitación total acumulada corregida de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

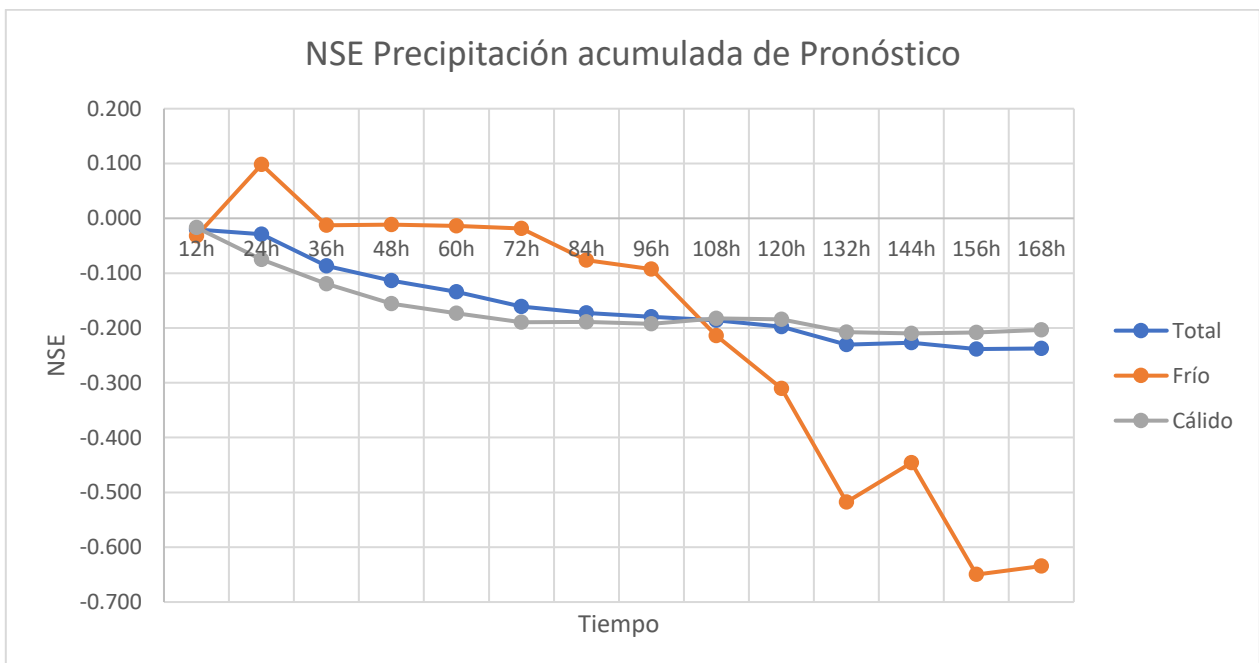


Figura A.11 NSE de precipitación total acumulada de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

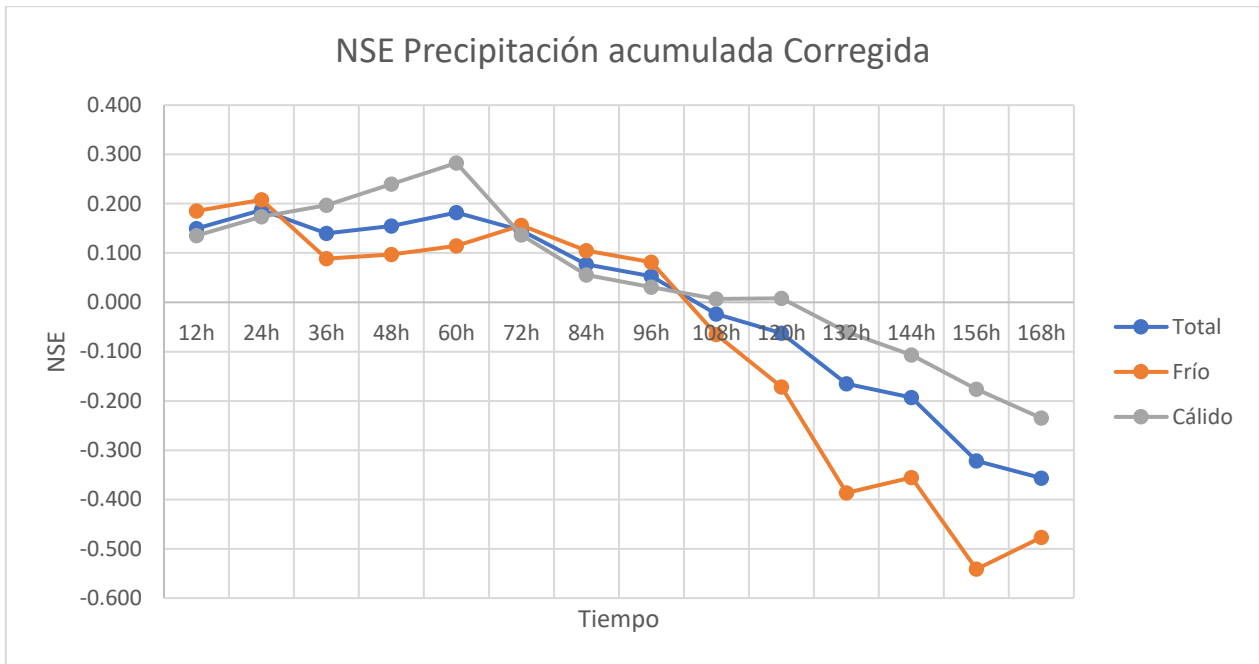


Figura A.12 NSE de precipitación total acumulada de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa

- Humedad Relativa

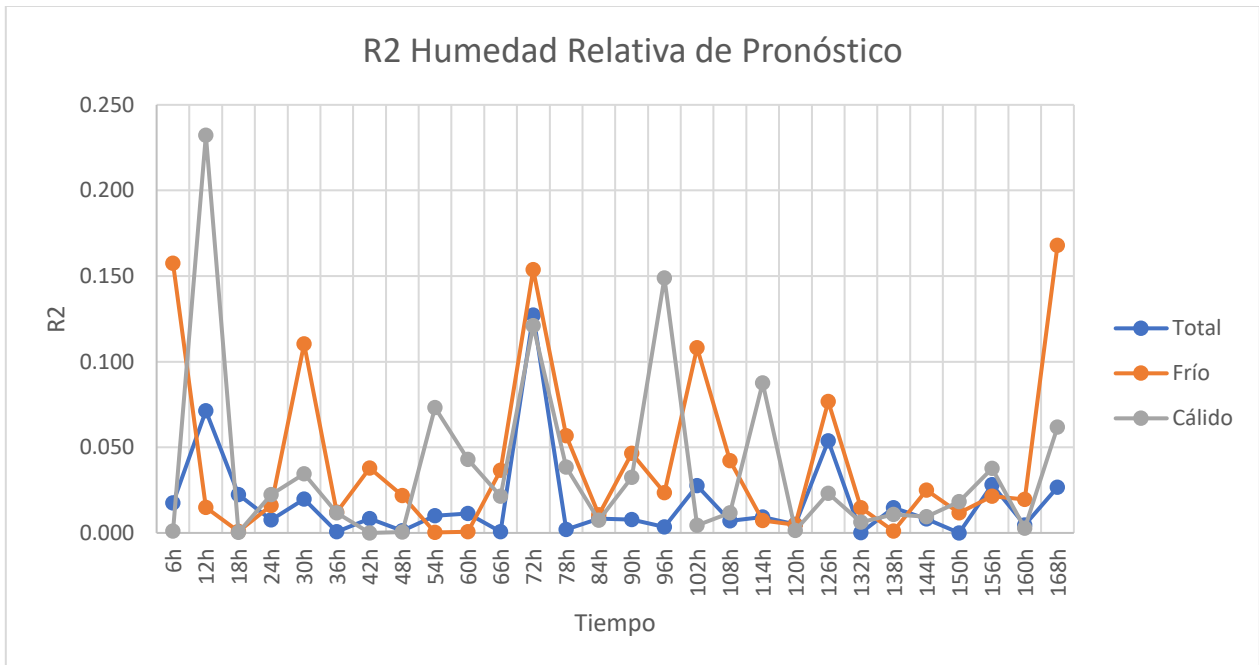


Figura A.13 Coeficiente de determinación de Humedad Relativa de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

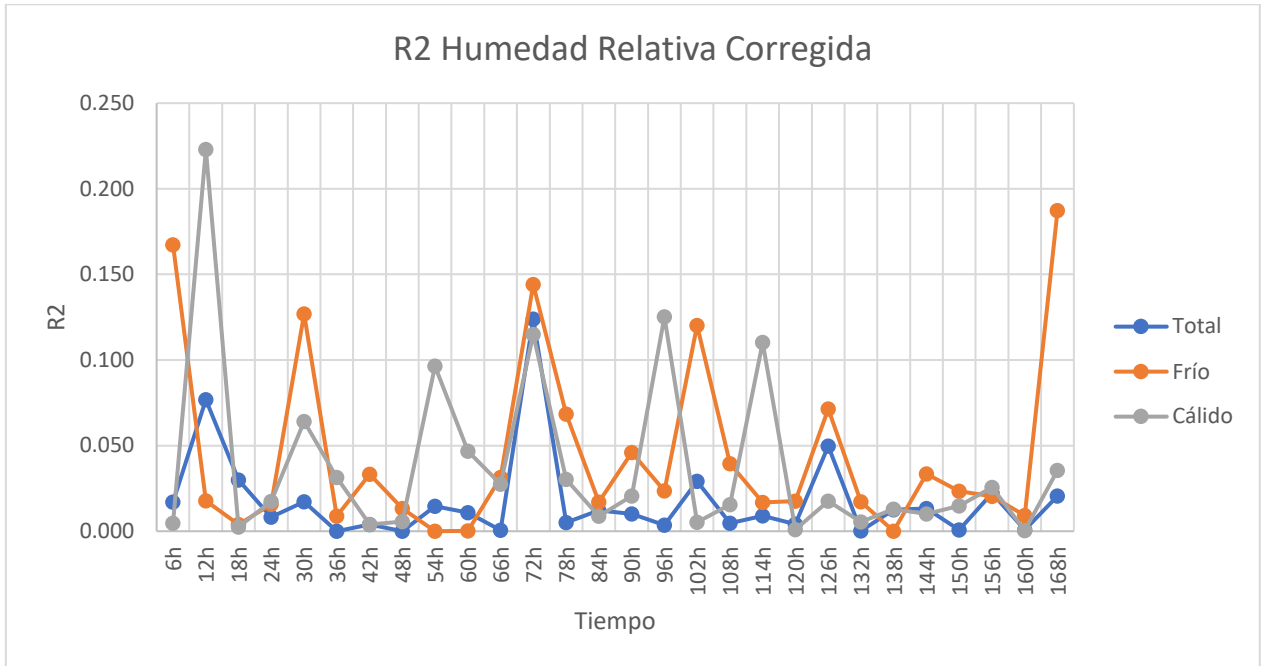


Figura A.14 Coeficiente de determinación de Humedad Relativa corregida de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

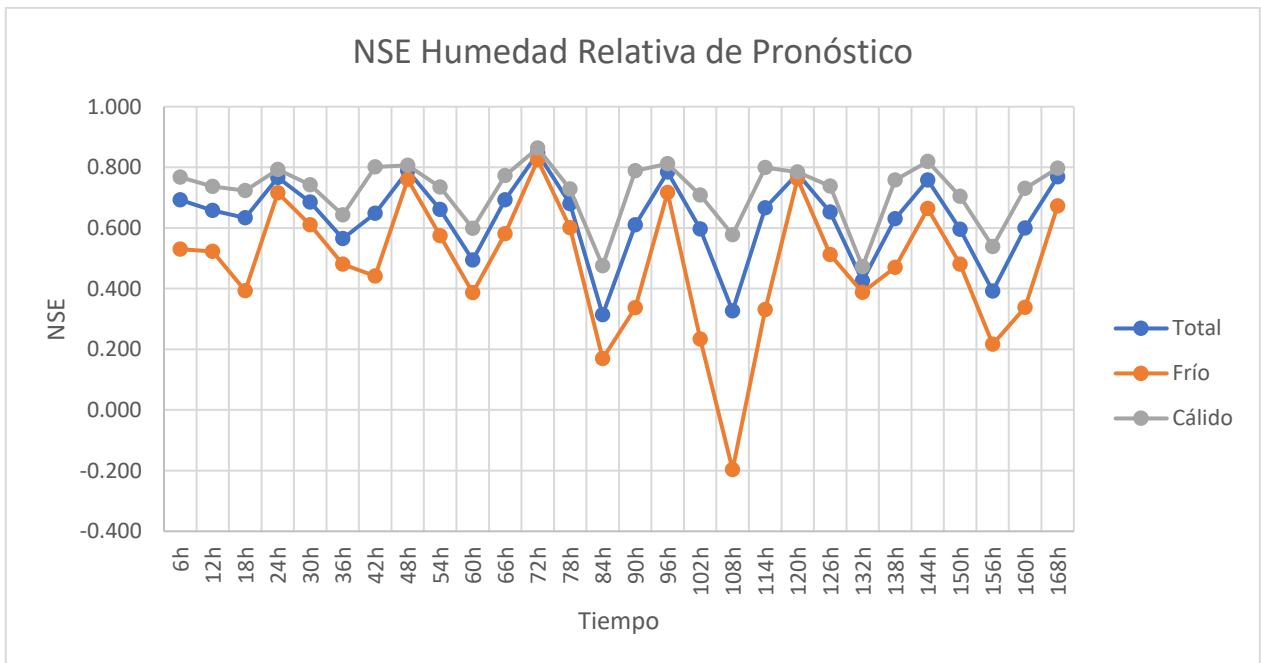


Figura A.15 NSE de Humedad Relativa de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

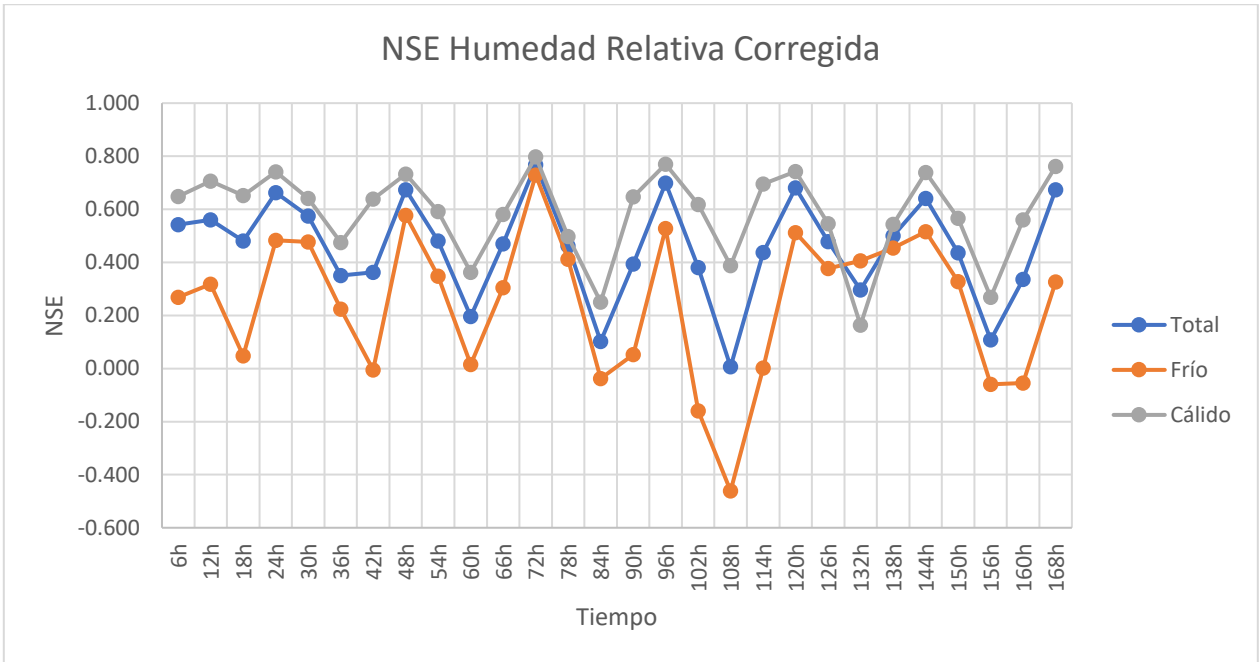


Figura A.16 NSE de Humedad Relativa de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa

- Velocidad de viento

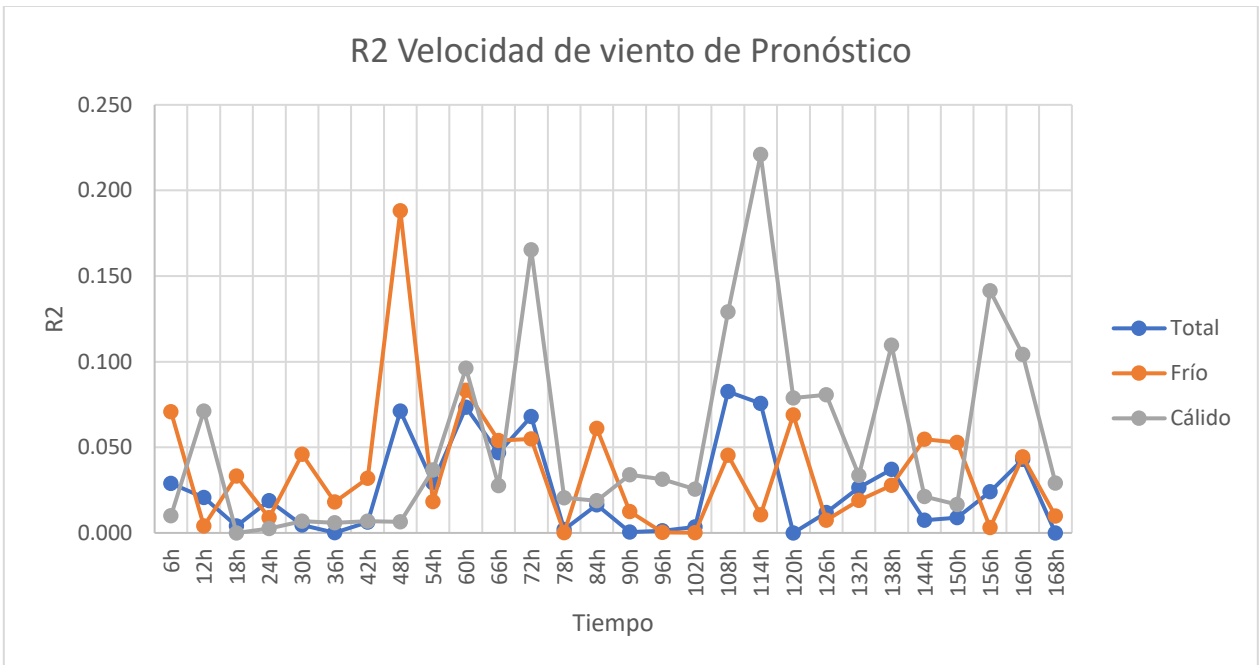


Figura A.17 Coeficiente de determinación de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

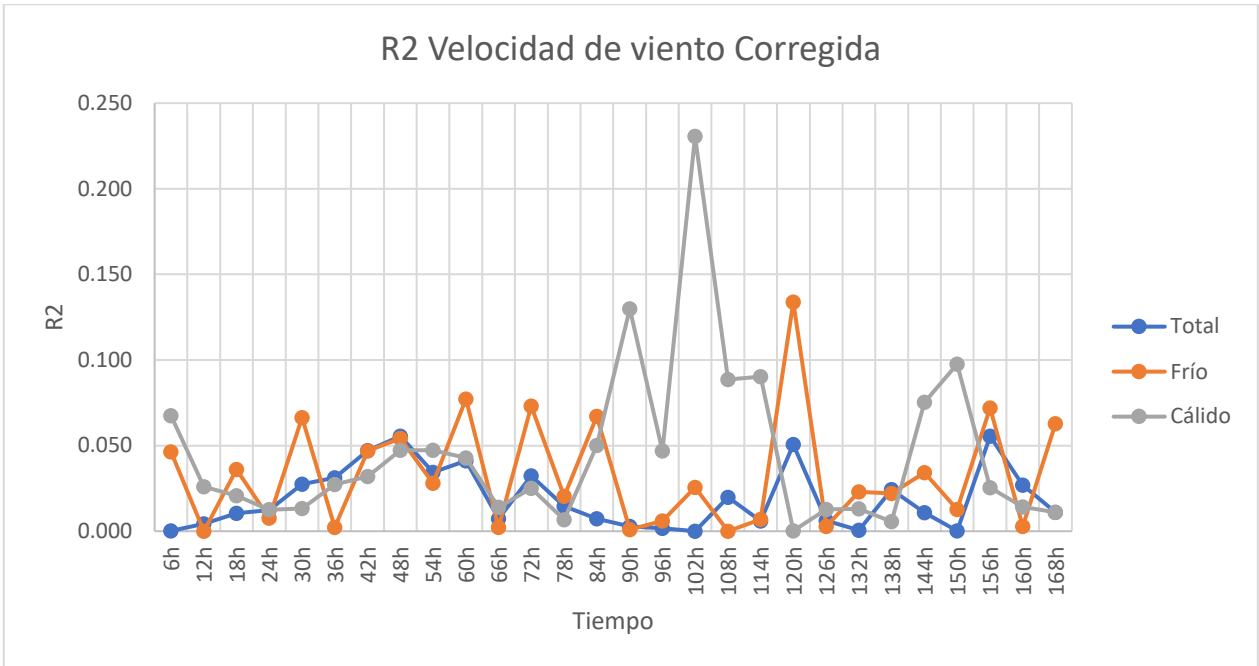


Figura A.18 Coeficiente de determinación de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico corregido en período frío, cálido y temporada completa

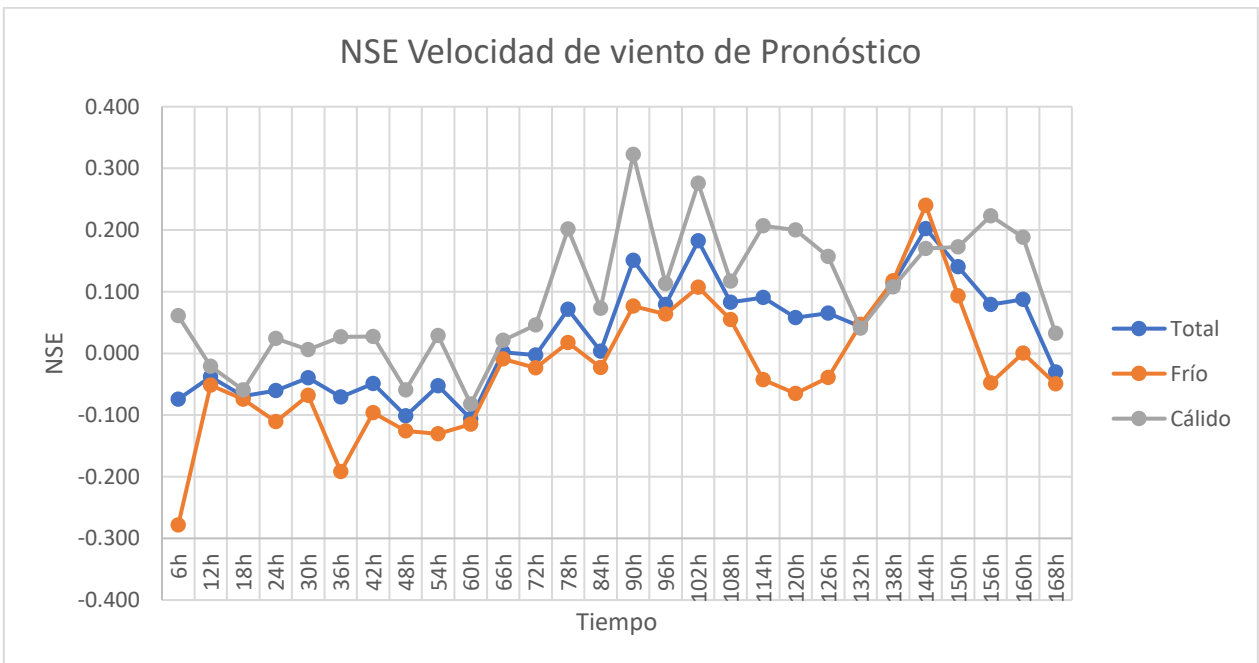


Figura A.19 NSE de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

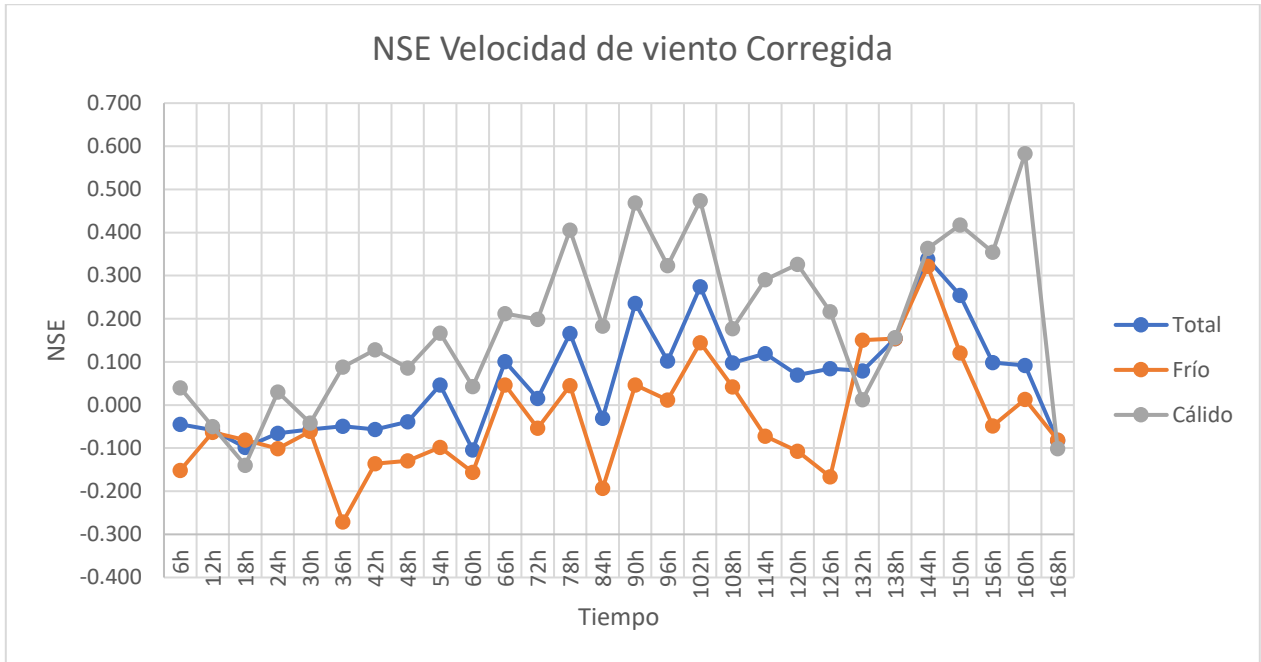


Figura A.20 NSE de Velocidad de viento de pronóstico meteorológico en período frío, cálido y temporada completa

Anexo C: Climogramas utilizando forzantes observadas y de pronóstico meteorológico

Los gráficos presentes en la Figura A.21 y Figura A.22 se construyen a partir de las series de precipitación y temperatura de registros observados y pronósticos meteorológicos. En las figuras se observa la relación entre las tormentas y su temperatura asociada.

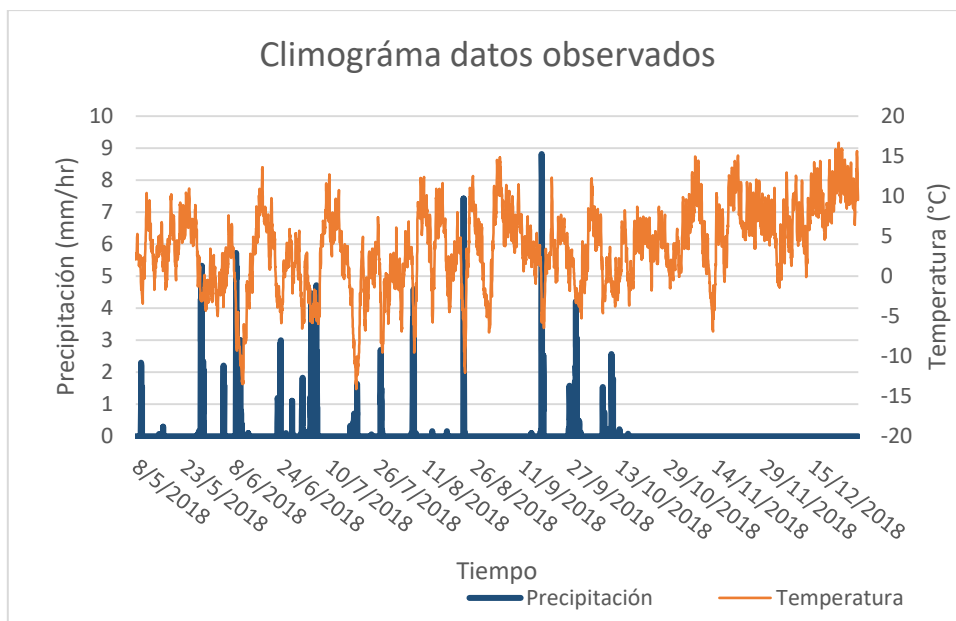


Figura A.21 Precipitación y temperatura registradas en estación Valle Nevado

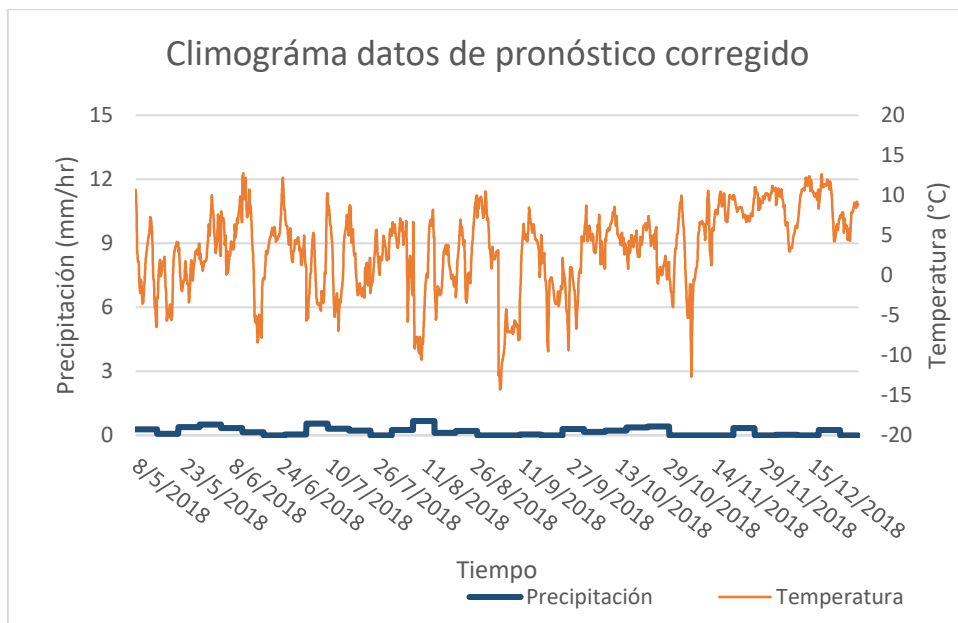


Figura A.22 Precipitación y temperatura de pronóstico meteorológico GFS corregido